



HAL
open science

GaN, une alternative au SiC pour les applications domotiques ?

Amira Souguir-Aouani

► **To cite this version:**

Amira Souguir-Aouani. GaN, une alternative au SiC pour les applications domotiques ?. JCGE, Jun 2014, Saint-Louis, France. hal-01083953

HAL Id: hal-01083953

<https://hal.science/hal-01083953>

Submitted on 18 Nov 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

GaN, une alternative au SiC pour les applications domotiques ?

Amira SOUGUIR-AOUANI

Université de Lyon, CNRS, Laboratoire Ampère, INSA-Lyon, UMR 5005, F-69621, France
amira.aouani@insa-lyon.fr

RESUME – Dans cet article, nous étudions les différents principes pour concevoir une nouvelle génération de redresseur Schottky de puissance en Nitrure de Gallium (GaN). Nous avons arrêté notre choix sur une structure de diode Schottky pseudo-verticale en GaN sur un substrat en silicium, ayant une tenue en tension de 600V. Pour cela, nous avons identifié les étapes critiques du procédé de fabrication. Une grande partie des travaux de recherche consiste à optimiser cette structure. Pour cela, nous avons étudié l'influence des paramètres technologiques et géométriques sur le compromis « tenue en tension / résistance passante spécifique ». Nous avons également étudié l'impact des protections périphériques afin d'assurer la tenue en tension du composant. Finalement, les résultats de simulation sont comparés avec les mesures expérimentales des structures de test afin de valider les paramètres des modèles de simulation.

ABSTRACT – In this paper, a new generation of Gallium Nitride Schottky rectifier was studied. Several methods were studied to develop this research. A GaN-on-Silicium mesa Schottky diode which has a reverse breakdown voltage higher than 600V was selected. The different steps of manufacturing process are identified in this paper. The objective aims to optimize the structure of Schottky diode. As a first step, an impact analysis of technological and geometrical parameters on the on-resistance and the breakdown voltage is released. We also studied the impact of peripheral protections in order to improve the reverse breakdown voltage of the component. Finally, a comparison between the simulation results and previous experimental results was presented to validate the parameters of these models.

MOTS-CLES – Nitrure de Gallium GaN, grand gap, diode Schottky, structure pseudo-verticale, substrat en silicium, résistance passante spécifique, tenue en tension en inverse, modèles de simulation.

1. Introduction

Commercialement, le silicium est le semi-conducteur le plus utilisé du fait de son développement technologique et de ses propriétés électriques et physiques. Néanmoins, le silicium atteint ses limites physiques pour les applications en électronique de puissance nécessitant de forts courants et des tensions élevées. L'évolution des besoins en électronique de puissance de plus en plus exigeants demande l'utilisation de nouveaux matériaux, plus à même de répondre aux problématiques de l'électronique en haute température, haute tension et haute fréquence. Le carbure de silicium (SiC) a longtemps été considéré comme le candidat idéal pour succéder au silicium. Cependant, son coût élevé a contraint les chercheurs et les industriels à se tourner vers un autre semi-conducteur. Le GaN s'est présenté alors comme le candidat idéal. Ainsi il présente d'excellentes propriétés physiques, il possède une large bande interdite (3,43 eV à 300K), un champ critique très élevé (10 fois supérieur à celui du silicium) et une vitesse de saturation des électrons élevée, qui font de ce matériau la solution idéale pour les applications de grande puissance, haute fréquence et haute température [1-4]. La croissance de ce matériau reste difficile et onéreuse et pousse les laboratoires ainsi que les industriels à s'orienter vers du GaN épitaxié sur substrat bas coût comme le silicium.

L'objectif du projet de la thèse est de réaliser dans un matériau GaN épitaxié sur un substrat silicium, un démonstrateur réalisant la fonction redresseur avec un calibre en tension de l'ordre de 1 kV. Ainsi, dans le cadre de précédents développements de redresseurs Schottky en Nitrure de Gallium, une première génération de redresseur Schottky a été conçue et caractérisée [5]. Certaines briques technologiques élémentaires pour la réalisation de tels dispositifs ont été étudiées précédemment tels que le contact ohmique [6-8], le contact Schottky [9-10] et l'implantation ionique [11-12]. La corrélation des propriétés électriques des diodes de première génération avec les simulations par éléments finis permettra de définir de nouvelles structures innovantes avec une densité de puissance améliorée.

2. Présentation de la structure de la diode pseudo-verticale sur un substrat silicium

La structure de la diode pseudo-verticale représentée sur la figure 1 est composée d'un substrat silicium, avec une couche tampon à base d'AlN, puis d'une première couche de GaN de type-n fortement dopée avec du silicium et finalement, d'une couche de type n également faiblement dopée. Un anneau de garde de type-p et une gravure mesa seront utilisés pour la protection périphérique. Les technologies utilisées actuellement pour fabriquer cette structure de diode pseudo-verticale se basent sur une étape d'implantation pour créer l'anneau de garde P+ [5] suivie d'une étape de gravure pour atteindre la couche fortement dopée, ensuite des étapes de dépôt d'oxyde et de métaux afin de réaliser les deux contacts ohmique et Schottky. Le titane et l'aluminium (Ti/Al) sont utilisés pour le contact ohmique [6-8] ainsi que le nickel et l'or (Ni + Au) pour le contact Schottky [5-9-10]

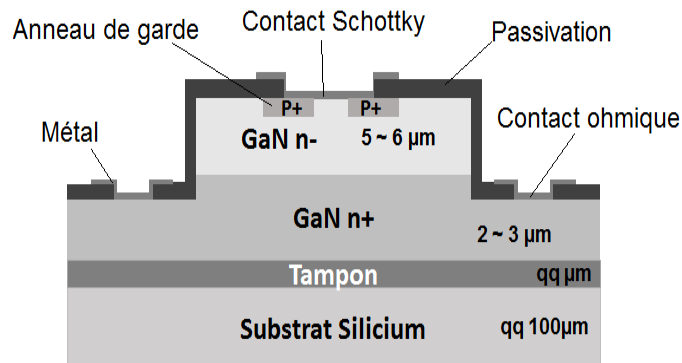


Figure 1 : structure de la diode Schottky pseudo-verticale en GaN.

Le dopage de la zone P se fait par implantation de Mg mais le problème est que cette implantation est difficile à réaliser. En effet, l'implantation ionique génère de nombreux défauts dans le GaN. Afin de réparer ces défauts et d'activer les atomes implantés, un traitement thermique (recuit) à haute température doit être effectué. Or la surface du GaN commence à se dégrader dès 850°C. Il est donc nécessaire d'envisager l'usage d'une couche de protection (« cap-layer ») avant le recuit d'activation [11-13].

Le GaN sur substrat silicium permet d'obtenir des diodes Schottky à plus faible coût que le SiC, cela permet aussi d'introduire le fait qu'il est nécessaire de faire des composants quasi-verticaux, mais le problème de la réalisation de couches de GaN épaisses sur un substrat silicium limite la tenue en tension des diodes GaN/Si à environ 600V voire 1.2kV dans les prévisions.

3. Adaptation des paramètres des modèles de simulation

Les simulations électriques sont faites avec un simulateur numérique de type éléments finis (SENTAURUS) [14]. L'obtention d'une modélisation correcte et précise de la diode Schottky en GaN, nécessite l'adaptation des paramètres des modèles de simulation au GaN. Pour cela, une étude bibliographique sur les structures en GaN a été effectuée. Elle a permis d'extraire les principales propriétés physique et électrique du GaN afin de renseigner les paramètres des modèles physiques du simulateur. Les modèles physiques les plus importants que nous avons utilisés au cours de la simulation sont résumés dans le tableau 1 et sont : la bande d'énergie interdite, les coefficients d'ionisation, la durée de vie des porteurs, la mobilité des porteurs, l'ionisation incomplète des impuretés dopantes et la conductivité thermique.

Tableau 1. Principaux modèles physiques de simulation

Grandeur considérée	Formules analytiques des modèles utilisés en simulation	Références
Bande d'énergie interdite	$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)}$ $E_g(0) = 3,4 \text{ eV} \quad \alpha = 7.4 \times 10^{-4} \text{ eVK}^{-1} \quad \beta = 6 \times 10^2 \text{ K}$	Bennet Wilson [15]
Mobilité des porteurs	$\mu_n(N_{tot}, T) = \mu_{min1} + \frac{\mu_{max} \left(\frac{T}{300}\right)^\alpha - \mu_{min2}}{1 + \left(\frac{N_{tot}}{N_{ref}}\right)^\gamma}$	Caughey et Thomas [16]

<p>Intégrale d'ionisation</p>	$\alpha_n(F) = \gamma a_n e^{\frac{\gamma b_n}{F}} \quad \alpha_p(F) = \gamma a_p e^{\frac{\gamma b_p}{F}} \quad \gamma = \frac{\tanh\left(\frac{\hbar\omega_0}{2kT_0}\right)}{\tanh\left(\frac{\hbar\omega_0}{2kT}\right)} \quad \hbar\omega_0 = 120 \text{ meV}$ $a_n = 2.9 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-1} \quad a_p = 1.34 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-1}$ $b_n = 3.27 \cdot 10^7 \text{ Vcm}^{-1} \quad b_p = 2.03 \cdot 10^7 \text{ Vcm}^{-1}$	<p>Chynoweth [17] Konstantinov [18]</p>
<p>Durée de vie des porteurs</p>	$\tau(N_{tot}) = \tau_{min} + \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{1 + \left(\frac{N_{tot}}{N_{ref}}\right)^\gamma}$ $\tau_{min} = 0 \quad \tau_{max} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ s} \quad \gamma = 1 \quad N_{ref} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	<p>Scharfetter [19]</p>
<p>Ionisation incomplète</p>	$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + g_D \left(\frac{n}{n_1}\right)} \quad \text{avec} \quad n_1 = N_c \exp\left(\frac{E_c - E_d}{kT}\right)$ $N_A^- = \frac{N_D}{1 + g_A \left(\frac{p}{p_1}\right)} \quad \text{avec} \quad p_1 = N_v \exp\left(\frac{E_a - E_v}{kT}\right)$ $E_c - E_d = E_{D,0} - \alpha_p N_{tot}^{\frac{1}{3}}$ $E_{D,0} = 0,0297 \text{ eV}, \quad \alpha_p = 2.5910^{-8} \text{ eVcm}, \quad g_D = 2$ $E_a - E_v = E_{A,0} - \alpha_n N_{tot}^{\frac{1}{3}}$ $E_{A,0} = 0,054 \text{ eV}, \quad \alpha_n = 3.110^{-8} \text{ eVcm}, \quad g_A = 2$	<p>Fermi-Dirac [20]</p>
<p>Conductivité thermique</p>	$\lambda(T) = a + bT + cT^2$ $a = 1.3 \text{ W/(Kcm)} \quad b = 0 \text{ W/(K}^2\text{cm)} \quad c = 0 \text{ W/(K}^3\text{cm)}$	<p>Modèle SENTAURUS [21]</p>

A titre d'exemple, nous allons détailler la méthode employée pour adapter le modèle de la mobilité.

3.1 Modèle de la mobilité des porteurs

Le modèle de mobilité que nous utilisons en simulation est une formulation analytique proposée par Caughey et Thomas [16] adaptée au GaN. Elle permet de décrire la variation de la mobilité en fonction de la concentration totale de dopants ionisés et de la température par la relation (1).

$$\mu_{n,p}(N_{tot}, T) = \mu_{min1} + \frac{\mu_{max}\left(\frac{T}{300}\right)^{-\xi} - \mu_{min2}}{1 + \left(\frac{N_{tot}}{N_{ref}}\right)^\alpha} \quad (1)$$

N_{tot} : Concentration totale de dopants ionisés T : température absolue N_{ref} : Concentration de référence
Les paramètres de l'équation (1) ont été ajustés par rapport à quelques valeurs de mobilité présentes dans la littérature [22-26]. La figure montre les courbes ajustées pour la mobilité des électrons.

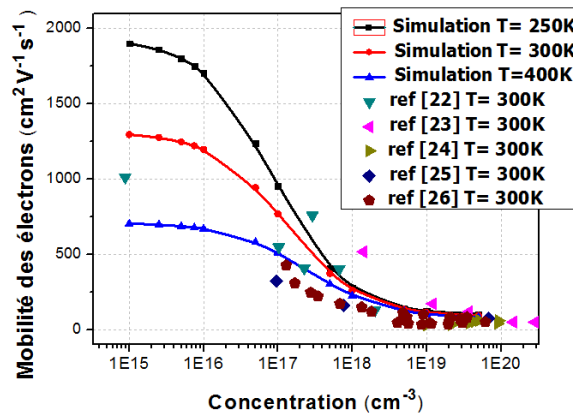


Figure 2 : courbes ajustées de la mobilité des électrons en fonction de la concentration, pour différentes températures.

Les paramètres correspondants aux courbes de la figure 2 sont consignés dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2. Paramètres du modèle de la mobilité.

Porteurs	$\mu_{max}(cm^2V^{-1}s^{-1})$	$\mu_{min1}(cm^2V^{-1}s^{-1})$	$\mu_{min2}(cm^2V^{-1}s^{-1})$	$N_{ref}(cm^{-3})$	α	ξ
Electrons	1200	85	75	9.5×10^{16}	0.55	0.75
Trous	20	33	0	8.0×10^{16}	0.55	0.70

La mobilité est dépendante de la concentration et de la température. En effet, plus le dopage du matériau est élevé, plus la mobilité va chuter, ce qui est le cas de tous les semi-conducteurs. On constate également que la variation de la température affecte la mobilité des électrons. En effet, l'augmentation de la température diminue la mobilité des électrons. La connaissance de ce paramètre sur une large gamme de dopage est critique pour permettre une extraction correcte de la résistance à l'état passant de la diode Schottky. Des mesures de type TLM et C(V) permettront également de contribuer à la connaissance de la variation de la mobilité en fonction de la température pour quelques valeurs de dopage donné. Ces valeurs correspondront aux couches optimisées pour obtenir des tenues en tension de l'ordre de 600V et 1.2kV. Les paramètres des modèles de simulation peuvent être validés en comparant les caractéristiques obtenues par simulation et les caractéristiques mesurées sur des composants issus d'études antérieures et de la bibliographie.

4. Optimisation de la structure de la diode Schottky

4.1 Influence des paramètres technologiques et géométriques sur R_{on} / V_{br}

Dans le but d'optimiser les paramètres technologiques de la structure géométrique interne de la diode Schottky en GaN, une série de simulation basée sur la variation de ces paramètres est engagée. Dans ce contexte, nous allons analyser l'influence des paramètres géométriques et technologiques sur la résistance spécifique à l'état passant R_{on} et sur la tenue en tension de la diode Schottky en GaN. La figure 1 présente la géométrie du démonstrateur actuellement fabriqué. C'est sur cette base que nous allons travailler afin d'optimiser ses performances. L'identification des paramètres sensibles dans la structure actuelle a montré un fort impact de l'épaisseur de la zone fortement dopée sur la résistance à l'état passant et aussi l'impact du dopage de l'anneau de garde sur la tenue en tension de la diode.

4.1.1 Impact de l'épaisseur de la zone fortement dopée N+ sur R_{on}

La figure 3 illustre la variation de la résistance R_{on} en fonction de l'épaisseur de la zone fortement dopée (ep_{cath}). Nous constatons que l'épaisseur de cette zone a un fort impact sur la résistance R_{on} . En effet pour des épaisseurs de ep_{cath} inférieures à $4\mu m$, nous avons une grande variation de R_{on} allant de 42 à 14 $m\Omega cm^2$, puis pour des épaisseurs de ep_{cath} supérieures à $4\mu m$ la variation de la résistance est plus faible. Nous constatons que l'épaisseur et le dopage de la zone fortement dopée favorisent la diminution de R_{on} mais, pour des raisons de limites technologiques, il est difficile de réaliser des épaisseurs supérieures à $3\mu m$ avec un fort dopage.

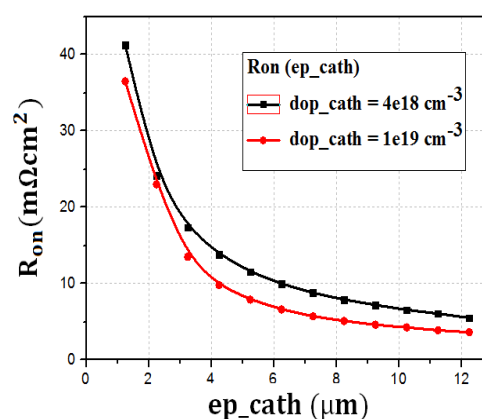


Figure 3 : variation de la résistance R_{on} en fonction de l'épaisseur de la zone fortement dopée (ep_{cath}) pour deux valeurs de dopage.

La figure 4 illustre la distribution de la densité de courant des électrons dans la structure de la diode pour une épaisseur $ep_{cath}=2\mu m$, polarisée en direct avec une tension $V_F = 1.5V$. On constate que la densité de courant des électrons est bien plus importante dans la zone N+ (région C et D) que dans la zone N- (région A et B). On peut remarquer que la densité de courant dans la zone N- reste intéressante à proximité de l'anneau de garde, en région B, par rapport à la région A. Une coupe C1 verticale dans la zone faiblement dopée N- et aussi une coupe C2 horizontale dans la zone fortement dopée N+ dans la partie où la densité de courant est maximale, nous permet de visualiser la variation du potentiel dans les couches N- et N+.

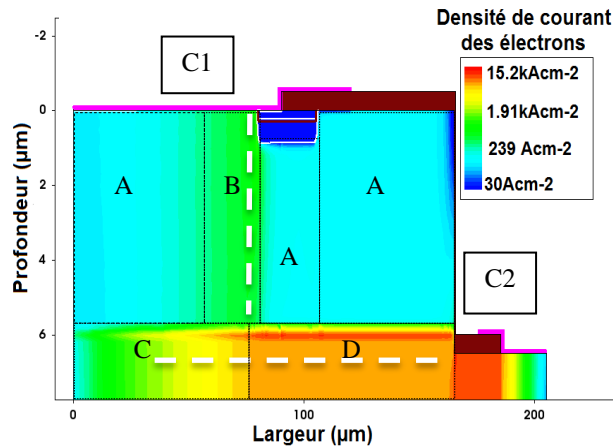


Figure 4 : distribution de la densité de courant des électrons dans la structure de la diode polarisée sous 1.5V pour une épaisseur de la couche N+ de 2 μm . et un dopage de $4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Tableau 3. Variation de la densité de courant pour différentes régions la structure de la diode.

	A	B	C	D
Densité de courant des électrons $J \text{ (kAcm}^{-2}\text{)}$	$0.09 < J < 0.31$	$0.31 < J < 1.47$	$2.97 < J < 5.00$	$4.72 < J < 10.90$

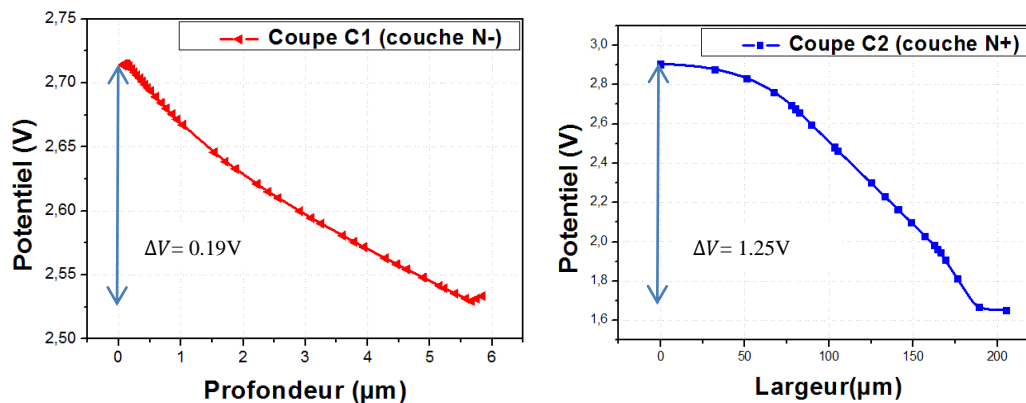


Figure 5 : distribution du potentiel dans la couche N- (à gauche, coupe C1 verticale) et dans la couche N+ (à droite, coupe C2 horizontale).

La figure 5 montre que pour une polarisation en direct de la diode Schottky de 1.5V nous avons une différence de potentiel de 0.19V dans la couche faiblement dopée N- ce qui correspond à 13% de la tension appliquée, et par conséquent une différence de potentiel de 1.25V dans la couche fortement dopée N+ ce qui correspond à 83% de la tension appliquée. Cela signifie qu'une grande partie de la résistance R_{on} provient de la couche (N+).

4.1.2 Influence de la protection périphérique (dopage de l'anneau de garde) sur la tenue en tension V_{br}

La figure 6 illustre la variation de la tenue en tension en fonction du dopage de l'anneau de garde. On observe une variation non linéaire de la tenue en tension en fonction du dopage de l'anneau de garde. Ainsi, l'augmentation du dopage de l'anneau de garde favorise l'augmentation de la tenue en tension de la diode. Pour des raisons de limites technologiques, il est difficile de réaliser un fort dopage de la zone P par implantation de Mg.

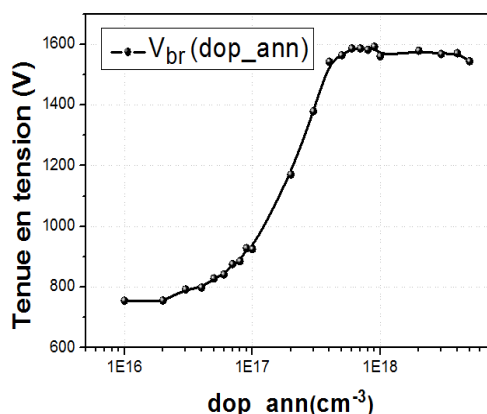


Figure 6 : variation de la tenue en tension en fonction du dopage de l'anneau de garde.

Dans le but d'illustrer l'effet de la protection périphérique de l'anneau de garde, nous avons visualisé la distribution de l'ionisation par impact ainsi que la distribution des lignes équipotentielles dans la structure de la diode pour deux valeurs du dopage de l'anneau de garde : 10^{17}cm^{-3} et 10^{18}cm^{-3} . Pour un dopage de 10^{18}cm^{-3} , nous observons que l'anneau de garde améliore la tenue en tension de la diode. En effet, il permet de repousser les lignes de champ au-delà de la zone de terminaison du contact métallique, zone où le champ électrique est le plus fort, ainsi il permet de réduire le courant de fuite dans la structure. Pour des faibles valeurs du dopage de l'anneau de garde à 10^{17}cm^{-3} , la tenue en tension est de 600V. Nous en déduisons donc que l'anneau de garde ne joue pas son rôle de protection périphérique, car en effet nous observons le claquage dans la zone de terminaison du contact métallique. De plus, on trouve les mêmes tenues en tension que pour des structures de test dont les anneaux de garde n'ont pas été activés. La figure 8 présente, une coupe horizontale du champ électrique le long de l'anneau de garde, permettant de repérer les pics de champ et les zones de claquage dans la structure. Dans le cas de faible dopage le pic du champ se situe à la zone de terminaison du contact métallique mais par contre à fort dopage le pic du champ se situe aux extrémités de l'anneau de garde.

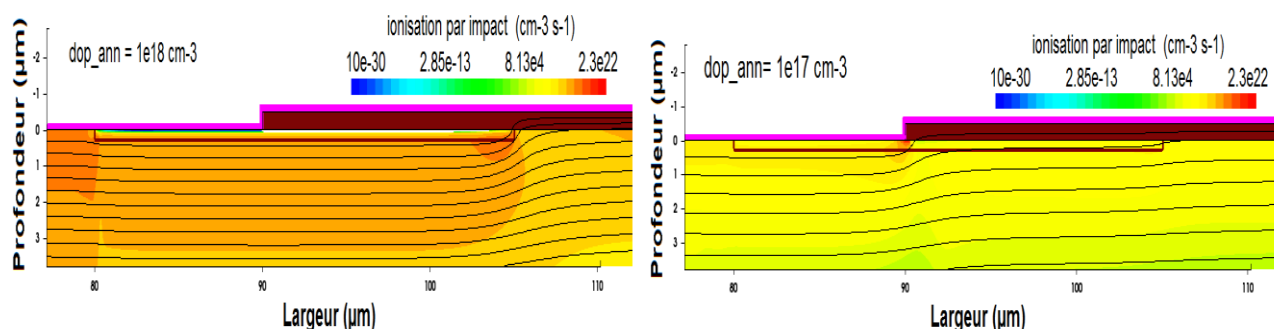


Figure 7 : distribution de l'ionisation par impact et des lignes équipotentielles dans la structure de la diode. Dopage de l'anneau de 10^{18}cm^{-3} à gauche et 10^{17}cm^{-3} à droite.

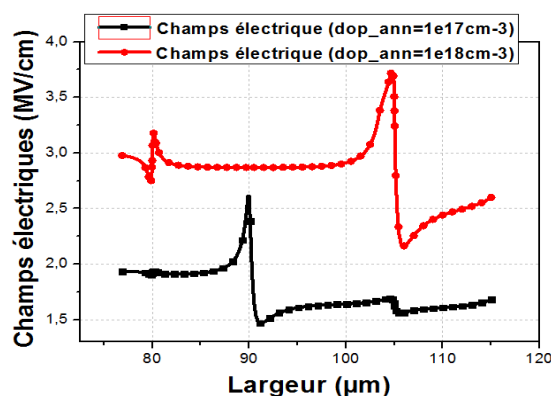


Figure 8 : coupe horizontale du champ électrique le long de l'anneau de garde.

5. Comparaison des simulations avec les mesures expérimentales

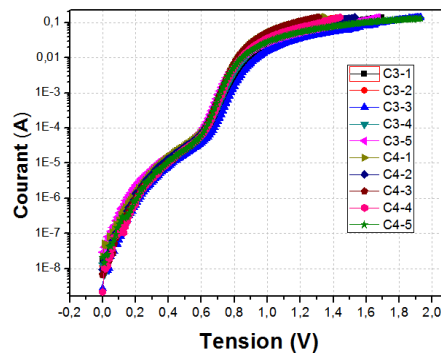


Figure 9 : caractéristiques statiques en direct des structures de test.

La figure 9 présente les mesures expérimentales de caractéristique statique en direct sur des structures de test. On constate un comportement redresseur avec des hauteurs de barrière autour de 0.8eV. Nous observons, aussi, en polarisation directe, une double barrière. Nous avons attribué ce comportement à une fine couche d'oxyde natif de gallium présente à l'interface métal/semi-conducteur ou à différentes phases métalliques qui constituent le contact Schottky. La qualité de ce contact et les performances d'une diode Schottky peuvent se mesurer grâce à plusieurs paramètres électriques comme la hauteur de barrière, le facteur d'idéalité et la constante de Richardson.

Nous avons comparé nos simulations avec les mesures des caractéristiques statiques en direct des structures de test, afin de valider les modèles de simulation. La résistance dynamique mesurée est $R_{\text{dyn_mes}} = 17 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ pour une valeur simulée $R_{\text{dyn_sim}} = 21 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, soit un écart de 19%. Cet écart peut être attribué à une incertitude sur le modèle de mobilité. En effet des mesures de résistivité, (sur des plaques N+ en GaN d'épaisseur $2 \mu\text{m}$ et de dopage de $4.5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ sur un substrat en silicium), ont donné une valeur de résistance carrée $R_{\square} \approx 35 \Omega / \square$ correspondant à une résistivité $\rho_{\text{MES}} = 7 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$. Le modèle analytique donne une résistivité de $\rho_{\text{SIM}} = 10.7 \text{ m}\Omega$ (écart de 30%), conduisant à une surestimation de la valeur de la résistance dynamique. Compte tenu du fait que la contribution simulée de la couche N+ à la résistance dynamique est de l'ordre de 80%, il est crucial d'extraire le modèle de mobilité du matériau utilisé pour la fabrication des diodes de puissance. Pour prédire plus précisément les contributions respectives des différentes couches d'une diode à la résistance à l'état passant.

6. Conclusion

Dans cet article, nous avons identifié les paramètres sensibles de la structure de diode Schottky en GaN actuelle et étudié leur impact sur le compromis « tenue en tension / résistance passante spécifique ». Nous constatons que l'augmentation d'épaisseur et du dopage de la zone N+ favorise la diminution de R_{on} ainsi que le dopage de l'anneau de garde augmente la tenue en tension. Nous avons cherché à valider les modèles des simulations en comparant nos simulations avec les mesures expérimentales des structures de test, et nous avons réalisé quelques mesures, sur des plaques N+ sur un substrat en silicium afin d'extraire les paramètres physiques du GaN et d'adapter les paramètres des modèles de simulation. Il reste maintenant à réaliser des structures de test afin d'étudier l'influence des paramètres technologiques et géométriques sur le compromis « tenue en tension / résistance passante spécifique ».

Remerciement : Ces travaux sont financés dans le cadre du programme économie numérique des Investissements d'Avenir. Ils se déroulent dans le cadre du programme « Tours 2015 », lauréat du premier appel à projets « Nanoélectronique », et porté par ST-Microelectronics.

Références bibliographiques

- [1] M.S. Shur, "GaN based transistors for high power applications. Solid-State Electron", Vol. 42, No. 12, pp. 2131, (1998)
- [2] M. Trivedi, K. Shenai, "Performance evaluation of high-power wide band-gap semiconductor rectifiers". J Appl Phys. Vol. 85, No. 90, pp. 6889, (1999).
- [3] M.A. Khan, X. Hu, "AlGaIn/GaN metal oxide semi-conductor heterostructure field effect transistor". IEEE Electron Device Lett, Vol. 21, No. 2, pp. 63, (2000).
- [4] S.J. Pearton, F. Ren, "Fabrication and performance of GaN electronic devices". Vol. 30, pp. 55, (2000)
- [5] O. Menard, "Développement de briques technologiques pour la réalisation de diodes Schottky sur Nitrure de Gallium", Thèse, Université François-Rabelais de tours, (2010).

- [6] N. Thierry-Jebali, O. Ménard, "Investigation on the Origin of Ohmic Behavior for Ti/Al based Contacts on n-type GaN" Materials Science Forum, Vol. 711, pp. 208-212, (2012).
- [7] F. Cayrel, O. Ménard, "TiAl ohmic contact on GaN, in-situ high or low doped or Si implanted, epitaxially grown on Sapphire or Silicon". Phys. Status Solidi A. Vol. 209, No. 6, pp. 1059-1066, (2012).
- [8] O. Menard, F. Cayrel, "Process parameters influence on SCR value for TiAl ohmic contacts on GaN grown on sapphire". Materials Science Forum Vol. 615-617 pp. 955-958, (2009).
- [9] A. Schmitz, A. Ping, "Schottky barrier properties of various metals on n-type GaN". Semiconductor Science and Technology, Vol. 11, pp. 1464, (1996).
- [10] O. Menard, N. Thierry-Jebali, "Schottky contact process optimization for gallium nitride (GaN) power rectifiers", 37th International symposium on Compounds semiconductors (ISCS), (2010).
- [11] A.E. Bazin, F. Cayrel, "Si Implantation and Activation in GaN: Comparison of Two Materials: GaN on Sapphire and GaN on Silicon", Materials Science Forum Vol. 711 pp. 213-217, (2012).
- [12] J. S. Ghana, N.W. Cheung, "Thermal annealing characteristics of Si and Mg-implanted GaN thin films", Applied Physics Letters - Vol 68, No.19, (1996).
- [13] D. Zhuang, J. Edgar, "Wet etching of GaN, AlN, and SiC: a review," Materials Science and Engineering R: Reports, Vol. 48, No. 1, pp. 1, (2005).
- [14] Synopsys, "SENTAURUS Device User Guide". Version F-2011.09, (2011).
- [15] H. S. Bennett, C. L. Wilson, "Statistical comparisons of Data on Band-Gap Narrowing in Heavily Doped Silicon: Electrical and optical Measurements", J.Appl.Phys., Vol.55, No. 10, pp. 3582-3587, (1984).
- [16] D. Caughey, R. Thomas, "Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field". IEEE Proceedings, Vol. 55, No. 12, pp. 2192, (1967).
- [17] A. G. Chynoweth, "Ionization rates for electrons and holes in silicon". Phys. Rev, Vol. 109, No. 5, pp. 1537-1540, (1958).
- [18] A. O. Konstantinov, Q. Wahab, "Ionization rates and critical fields in 4H silicon carbide". Applied Physics Letters, Vol.71, pp. 90-92, (1997).
- [19] M.S. Sze, "Physics of Semiconductor Devices". 2nd ed. New-York: Wiley-and sons, pp. 868, (1981).
- [20] H. Matsuura, "Influence of Excited States of Deep Acceptors on Hole Concentration in SiC". International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM), Tsukuba, Japan, pp. 679, (2001).
- [21] M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur, "Properties of advanced semiconductor materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe", John Wiley & Sons Inc, New York, (2001).
- [22] M. Ilegems, H.C. Montgomery, "Electrical properties of n-type vapor-grown gallium nitride", J. Phys. Chem. Solids, Vol. 34, No. 5, pp. 885-895, (1973),
- [23] M.A. Khan, J.N. Kuznia, "Growth of high optical and electrical quality GaN layers using low-pressure metalorganic chemical vapor deposition" Appl. Phys. Lett, Vol.58, pp. 526-528, (1991).
- [24] S. Strite, H. Morkoc "GaN, AlN, and InN". a review J. Vac. Sci. Technol., B, Vol.10 No.4 pp. 1237-1266, (1992)
- [25] S. Nakamura, T. Mukai, "In situ monitoring and hall measurements of GaN grown with GaN buffer layers". J. Appl. Phys., Vol 71 No.11 pp. 5543-5549, (1992).
- [26] J.G. Kim, A.C. Frenkel, H. Liu, R.M. "Park Growth by molecular beam epitaxy and electrical characterization of Si-doped zinc blende GaN films deposited on β -SiC coated (0 0 1) Si substrates "Appl. Phys. Lett., Vol. 65, pp. 91-93, (1994).