



## Optimisation des contacts Métal/Semi-conducteur et caractérisation électrique de matériaux grand gap à base de nitrure de gallium

T. Baghdadli<sup>(1,6)</sup>, S. Ould Saad Hamady<sup>(2)</sup>, S. Gautier<sup>(1)</sup>, J. Martin<sup>(1)</sup>, M. Bouchaour<sup>(1,6)</sup>, N. Maloufi<sup>(3)</sup>, P. Miska<sup>(4)</sup>, B. Benyoucef<sup>(6)</sup>, A. Ougazzaden<sup>(5)</sup>.

(1) Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes – UMR CNRS 7132, Université de Metz et SUPELEC, 2 rue E. Belin 57070 METZ, France.

(2) LMOPS-UMR CNRS 7132, 2 rue E. Belin 57070 Metz, France,  
UMI 2958 Georgia Tech-CNRS.

(3) Laboratoire d'Etude des Textures et Application aux Matériaux, UMR CNRS 7078 Ile du Saulcy 57045 METZ cedex 1, France.

(4) Laboratoire de Physique des Matériaux UMR CNRS 7556 Parc de Saurupt 54042 NANCY Cedex, France.

(5) Georgia Institute of technology / GTL 2-3 rue Marconi 57070 Metz, France.  
UMI 2958 Georgia Tech-CNRS.

(6) Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables (URMER) – Université Abou Bekr Belkaid, BP 119 Tlemcen, Algérie.

E-mail : Tewfik.Baghdadli@metz.supelec.fr

### Résumé

*Nous présentons les résultats de la mise en œuvre d'un procédé de réalisation de contacts ohmiques sur du nitrure de gallium dopé au silicium.*

*Ce procédé comprend (a) la réalisation de dispositifs en lithographie, avec des contacts métalliques multicouches dont le diamètre est de quelques micromètres, et avec des épaisseurs de quelques dizaines de nanomètres, (b) le traitement de surface et (c) le recuit rapide à haute température.*

*Ce procédé nous a permis de concevoir (a) des structures van der Pauw pour les mesures de résistivité, de mobilité et de concentration de porteurs (b) des dispositifs de type TLM pour mesurer les résistivités de contacts, (c) des dispositifs quatre pointes pour mesurer la résistivité de la couche semi-conductrice et (d) des cellules pour étudier les propriétés de transport dans le matériau.*

### 1. Introduction

Les nouveaux matériaux à grand gap III-N connaissent actuellement un formidable essor, du fait de leurs exceptionnelles propriétés électroniques et physiques qui ouvrent un vaste

champ d'applications en optoélectronique. L'un des verrous technologiques à lever est la maîtrise des procédés de fabrication des structures Métal/Semi-conducteur, aussi bien ohmiques que Schottky car contrairement aux matériaux purement covalents que sont les semi-conducteurs de la colonne IV, les composés III-N à large bande interdite sont des matériaux partiellement ioniques ce qui rend les propriétés d'interface entre le métal et le semi-conducteur très particulières. La difficulté est encore plus grande dans le cas d'un matériau nitrure dopé P, du fait notamment du choix très limité de métaux pouvant être utilisés (travail de sortie ~ 7.5 eV). Foresi *et al.* [1] sont les premiers à suggérer que la formation d'un contact ohmique sur du GaN dopé n, devait être possible en sélectionnant directement les métaux dont le travail de sortie est inférieur ou égal à l'affinité électronique de GaN qui est de 4.1 eV [2]. Par conséquent, des métaux ayant un travail de sortie tel que la différence entre ce dernier avec l'affinité électronique du GaN est faible, doivent convenir pour l'obtention de contacts ohmiques sur du GaN de type n. Ainsi l'indium (travail de sortie = 4.12 eV) ferait un bon candidat pour la réalisation de contacts ohmiques.

Outre le travail de sortie du métal, la formation de l'interface métal/semi-conducteur

joue un rôle clé dans la réalisation des contacts. Des processus physiques, comme la formation d'une couche interfaciale très fortement dopée, sont souvent à l'origine de l'ohmicité des contacts [2]. Ces processus physiques dépendent très fortement de l'état de surface et du recuit post-évaporation.

## 2. Expérimental

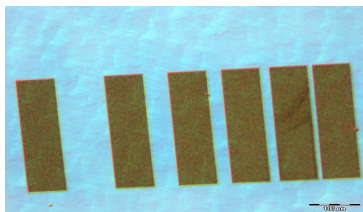
Les couches de GaN étudiées ont des épaisseurs de quelques centaines de nanomètres à quelques micromètres et ont été déposées par épitaxie en phase vapeur aux organométalliques sur substrat saphir. La surface des couches est chimiquement traitée pour éliminer les contaminations et les oxydes natifs. Après le traitement de surface, les contacts métalliques sont évaporés avant d'être recuits.

Les mesures de résistivité par la méthode des quatre pointes et par TLM sont effectuées sous pointes grâce à une station de mesure équipée d'un microscope optique et d'appareils de mesures électriques.

Les mesures Van der Pauw sont effectuées grâce à un banc effet Hall permettant la détermination des paramètres de transport à la température ambiante et à celle de l'azote liquide.

## 3. Résultats

Pour mesurer la résistivité spécifique des contacts, nous avons réalisé par lithographie des motifs TLM (Figure 1) consistant en une rangée de contacts rectangulaires de dimensions variables. La séparation entre deux contacts adjacents varie de 5µm à 100µm.

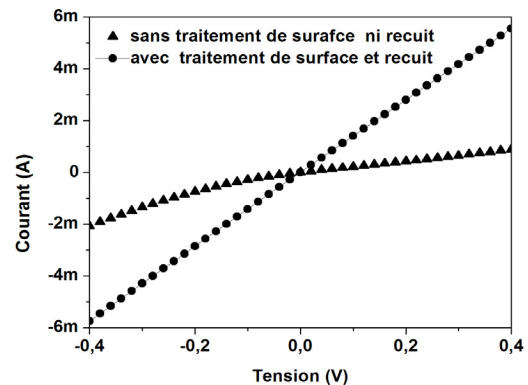


**Figure 1** : Image au microscope optique de contacts Ti/Al en motif TLM réalisés par lithographie sur une couche de GaN dopé silicium.  $\tau$ .

La méthode TLM (Transmission Line Method) est basée sur la mesure de la résistance totale

entre deux contacts ohmiques en fonction de la distance entre ces contacts [3]. Cette résistance dépend de la résistance de la couche semi-conductrice, de la résistance spécifique des contacts de la résistance des fils de connexions. La mesure de cette résistance totale en fonction de la distance permet d'accéder aussi bien à la résistance spécifique des contacts qu'à la résistance de la couche semi-conductrice.

Pour obtenir ces contacts ohmiques nous avons étudié l'influence du traitement de surface avant l'évaporation du métal afin notamment d'éliminer la couche d'oxyde natif à la surface de la couche et préparer celle-ci à l'évaporation des contacts. Nous avons aussi étudié l'effet du recuit après l'évaporation du métal. Ce recuit est nécessaire dans la mesure où il permettrait d'améliorer drastiquement l'interface métal/semi-conducteur [4,5]. Cette amélioration passe dans certains cas par la formation d'une couche conductrice à l'interface métal/semi-conducteur. La figure 2 montre la caractéristique courant-tension d'une jonction Ti/Al sur une couche de GaN dopée silicium, avec et sans traitement et recuit. Avec le traitement de surface et avec le recuit, les contacts deviennent ohmiques et présentent une résistance spécifique de contact de  $10^{-3}$  à  $10^{-4} \Omega.cm^2$ , suivant les conditions de réalisation.



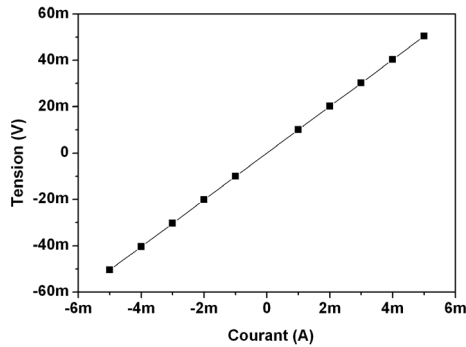
**Figure 2** : Caractéristique courant-tension entre deux contacts Ti/Al déposés sur une couche de GaN dopée silicium, avec et sans traitement et recuit.

Après l'optimisation de la réalisation des contacts ohmiques, les mesures de résistivité des couches ont été effectuées par la méthode des quatre pointes. Il s'agit dans cette méthode de réaliser quatre contacts ohmiques séparés d'une même distance, grande devant la dimension des

contacts. On injecte un courant électrique entre les deux pointes externes et la mesure de la différence de potentiel entre les deux pointes internes permet de remonter à la résistivité de la couche.

La figure 3 montre la caractéristique tension-courant entre deux contacts sur une couche de GaN dopée N, où l'on observe une excellente ohmicité, condition préalable aux méthodes des quatre pointes, de Van der Pauw et TLM. Pour cette couche la valeur de la résistivité mesurée par ces différentes techniques est de  $1.5 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ .

Les autres paramètres de transport, la mobilité et concentration des porteurs libres, sont mesurés par effet Hall dans la configuration de Van der Pauw.



**Figure 3 :** Mesure tension-courant sous la configuration Van der Pauw d'une couche de GaN dopée N.

Le tableau 1 montre un exemple de paramètres de transport dans le cas d'une couche de GaN dopée au silicium, à 80K et 300K.

La concentration des porteurs libres est pratiquement constante avec la température dans la gamme de températures considérée. Ceci est principalement dû au fait que le silicium est un dopant peu profond dans le GaN et quasiment tous les dopants sont ionisés dans cette gamme de températures. La variation de la résistivité est par conséquent uniquement liée à celle de la mobilité, qui augmente avec la température. Ce comportement indique que cette mobilité résulte principalement de l'interaction élastique de porteurs libres avec les impuretés ionisées [6].

Température (K)	Résistivité ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	Mobilité ( $\text{cm}^2/\text{V s}$ )	Concentration de porteurs ( $\text{cm}^{-3}$ )
80	$3,2 \cdot 10^{-2}$	162	$1,19 \cdot 10^{18}$
300	$1,5 \cdot 10^{-2}$	336	$1,2 \cdot 10^{18}$

**Tableau 1.** Paramètres de transport de GaN dopé Si mesurés par la méthode Van der Pauw / Hall.

#### 4. Conclusion

L'optimisation de contacts ohmiques sur GaN dopé N a permis la réalisation de dispositifs métal/semi-conducteur pour les caractérisations électriques. L'excellente ohmicité de ces dispositifs, caractérisée par la méthode TLM, a été obtenue grâce des étapes de traitement de surface avant l'évaporation des métaux, et un recuit après l'évaporation. Nous avons ainsi pu déterminer la résistivité des contacts et de la couche, le type de porteurs libres, leur concentration et leur mobilité grâce aux méthodes TLM, quatre pointes et Van der Pauw/Hall. Dans le cas du GaN dopé au silicium, une augmentation de la mobilité avec la température, accompagnée d'une diminution de la résistivité, a été mise en évidence et s'explique par le type d'interaction des porteurs libres avec les impuretés ionisées dans la gamme de température considérée.

#### Références

- [1] J. S. Foresi and T.D. Moustakas, *Appl Phys. Lett.* 62 (22), 2859 (1993).
- [2] J. I. Pankove and H.E.P. Shade, *Appl.Phys.Lett.* 25, 53 (1974).
- [3] G. K. Reeves and H. B. Harrison, *IEEE Electron Device Letter, EDL-3(5)*, (1982).
- [4] J. K. Kim, J. -L. Lee, J. W. Lee, H. E. Shin, Y. J. Park and T. Kim., *Appl. Phys. Lett.* 53 (20): 2953-2955, (1988).
- [5] Z. Z. Chen, Z. X. Qin, C. Y. Hu, T. J. Yu, Y. Z. Tong, X. M. Ding, G. Y. Zhang. *Materials Science and Engineering B111* (2004) 36-39.
- [6] G. E. Stillman, C. M. Wolfe, *Thin solid Films*, 31 (1976), 69-88.