



HAL
open science

Nouveaux contacts électriques sur SiC-4H de type p à base de carbure Ti₃SiC₂

Tony Abi Tannous

► **To cite this version:**

Tony Abi Tannous. Nouveaux contacts électriques sur SiC-4H de type p à base de carbure Ti₃SiC₂. JCGE, Jun 2014, Saint-Louis, France. hal-01083917

HAL Id: hal-01083917

<https://hal.science/hal-01083917>

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.

Nouveaux contacts électriques sur SiC-4H de type p à base de carbure Ti_3SiC_2

Tony ABI-TANNOUS

Université de Lyon, CNRS, Laboratoire Ampère, INSA-Lyon, UMR 5005, F-69621, France
tony.abi-tannous@insa-lyon.fr

RESUME – Dans le but d'améliorer les contacts électriques sur 4H-SiC de type p, nous explorons la possibilité d'utiliser des phases MAX comme le Ti_3SiC_2 , car son travail de sortie a été déterminé comme étant de $5,07 \pm 0,1$ eV. Cette valeur n'est pas trop loin de celle du SiC type p (~ 7 eV), ce qui permet de réduire la hauteur de barrière. Dans le but d'élaborer le Ti_3SiC_2 sur SiC, un film mince de 200 nm d'un alliage Ti_xAl_{1-x} a été déposé sur SiC-4H (0001) 8° off pleine plaque. Dans cette étude, on a fait varier la concentration du Ti et d'Al dans le dépôt en allant de ($Ti_{20}Al_{80}$ à $Ti_{50}Al_{50}$), et on a aussi varié la température de recuit de 900°C à 1200°C pour chaque type de concentration. Des analyses structurales comme le DRX et MET ont été effectuées sur tous les échantillons qui ont subi un recuit. On remarque que la formation d'une couche de Ti_3SiC_2 pure a été obtenue pour une température de recuit de 1000°C. De plus, on a déterminé que la couche a subi une croissance épitaxiale par rapport au substrat. Ensuite des structures TLM (Transfer Length Method) ont été fabriquées sur des couches épitaxiales de SiC-4H de type P avec des concentrations de l'ordre de 2×10^{19} at/cm³, afin d'évaluer la résistance spécifique de contacts.

ABSTRACT – In order to improve the electrical contacts on 4H- SiC p-type, we explore the possibility of using MAX phases such as Ti_3SiC_2 , because its work function was determined to be 5.07 ± 0.1 eV. This value is not too far from that of p-type SiC (~ 7 eV) giving a reduced schottky barrier. In order to develop the Ti_3SiC_2 on SiC, a 200 nm thin film of Ti_xAl_{1-x} alloy was deposited on 4H SiC (0001) 8° off. In this study, we varied the concentration of Ti and Al from ($Ti_{20}Al_{80}$ to $Ti_{50}Al_{50}$), and we varied the annealing temperature from 900°C to 1200°C for each type of concentration. XRD and TEM analyzes were performed on the contacts to determine the microstructure of the annealed layers and to further investigate the compounds formed after annealing. Pure Ti_3SiC_2 was obtained after annealing at 1000°C. Furthermore, it is deduced that the layer has been epitaxially grown over the substrate. Finally, the specific contact resistance was measured using TLM (Length Transfer Method) structure fabricated on 4H-SiC wafers with P-type epitaxial layers with doping concentration of 2×10^{19} at/cm³.

MOTS-CLES – SiC-4H, contact ohmique, Alliage Ti-Al, Ti_3SiC_2 , TLM.

1. Introduction

Le carbure de silicium (SiC) est un matériau semi-conducteur à large bande d'énergie interdite. Le SiC a reçu une attention particulière car il permet de répondre aux nouvelles exigences de l'électronique de puissance, à savoir un fonctionnement à haute température, à forte puissance et à haute fréquence, alors que les semi-conducteurs traditionnels ont quasiment atteint leurs limites de performance. Les technologies SiC sont donc appelées à jouer un rôle majeur au cours des années à venir. Pour atteindre ce but, il est devenu nécessaire de maîtriser toutes les étapes technologiques pour la fabrication des composants. Dans ce papier, nous développons une étape cruciale pour la fabrication des composants SiC basée sur la maîtrise du contact ohmique de type-P.

La fabrication de contact ohmique stable, fiable et ayant une faible résistivité est essentielle. En effet, le titane et l'Al sont les métaux utilisés pour la fabrication des contacts ohmiques sur le SiC de type N et P. De plus, le titane est utilisé pour la fabrication des diodes Schottky haute tension sur SiC dopé N et P [1-4]. D'une manière générale, une faible résistance spécifique de contact peut généralement être obtenue sur SiC-4H de type N (10^{-4} à 10^{-6} $\Omega.cm^2$) et aussi sur SiC-4H de type P (10^{-3} à 10^{-5} $\Omega.cm^2$) [5-7].

Dans la littérature, on relève de nombreuses difficultés dans la réalisation de contacts ohmiques sur le SiC de type P. L'origine de ces problèmes est attribuée à son large travail de sortie (> 6 eV) [7] et à la difficulté de trouver un métal ayant un travail de sortie pouvant correspondre à celui du SiC [8]. Les publications reportent principalement sur la réalisation de contacts ohmiques formés à partir d'alliages à base de Ti-Al recuit à haute température [9-11]. Les raisons pour lesquelles les contacts deviennent ohmiques après recuit n'ont pas été complètement élucidées et plusieurs explications ont été proposées. S. Tsukimoto et al, Z. Wang et al expliquent que ce comportement ohmique résulte de la formation de carbure Ti_3SiC_2 à l'interface métal / SiC après recuit [12]. Le Ti_3SiC_2 présente des propriétés très intéressantes comme une bonne conductivité électrique et thermique avec une bonne résistance à l'oxydation et au choc

thermique [13]. Dans le futur, ce carbure pourrait servir comme contact électrique pour les applications haute température (entre 300°C et 600°C) car il est stable en fonction de la température (~1100°C).

Dans cet article, nous présentons l'étude du contact ohmique (Ti_xAl_{1-x}) sur SiC-4H de type P. Les effets de la composition de l'alliage et de la température du recuit sur la stabilisation du Ti_3SiC_2 ont été étudiés. Des caractérisations courant-tension confirment l'ohmicité de notre dépôt. Des analyses DRX et TEM ont été réalisées pour connaître la composition de la couche interfaciale.

2. Les Phases MAX

Les phases MAX tiennent leur nom de leur composition chimique : $M_{n+1}AX_n$ où M est un métal de transition, A un élément du groupe A et X soit un atome C, soit un atome N, soit les deux. L'indice n varie de 1 à 3 et les structures M_2AX , M_3AX_2 et M_4AX_3 correspondantes sont nommées respectivement 211, 312 et 413 [14].

Ces matériaux ont la particularité de conjuguer certaines propriétés des métaux aux propriétés caractéristiques des céramiques. Ainsi, elles sont rigides tout en présentant une faible dureté et en étant étonnamment tolérantes aux dommages, réfractaires et résistantes aux chocs thermiques, conductrices de la chaleur et de l'électricité et usinables avec les outils traditionnels pour les aciers (scies, perceuses, etc.) sans apport de lubrifiant.

Parmi ces phases MAX, on trouve le composé ternaire Ti_3SiC_2 très étudié pour des applications composites de hautes performances. C'est le matériau que nous avons sélectionné pour cette étude car il a des propriétés électriques très intéressantes comme sa bonne conductivité électrique, une énergie de sortie proche de celle nécessaire pour le SiC type P et son coefficient d'extension thermique proche de celui du SiC.

3. Dispositif expérimental

Les échantillons utilisés pour cette étude sont des substrats SiC-4H (0001) désorientés de 8°. Avant métallisation, les échantillons subissent un nettoyage chimique afin d'éliminer toute pollution de la surface. Ce nettoyage comprend :

- un dégraissage aux ultrasons dans un bain d'acétone pendant 5 minutes,
- un dégraissage aux ultrasons dans l'éthanol pendant 5 minutes,
- un nettoyage dans un bain acide $H_2SO_4 : H_2O_2$ (75 :25) pendant 10 minutes pour éliminer toute particule métallique à la surface de l'échantillon,
- un nettoyage dans de l'acide HF dilué à 5% pendant 4 min pour éliminer la formation d'oxyde, suivi d'un rinçage à l'eau déionisée.

Après nettoyage, les échantillons sont placés directement dans le bâti de pulvérisation cathodique pour éviter une éventuelle oxydation de la surface. Trois types de concentration de Ti-Al sur SiC-4H pleine plaque ont été réalisés par pulvérisation cathodique pour cette étude : $Ti_{20}Al_{80}$ à partir d'une cible frittée $Ti_{20}Al_{80}$; $Ti_{30}Al_{70}$ à partir d'une cible frittée $Ti_{30}Al_{70}$ et $Ti_{50}Al_{50}$ à partir d'une cible frittée $Ti_{50}Al_{50}$. L'épaisseur des dépôts est fixée à 200nm. Les échantillons ont, ensuite, été recuits dans un four de type RTA (Rapid Thermal Annealing) sous flux d'argon. Le recuit a été effectué au laboratoire Multimatériaux et Interface à l'Université Claude Bernard Lyon 1. On a fixé la rampe de montée en température à 20°C/s et la durée de recuit à 10 min et on a varié la température de recuit entre 900°C et 1200°C (voir **tableau 1**). A savoir que la température du recuit est mesurée par un pyromètre.

Tableau 1. Les conditions de recuit et la composition des dépôts des différents échantillons.

| Echantillon | Dépôt | Température / durée de recuit |
|-------------|------------------|-------------------------------|
| A1 | $Ti_{20}Al_{80}$ | 1000°C / 10 min |
| A2 | $Ti_{20}Al_{80}$ | 1100°C / 10 min |
| A3 | $Ti_{20}Al_{80}$ | 1200°C / 10 min |
| B1 | $Ti_{50}Al_{50}$ | 1000°C / 10 min |
| B2 | $Ti_{50}Al_{50}$ | 1100°C / 10 min |
| B3 | $Ti_{50}Al_{50}$ | 1200°C / 10 min |
| B1 | $Ti_{50}Al_{50}$ | 1000°C / 10 min |
| B2 | $Ti_{50}Al_{50}$ | 1100°C / 10 min |
| B3 | $Ti_{50}Al_{50}$ | 1200°C / 10 min |

Après recuit, des analyses de diffraction de Rayon X ont été effectuées systématiquement sur tous les échantillons. Ces analyses ont été effectuées en collaboration avec le laboratoire INL à l'école centrale de Lyon. De plus, on a eu recours

à d'autres analyses structurales comme la microscopie Electronique à Transmission sur des échantillons judicieusement choisis. Ces analyses ont été faites au laboratoire Pprim à Poitiers.

Pour évaluer la qualité électrique de nos couches, des structures TLM (Transfer Length Method) ont été effectuées sur des couches épitaxiales de SiC-4H (0001) type P+ (ordre de 2×10^{19} at/cm³). Ces structures ont été fabriquées dans la salle blanche universitaire de l'INL à l'école centrale de Lyon.

4. Résultats et discussion

4.1 Analyse Structurale

La figure 1 représente les diffractogrammes des rayons X (θ - 2θ) du dépôt $Ti_{20}Al_{80}$ après recuit à différentes températures. Le recuit à 1000°C conduit à la formation de Ti_3SiC_2 épitaxial par rapport au substrat. A 900°C, on remarque qu'on a formé de Ti_3SiC_2 épitaxial mais avec d'autres phases comme (Al, Al_3Ti , Ti_2AlC). A plus haute température, 1100°C et 1200°C, Ti_3SiC_2 disparaît totalement pour être remplacé par une phase unique TiC, elle-même épitaxiale.

Pour le dépôt $Ti_{30}Al_{70}$ (figure 2), on remarque qu'on n'a pas formé de Ti_3SiC_2 à 900°C, mais cette phase a été également formée à 1000°C et également remplacée par TiC à plus haute température (1100°C et 1200°C).

Concernant le dépôt $Ti_{50}Al_{50}$ les tendances observées sont assez similaires à 1000°C et 1200°C excepté le fait que la phase Ti_3SiC_2 a été obtenue avec du TiC à 1100°C (figure 3).

Par ailleurs, l'obtention de TiC à 1100°C et 1200°C peut s'expliquer par la perte de l'élément silicium de la phase Ti_3SiC_2 initialement présente, en raison de la plus haute température de recuit. De ce fait, ceci explique aussi le caractère épitaxial du Ti_3SiC_2 initial soit conservé par le TiC. Il peut être noté que l'obtention de la phase TiC pure et épitaxiale est en soi un résultat très intéressant car ce composé pourrait être un bon candidat alternatif pour le contact ohmique sur SiC de type p [15,16].

Afin d'obtenir des informations sur la qualité cristalline de la couche Ti_3SiC_2 sur SiC, des mesures Microscopie Electronique en Transmission ont été réalisées sur le film $Ti_{20}Al_{80}$ déposé sur SiC et recuit à 1000°C durant 10 min. La figure 4(a) montre un grossissement de l'image d'une région caractéristique de la couche obtenue sur SiC-4H. Cette vue montre en général que le substrat 4H-SiC est entièrement recouvert par une couche de Ti_3SiC_2 . La croissance d'une seule phase cristalline de Ti_3SiC_2 à l'interface est mise en évidence par la technique SEAD (Selected Area Electron Diffraction), cette technique est basée sur la diffraction électronique de la zone (A) sélectionnée (Figure 4(b)), aucun autre composé n'a été détecté en accord avec les résultats de DRX. Du HRTEM (Microscopie Electronique en Transmission à Haute Résolution) a été réalisé sur la région (B) (Figure 4(c)), on remarque que le Ti_3SiC_2 est bien épitaxial sur 4H-SiC.

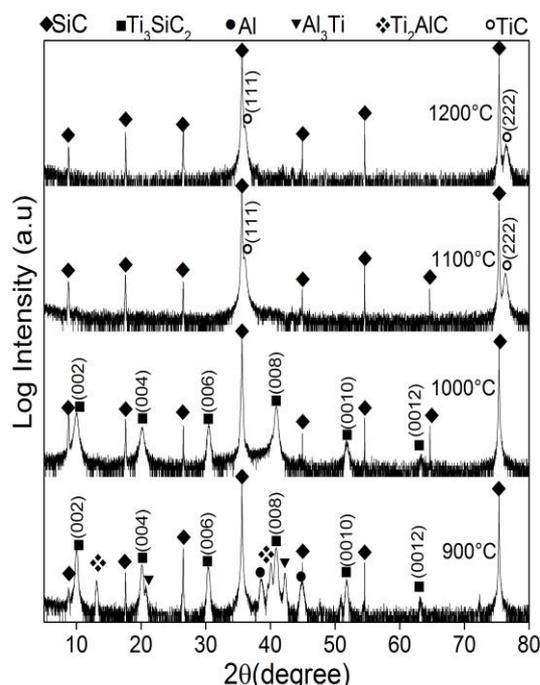


Figure 1 : Diffractogrammes des rayons X du dépôt $Ti_{20}Al_{80}$ recuit 10 minutes à 900°C, 1000°C, 1100°C et 1200°C

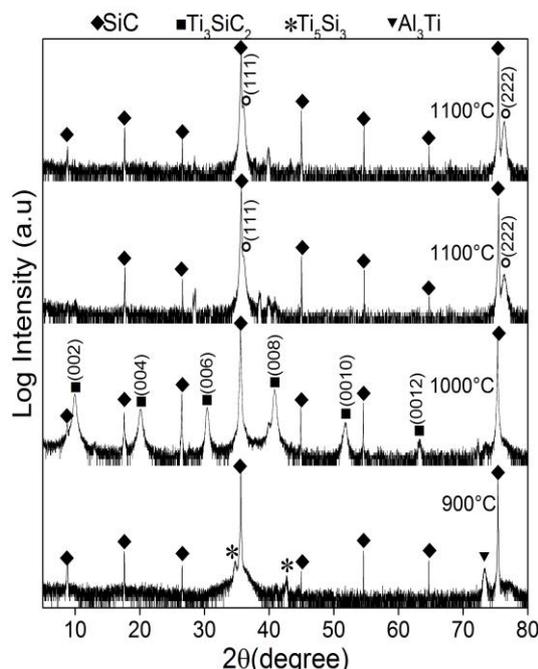


Figure 2 : Diffractogrammes des rayons X du dépôt $Ti_{30}Al_{70}$ recuit 10 minutes à 900°C, 1000°C, 1100°C et 1200°C

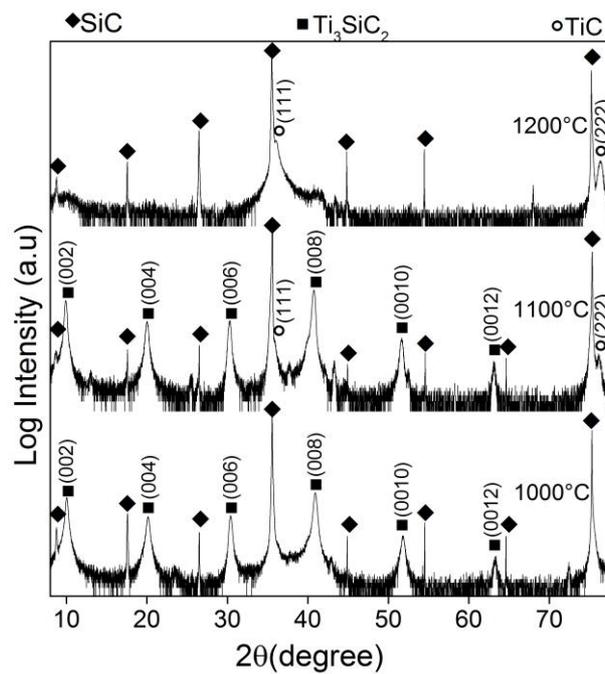


Figure 3 : Diffractogrammes des rayons X du dépôt $\text{Ti}_{50}\text{Al}_{50}$ recuit 10 minutes à (a) 1000°C, (b) 1100°C, et (c) 1200

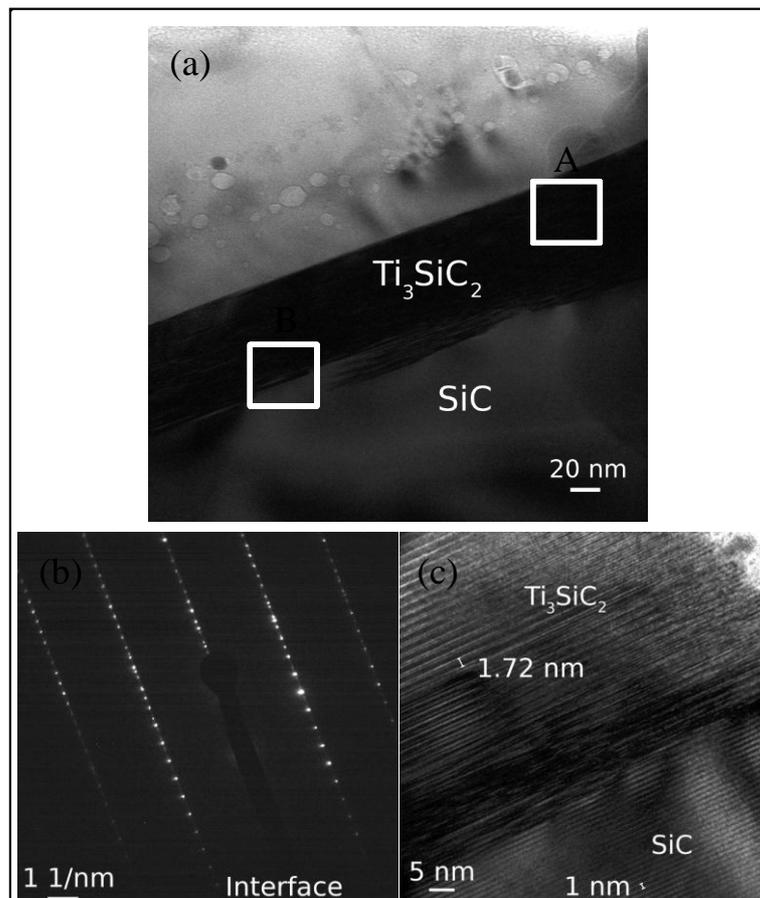


Figure 4 : (a) Image TEM montrant l'interface entre Ti_3SiC_2 et 4H-SiC (0001) après recuit à 1000°C/10'.
(b) Diffraction électronique de la zone (A) sélectionnée, cette diffraction correspond à la phase Ti_3SiC_2 .
(c) HRTEM réalisée sur la région (B).

4.2 Caractérisation électrique

Afin d'évaluer les résistances spécifiques de contact, des structures TLM (Transfer Length Method) linéaires ont été fabriquées avec un espace entre les plots qui varie entre 25 et 75 μm . Ces motifs géométriques ont été obtenus par une étape de photolithographie. Les couches SiC de type P+ ont été isolées latéralement par des mesas gravés et la conduction bidimensionnelle est rendue négligeable en utilisant des plots très larges. Les couches de type p sont également isolées verticalement par la jonction p-n. La solution d'attaque de l'aluminium (Al-etch) à 60° C a été utilisée pour la gravure des plots métalliques.

Les caractéristiques I-V sont tracées en fonction des distances entre les plots (25 à 75 μm) pour une couche de 200 nm de $\text{Ti}_{20}\text{Al}_{80}$ recuit à 1000°C pendant 10 min (voir la figure 5). Comme on le voit, et pour toutes les distances entre les plots, les courbes I-V sont parfaitement linéaires montrant le caractère ohmique du contact à base de Ti_3SiC_2 pour 4H-SiC de type p. On constate de plus que la pente diminue lorsque la distance entre deux contacts augmente.

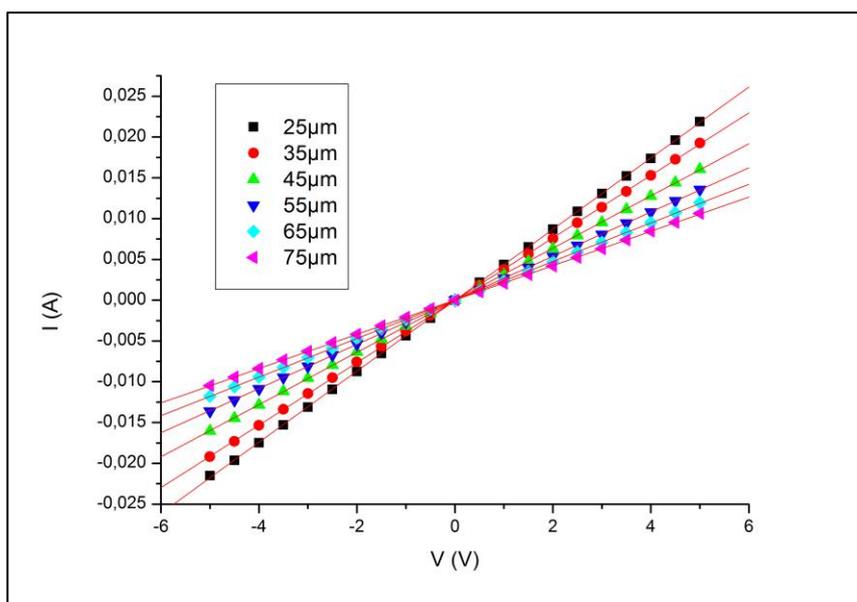


Figure 5 : Caractéristiques électriques I-V pour différentes distances entre les plots de contact.

Les résistances totales, déduites à partir des courbes de la figure 4, sont tracées en fonction de la distance entre les plots métalliques (voir figure 6), ces résistances totales sont de l'ordre de quelques centaines d'ohms. Dans la configuration utilisée, la courbe donnant la résistance totale en fonction de la distance entre les plots métalliques est linéaire.

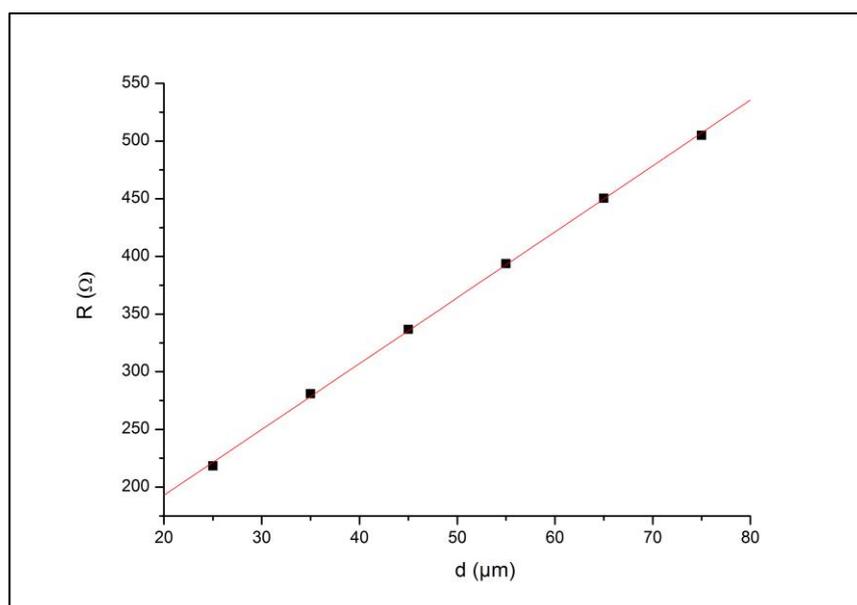


Figure 6 : Résistance en fonction de la distance entre les plots pour un recuit de $\text{Ti}_{20}\text{Al}_{80}$ à 1000°C pendant 10 minutes.

D'après la figure 5, on peut en déduire que la résistance spécifique de contact est de l'ordre de $1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$. Cette valeur est légèrement supérieure à celle rapportée dans la littérature [17-28]. Cette résistance de contact peut être due au

fait que les espacements entre les plots métalliques du motif TLM sont assez étroits. Dans le but d'obtenir une valeur plus précise de la résistance de contact, des nouveaux motifs TLM vont être fabriqués. Dans ces motifs l'espacement entre les plots varie entre 5 et 120 μm .

Conclusion

Nous avons réalisé la synthèse du Ti_3SiC_2 épitaxié sur 4H-SiC (0001) 8°off à partir d'un dépôt à base de Ti et Al, préparé par pulvérisation cathodique et recuit dans un four RTA (four à lampes halogènes). La croissance du Ti_3SiC_2 a été étudiée en faisant varier plusieurs paramètres, en particulier la concentration du Ti et d'Al et la température de recuit. En augmentant la température, il est possible de transformer Ti_3SiC_2 en TiC tout en conservant le caractère épitaxial du matériau. Pour caractériser électriquement les couches Ti_3SiC_2 obtenues sur SiC, des motifs TLM préliminaires ont été réalisés sur des substrats avancés (4H-SiC type p). D'après ces mesures TLM on a trouvé une résistance spécifique de contact de l'ordre $10^{-3} \Omega\cdot\text{cm}^2$. Les caractérisations structurales (TEM et DRX) de la phase Ti_3SiC_2 ont montré que, après un recuit à haute température, une mince couche monocristalline de Ti_3SiC_2 se forme sur le substrat SiC.

Références

- [1] D. Defives, O. Noblanc, c. Dua, C. Brylinski, M. Barthula, and F. Mayer, "Electrical characterization of inhomogeneous Ti:4H-SiC Schottky" contacts mater. Sci. Eng. B 61-62, (1999), 395-401.
- [2] A. Itoh, T. Kimoto, and H. Matsunami, "Excellent reverse blocking characteristics of high-voltage 4H-SiC Schottky rectifiers with boron-implanted edge termination" IEEE Electron Device Lett. 17, (1996), 139-141.
- [3] K. Vassilevski, A. Horsfall, C-M. Johnson, N. Wright and a. O'Neil, "4H-SiC rectifiers with dual metal planar Schottky contacts" IEEE Trans. Electron Devices, 49, (2002), 947-949.
- [4] R. Raghunathan and B-J. Baliga, "P-type 4H and 6H-SiC high-voltage Schottky barrier diodes" IEEE Electron Device Lett. 19, (1998), 71-73.
- [5] L.M. Porter, R.F. Davis, "A critical review of ohmic and rectifying contacts for silicon carbide" Mater. Sci. Eng. B34 (1995) 83-105.
- [6] J. Crofton, L. Beyer, J.R. Williams, E.D. Luckowski, S.E. Mohny, J.M. Delucca, "Titanium and aluminum-titanium ohmic contacts to p-type SiC" Solid State Electron. 41 (1997) 1725-1729.
- [7] F. La via, F. Roccaforte, A. Makhtari, V. Raineri, P. Musumeci and L. Calcagno, "Structural and electrical characterisation of titanium and nickel silicide contacts on silicon carbide" Microelectronic Engineering 60, (2002), 269-282.
- [8] Roccaforte Fabrizio, LA VIA Francesco, Raineri Vito, "Ohmic contacts to SiC" International journal of high speed electronics and systems, 2005, vol. 15, no4, pp. 781-820
- [9] F. A. Mohammad, Y. Cao, K.-C. Chang, and L. M. Porter, "Comparison of Pt-Based Ohmic Contacts with Ti-Al Ohmic Contacts for p-Type SiC" Jpn. J. Appl.Phys. 44, 5933 (2005).
- [10] R. Konishi, R. Yasukochi, O. Nakatsuka, Y. Koide, M. Moriyama, and M. Murakami, "Development of Ni/Al and Ni/Ti/Al ohmic contact materials for p-type 4H-SiC" Mater. Sci. Eng., B 98, 286 (2003).
- [11] S. Tsukimoto, K. Nitta, T. Sakai, M. Moriyama, and M. Murakami, "Correlation between the electrical properties and the interfacial microstructures of TiAl-based ohmic contacts to p-type 4H-SiC" J. Electron. Mater. 33, 460 (2004).
- [12] Z. Wang, S. Tsukimoto, M. Saito, K. Ito, M. Murakami, and Y. Ikuhara, "Ohmic contacts on silicon carbide: The first monolayer and its electronic effect" Phys. Rev. B 80, 245303 (2009).
- [13] P. Eklund, M. Beckers, U. Jansson, H. Högberg, and L. Hultman, "The $\text{Mn}_{+1}\text{AX}_n$ phases: Materials science and thin-film processing" Thin Solid Films 518, 1851 (2010).
- [14] M.W. Barsoum. "The $\text{M}(n+1)\text{AX}(n)$ phases: A new class of solids; Thermodynamically stable nanolaminates. " Prog. Solid State Chem., 28 (2000) 201-281.
- [15] S.-K. Lee, C.-M. Zetterling, M. Ostling, J.-P. Palmquist, U. Jansson, "low resistivity ohmic contacts on 4H-silicon carbide for high power and high temperature device applications", Microelectronic Engineering 60 (2002) 261-268.
- [16] Mingsheng Xu, Xiaobo Hu, Yan Peng, Kun Yang, Wei Xia, Guojian Yu, Xiangang Xu, "Fabrication of ohmic contact on the carbon-terminated surface of n-type silicon carbide", Journal of Alloys and Compounds 550 (2013) 46-49.

- [17] K. Buchholt, R. Ghandi, M. Domeij, C.-M. Zetterling, J. Lu, P. Eklund, L. Hultman and A. Lloyd Spetz, “Ohmic contact properties of magnetron sputtered Ti₃SiC₂ on *n*- and *p*-type 4H-silicon carbide” Applied Physics Letters, 98, 042108 (2011).
- [18] H. Vang, M. Lazar, P. Brosselard, C. Raynaud, P. Cremillieu, J.-L. Leclercq, J.-M. Bluet, S.Scharnholz, D. Planson, “Ni–Al ohmic contact to *p*-type 4H-SiC”, Superlattices and microstructures, 40 (2006) 626-631.
- [19] F. Laariedh, M. Lazar, P. Cremillieu, J.-L. Leclercq and D. Planson, “Investigations on Ni-Ti-Al Ohmic Contacts Obtained on P-Type 4H-SiC” Materials Science Forum, (Volume 711) 169 (2012).
- [20] R. Konishi, R. Yasukochi, O. Nakatsuka, Y. Koide, M. Moriyama, M. Murakami, Materials , “Development of Ni/Al and Ni/Ti/Al ohmic contact materials for *p*-type 4H-SiC”, Science and Engineering B98 (2003) 286-293.
- [21] S.K. Lee, C. M. Zetterling, M. Ostling, J. P. Palmquist, and U. Jansson, “Low resistivity ohmic contacts on 4H-silicon carbide for high power and high temperature device applications”, Microelectronic Engineering, vol.60, pp. 261-268, 2002.
- [22] K.V. Vassilevski, G. Constantinidis, N. Papanicolaou, N. Martin, K. Zekentes, “Study of annealing conditions on the formation of ohmic contacts on *p*+ 4H–SiC layers grown by CVD and LPE”, Materials Science and engineering B61-62 (1999) 296-300.
- [23] B. Pécz, L. Tòth, M.A. di Forte-Poisson, J. Vacas, “Ti₃SiC₂ formed in annealed Al/Ti contacts to *p*-type SiC”, Applied Surface Science, 206 (2003) 8-11.
- [24] L. Kassamakova, R. Kakanakov, N. Nordell, S. Savage, A.Kakanakova-Georgieva, and Ts Marinova, “Study of the electrical, thermal and chemical properties of Pd ohmic contacts to *p*-type 4H-SiC: dependence on annealing conditions”, Materials Science And Engineering: B, 61-62: 291–295, 1999.
- [25] S. Tsukimoto, T.sakai and M. Murakami, “Electrical properties and microstructure of ternary Ge/Ti/Al ohmic contacts to *p*-type 4H–SiC”, Journal of Applied Physics, vol.96 N°9 (2004).
- [26] S.Y. Han, K.H Kim, J. K. Kim, H. W. Jang, K. H. Lee, N.-K. Kim, E.D. Kim and J.-L. Lee, “Ohmic contact formation mechanism of Ni on *n*-type 4H–SiC”, Applied Physics Letters, 79(12): 1816-1818 (2001).
- [27] Shu-Cheng Chang, Shui-Jinn Wang, Kai-Ming Uang, and Bor-Wen Liou, “Investigation of Au/Ti/Al ohmic contact to *N*-type 4H-SiC”. Solid-State Electronics, 49(12):1937–1941, 2005.
- [28] Y.Gao, Y. Tang, M. Hoshi, and T.P. Chow, “Improved ohmic contact on *n*-type 4H-SiC”, Solid-State Electronics, 44(10):1875–1878, 2000.