



HAL
open science

Gravure RIE profonde du SiC pour la réalisation de composants de puissance

Heu Vang, T. Morel, F. Chaboud, Pierre Brosselard, Pierre Cremillieu, Jean-Louis Leclercq, Mihai Lazar, Dominique Planson, Sigo Scharnholz

► **To cite this version:**

Heu Vang, T. Morel, F. Chaboud, Pierre Brosselard, Pierre Cremillieu, et al.. Gravure RIE profonde du SiC pour la réalisation de composants de puissance. 3eme colloque sur les Matériaux du Génie Electrique, Dec 2005, Lyon, France. hal-04620248

HAL Id: hal-04620248

<https://hal.science/hal-04620248>

Submitted on 21 Jun 2024

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.

Gravure RIE profonde du SiC pour la réalisation de composants de puissance

H. Vang^{1,3}, T. Morel¹, F. Chaboud¹, P. Brosselard^{1,3}, P. Cremillieu², J.-L. Leclercq², M. Lazar¹, D. Planson¹, S. Scharnholz³

¹ Centre de Génie Electrique de Lyon
UMR 5005 / INSA de Lyon
Bât. L. VINCI, 20 avenue A. Einstein
69621 Villeurbanne Cedex
e-mail : heu.vang@insa-lyon.fr

² Laboratoire d'Electronique Optoélectronique et Microsystèmes
UMR 5512 / EC de Lyon
Bât F7, 36, Avenue Guy de Collongue
69134 Ecully Cedex

³ Institut Franco-allemand de Recherches de Saint-Louis
BP70034
68301 Saint-Louis Cedex

RESUME. Le carbure de silicium est un semi-conducteur qui possède des propriétés remarquables pour la réalisation de composants de puissance. La protection périphérique mesa nécessite une gravure profonde du SiC. Un procédé de gravure plasma SF₆/O₂ dans un bâti RIE est mis en place et permet d'obtenir des profondeurs supérieures à 10 µm avec une cinétique de gravure de 0.35 µm/min.

ABSTRACT. The silicon carbide is a semiconductor with very interesting physic properties for the realisation of power devices. The junction termination edge mesa requires a deep etching of the SiC. A process of SF₆/O₂ plasma etching in a RIE reactor is adjusted to obtain deeper than 10µm trenches with an etch rate of 0.35µm/min.

MOTS-CLES : Carbure de silicium, mesa, gravure, Reactive Ion Etching

KEYWORDS: Silicon Carbide, mesa, etching, Reactive Ion Etching

1. Introduction

Le carbure de silicium (SiC) présente des propriétés physiques remarquables (par rapport au silicium) pour les composants de puissance : un champ critique 7 fois plus important, une bande d'énergie interdite et une conductivité thermique multipliées par 3. L'utilisation du SiC permet de réduire la taille et le nombre de composants et le fonctionnement à haute température.

La gravure plasma est une étape technologique nécessaire et critique pour la définition de la structure des composants à base de SiC : protection périphérique mesa, prise de contact sur une couche enterrée, rafraîchissement de surface ... Dans notre cas, on s'intéresse à la gravure du SiC pour la mise en place de la protection mesa. Pour une diode 4H-SiC P⁺N⁻N⁺ avec une couche de drift de 10µm dopé à 8,9.10¹⁴ cm⁻³, il faudrait une gravure de 10µm pour pouvoir atteindre une tension de claquage de 99% de la tenue en tension dans le volume. Dans la figure 1 est présentée une estimation de la tenue en tension de cette diode bipolaire en fonction de la profondeur de gravure. Cette estimation a été obtenue par simulation à éléments finis en utilisant le programme MEDICITM.

L'inertie chimique du SiC empêche sa gravure par voie humide ce qui impose l'utilisation de gravure sèche de type plasma avec des bâteaux RIE Reactive Ion Etching) [1], ECR (Electron Cyclotron Resonance) [2] ou encore ICP (Inductively Coupled Plasma) [3]. L'utilisation d'un réacteur plasma haute densité comme l'ECR ou l'ICP permet des cinétiques de gravures importantes (>1µm/min [4]). L'autre avantage est également une polarisation de la cathode moins importante ce qui engendrerait moins de dégradation des propriétés électriques de la surface gravée [5].

Généralement, le plasma utilisé est à base de gaz fluorés (SF₆, CF₄, CHF₃ ou NF₃) mélangés avec de l'oxygène ou de l'argon. Pour améliorer la tenue en tension des composants SiC à réalisés, le caractère fortement anisotrope de la gravure

est recherché pour obtenir des flancs de gravure profonds ($10\mu\text{m}$ de profondeur visée) et verticaux. Ceci est obtenu en utilisant les techniques de gravures classiques (RIE) en optimisant la sélectivité par l'utilisation de masques métalliques ou en exploitant les plasmas de plus fortes densités (type ICP).

Dans ce papier nous présentons les résultats obtenus dans un bâti RIE dont la configuration a été optimisée pour augmenter la vitesse de gravure du SiC en la rendant compatible pour la fabrication de composants de puissance. Le SiC est un matériau dur par définition, cela implique d'abord la recherche d'un masque de gravure très sélectif pouvant résister au plasma et ainsi permettre une gravure profonde. Ensuite l'étude portera sur l'optimisation de la configuration du réacteur pour obtenir une gravure propre et plane.



Figure 1. Simulation 2D sur MEDICI d'une diode mesa $P^+N^-N^+$ avec une couche de drift dopée à $8,9.10^{14} \text{ cm}^{-3}$ de $10\mu\text{m}$.

2. Expérimentation

L'étude de la gravure s'est portée sur des échantillons SiC-4H et 6H de taille $8\text{mm}\times 8\text{mm}$ commercialisés par SiCrystal et CREE. Après un nettoyage chimique, les masques de gravure ont été déposés. Pour les masques de résine (AZ5214E qui est une résine standard et TI35ES qui est une résine spéciale gravure plasma), une lithographie réversible a été effectuée. Pour les masques métalliques, après la lithographie, l'aluminium ou le titane/nickel ont été évaporés sur les échantillons dans un bâti à canon d'électrons. Les motifs ont été définis par une procédure "lift-off". La gravure a été ensuite effectuée dans un bâti RIE 13,56 MHz Alcatel Nextral NE110 avec un diamètre de la cathode de 110 mm, une puissance maximale de 300 W et une pression variant de 10 à 100 mTorr. Le plasma est composé des deux gaz SF_6 et O_2 avec des débits de 25 Sccm et 6,7 Sccm respectivement.

Enfin, les profondeurs de gravures et les estimations pour la comparaison de la rugosité des surfaces avant et après gravure ont été mesurées sur un profilomètre alpha-step Tencor. Les profils de gravure ont été également observés sur un microscope électronique à balayage Jeol.

3. Résultats et discussion

3.1. Masques

Pour réaliser des gravures profondes dans le SiC, il faut nécessairement un masque avec une sélectivité élevée par rapport au SiC. Plusieurs masques de gravure ont été étudiés : résines photosensibles, aluminium et nickel, dans un plasma SF_6/O_2 avec une pression de travail de 60 mTorr et une puissance de 250 W. Tout d'abord, plusieurs résines ont été testées. Ces premiers essais se justifient par la facilité de la mise en place du masque de gravure puisqu'il s'agit d'une simple lithographie. Les résines sont très souvent utilisées dans les procédés de « Deep RIE » (process Bosch) et elles peuvent avoir des sélectivités supérieures à 100 par rapport au silicium [6]. Mais nos essais montrent que leur résistance aussi bien pour l'AZ5214E que la TI35ES, était beaucoup trop faible pour pouvoir être utilisé comme masque pour des gravures profondes de SiC. La sélectivité est de ? (Figure 2)

L'utilisation de métaux semble plus adaptée pour la gravure du SiC. Toujours dans les mêmes conditions, dans un premier temps, l'aluminium qui est un métal assez couramment utilisé se justifie par sa facilité de mise en place : bonne accroche sur le SiC et il s'élimine facilement par gravure humide. Les essais montrent que l'aluminium présente une sélectivité de 10 (Figure 2). C'est une valeur qui reste assez faible, puisqu'il faudrait déposer une couche épaisse $> 1 \mu\text{m}$ pour pouvoir obtenir une profondeur de $10 \mu\text{m}$. Mais l'autre constatation de l'utilisation de ce métal est l'apparition du phénomène de micromasking qui implique une rugosité de surface importante. Le masque est gravé et les particules d'aluminium ne sont pas complètement évacuées et se déposent sur les surfaces à graver d'où le phénomène du micromasking.

Le masque de nickel avec une fine couche de titane pour l'accroche montre une sélectivité beaucoup plus élevée de l'ordre de 40 par rapport au SiC. Et de plus, les particules de nickel sont bien évacuées ce qui résulte en une surface gravée

qui reste propre avec une rugosité proche de l'état initial. Pour ces raisons, nous avons retenu le nickel comme masque de gravure.

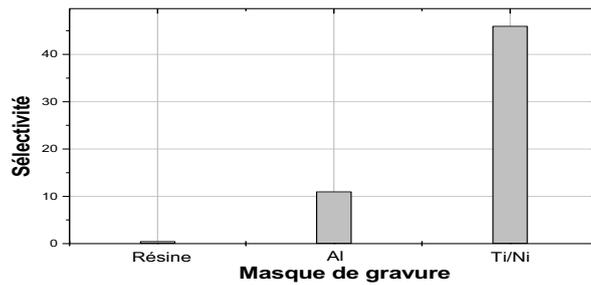


Figure 2. Sélectivité des masques de gravure pour un plasma SF₆/O₂

3.2. Influence de la cathode

La configuration du réacteur RIE a été étudiée afin de comprendre le phénomène de micromasking qui apparaît sur nos échantillons gravés. Initialement cette configuration était la suivante : la cathode du réacteur est protégée par une plaque de quartz entourée d'un anneau de quartz (fig.3a). Avec cette configuration, le phénomène de micromasking est visible (fig.4a). Avec l'utilisation d'un wafer de silicium posé au dessus de la plaque de quartz (fig.3b), aucun micromasking n'est observé (fig.4b). La mesure de rugosité par alpha-step montre une qualité de surface gravée proche de celle d'origine. Cet essai montre en effet que le quartz présent sur la cathode est également gravé pendant le procédé et les particules de quartz se redéposent sur l'échantillon et masquent certaines parties à graver. Alors qu'avec le wafer en silicium sous l'échantillon, les atomes de silicium sont gravés par les ions fluorés pour créer des espèces volatiles SiF_x qui sont ensuite évacuées. De cette manière, aucune particule ne se redépose sur les parties à graver et on évite ainsi le micromasking.

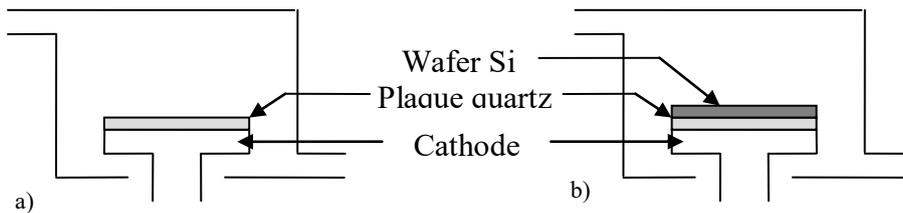


Figure 3. Configuration du réacteur RIE a) avec plaque en quartz et b) plaque en quartz et wafer de silicium

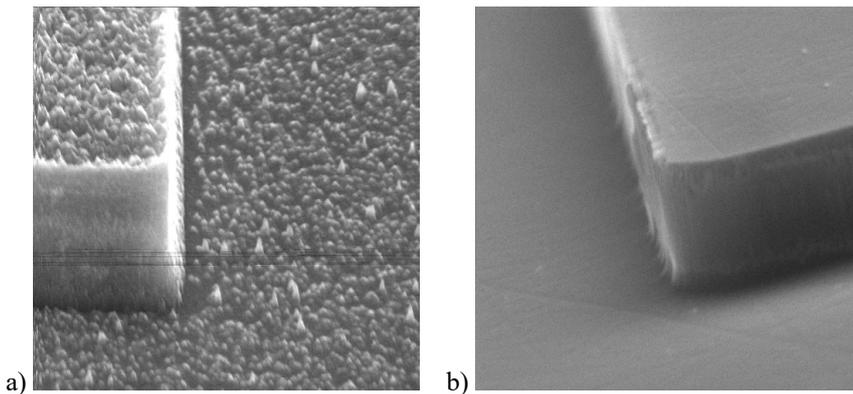


Figure 4. a) Etat de surface après une gravure avec la cathode en quartz b) Etat de surface après la gravure avec la cathode recouverte du wafer en silicium

3.3. Mécanisme de la gravure plasma SF₆/O₂

Le plasma est basé sur le gaz SF₆ couplé à l'O₂ avec un ratio de 20% d'oxygène. Dans la littérature, ce rapport est constamment mis en évidence comme étant le rapport permettant la meilleure cinétique de gravure [7, 8]. Le mélange gazeux avec l'oxygène a deux raisons. La première, l'oxygène dans le plasma augmente la génération d'ions fluorés et la seconde est l'hypothèse de la gravure des couches carbonées par la formation d'élément volatil tel que le monoxyde de carbone et le dioxyde de carbone [9].

La gravure plasma implique deux procédés de gravures dominantes de type physique et de type chimique [10]. La gravure physique est due aux bombardements des ions à hautes énergies provoquant une érosion de la surface. Et la gravure chimique est basée sur la formation d'espèce volatile à partir des gaz du plasma et le matériau. Avec un mélange SF₆/O₂, la formation d'ions fluorés implique la gravure physique mais également la gravure chimique par la formation d'espèce SiF_x (1 < x < 4). L'oxygène contribue à la gravure chimique par la formation avec le carbone des espèces CO et CO₂. Les masques métalliques utilisés tel que l'aluminium ou le nickel ne permettent aucune formation d'espèces volatiles avec les gaz utilisés, on peut en déduire que la dominante physique est à l'origine de la gravure du masque. La cinétique de gravure du SiC est plus grande que celle du masque puisque le mécanisme de gravure résulte de la combinaison des deux types de gravure.

La pression de travail du plasma est l'un des paramètres permettant de moduler la durée de vie des espèces dans le plasma. De cette manière, en jouant sur la pression, on peut moduler le mécanisme de gravure. Sur la figure 5, on observe pour une pression de 70 mTorr que la cinétique de gravure du SiC est maximale. Ces résultats ont été obtenus après une gravure à 250 W avec un masque de Ni. La courbe est en forme de cloche, ce qui signifie que pour une pression donnée, on a ainsi le meilleur compromis entre une gravure physique et chimique. On remarque également la variation de la sélectivité du masque qui après un palier relativement constant augmente avec la pression.

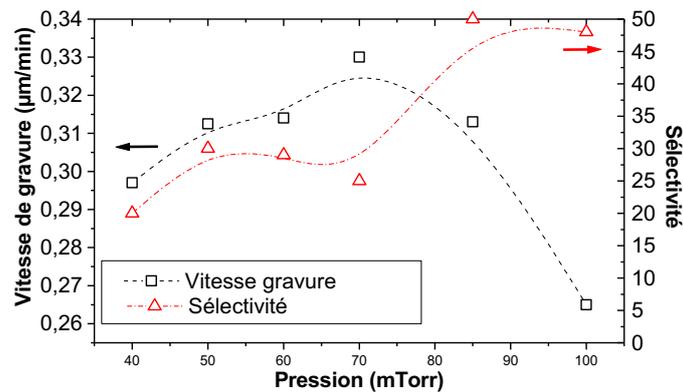


Figure 5. Essais à différente pression de travail avec une puissance de 250W, plasma SF₆/O₂ (25 Sccm / 6.7 Sccm).

Plus la pression est haute, plus la sélectivité du masque est importante. Cependant cette augmentation correspond à une chute brutale de la vitesse de gravure.

La vitesse de gravure du masque décroît, ce qui laisse supposer que la gravure du type physique est beaucoup moins présente à plus haute pression. Alors qu'à basse pression, la gravure physique devient plus importante puisque la vitesse de gravure du masque devient plus élevée ce qui induit une sélectivité plus faible. En jouant sur la pression, on peut ainsi configurer le procédé de gravure sur le caractère de la gravure physique, plus la pression augmente et plus la gravure physique devient faible. Par contre, il est plus difficile de déterminer l'influence de la pression sur la gravure chimique. Mais si l'on considère que la vitesse totale de gravure du SiC est la somme de la vitesse de gravure engendrée par le phénomène physique et chimique, on en déduit que la variation de la gravure de chimique augmente avec la pression. Donc en basse pression, nous avons une gravure avec un caractère plutôt physique et en augmentant la pression, la gravure résulte en partie d'un phénomène chimique.

Sur la figure 6, on peut observer la géométrie des flancs de gravure obtenus pour différentes pressions. On remarque la présence d'une concavité entrante dans la géométrie des flancs qui met en évidence également le caractère chimique de la gravure RIE SF₆/O₂. Cette gravure s'avère bénéfique pour éviter le phénomène de "trenching". Ce dernier peut être responsable de la diminution brutale de la tenue en tension des composants par l'augmentation importante du champ électrique et le resserrement des équipotentiels dans les zones qu'il délimite.

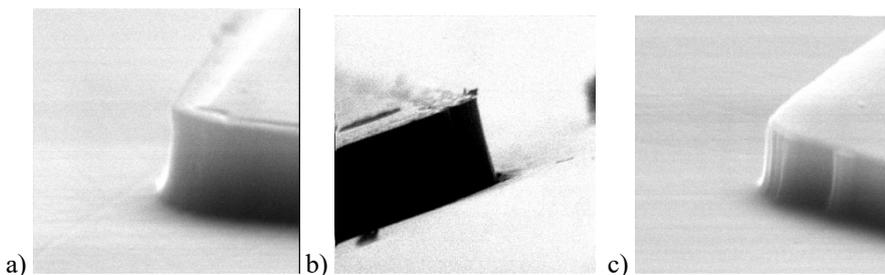


Figure 6. Photos au microscope électronique à balayage de gravure de 10 min, 250W, SF₆/O₂ avec une pression de a) 40 mTorr, b) 70 mTorr et c) 100 mTorr

3.5. Procédé de gravure optimal

Pour une pression de travail de 60 mTorr, on obtient le meilleur compromis entre vitesse de gravure du SiC et sélectivité du masque. Cette valeur de pression sera retenue pour les essais de gravures avec une puissance RF de 250W, un mélange gazeux SF₆/O₂ avec des débits de 25 Sccm et 6,7 Sccm. La figure 7 présente les résultats obtenus pour des temps de gravure variant 2,5 minutes à 30 minutes. On obtient des profondeurs de gravure allant de 0.65 nm à 10.35µm. Avec une vitesse maximale de gravure de 0.39 µm/min pour l'essai de 10 minutes et une vitesse moyenne de 0.35 µm/min. La rugosité de surface reste dans des valeurs proches de celles de l'état de surface initial.

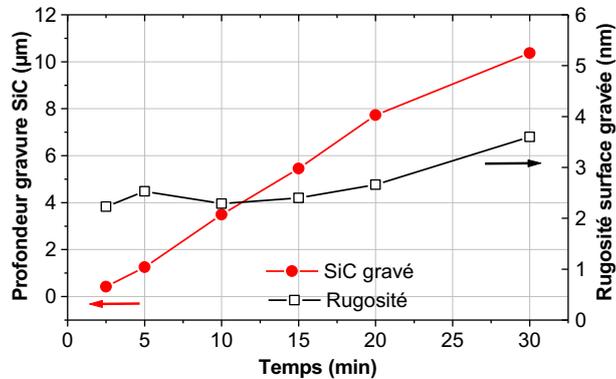


Figure 7. Résultats des profondeurs de gravure et de rugosité des surfaces gravées en fonction du temps de gravure.

Les figures 8a, 8b et 8c montrent les photos prises au microscope électronique à balayage des flancs de gravure pour des temps de process de 10, 15 et 30 minutes. On note que les flancs de gravure garde le même profil qui montre une gravure à dominante chimique parce avec une forme courbée des pieds de gravure. Ce procédé permet ainsi d'éviter le phénomène de trenching souvent observé lors de gravures plasmas de matériaux durs comme le carbure de silicium pour ces profondeurs de gravure.

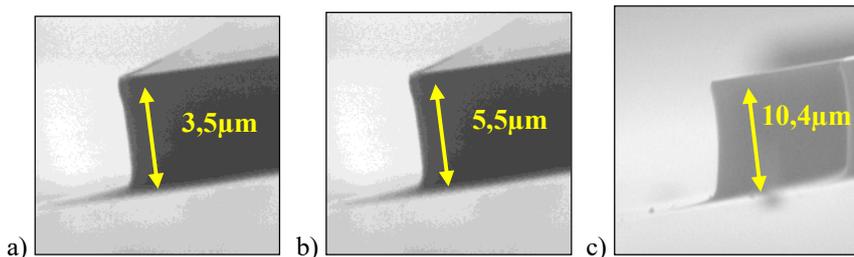


Figure 8. Photos au microscope électronique à balayage pour des durées de gravure de a) 10 minutes, b) 15 minutes et c) 30 minutes

4. Conclusion et perspectives

Nous avons mis en place un procédé de gravure avec un plasma SF₆/O₂ pour la mise œuvre d'une protection mesa pour les composants de puissance en SiC. On obtient une cinétique rapide (0.35µm/min) permettant d'atteindre des profondeurs de gravure supérieur à 10µm avec une bonne rugosité de surface et un profil fortement anisotrope. Afin de compléter cette étude, des caractérisations électriques devront être effectuées pour vérifier et quantifier les dégradations des propriétés électriques de la surface gravée par cette méthode. Puis la fabrication de diodes mesa permettra de conforter les résultats de la simulation pour mettre en évidence l'efficacité de la protection mesa pour la réalisation de dispositifs de puissance en carbure de silicium.

Bibliographie

Brosselard P., Conception, réalisation et caractérisation d'interrupteurs (thyristors et JFETs) haute tension (5kV) en carbure de silicium, thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2004

Chabert P., "Deep etching of silicon carbide for micromachining applications : Etch rates and etch mechanisms", J. Vac. Sci. Technol. B, 2001, 19(4), pp. 1339

Jiang L., Cheung R., Brown R., Mount A., "Inductively coupled plasma etching of SiC in SF₆/O₂ and etch-induced surface chemical bonding modifications", Journal of applied physics, 2003, 93(3), pp. 1376

- Jiang L., Cheung R., "Impact of Ar addition to inductively coupled plasma etching of SiC in SF₆/O₂", *Microelectronics engineering*, 2004, 73-74, pp. 306
- Khan FA, Adesida I., "High rate etching of SiC using inductively coupled plasma reactive ion etching in SF₆-based gas mixtures", *Appl Phys Lett*, 1999, 75, pp. 2268
- McDaniel G, Lee JW. et al., "Comparison of dry etch chemistries for SiC", *J Vac Sci Technol A*, 1997, 15(3), pp. 885
- Palmour J.W., Singh R., Glass R.C., Kordina O., Carter C.H. Jr., "Silicon carbide for power devices", *IEEE ISPSD'97*, 1997, pp. 25
- So M. S., Lim S.G. and Jackson T.N., "Fast, smooth, and anisotropic etching of SiC using SF₆/Ar", *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1999, 17(5), pp. 2055
- Szczesny A., Sniecikowski P., Szmidt J., Werbowy A., *Reactive ion etching of novel materials - GaN and SiC*, *Vacuum*, 2003, 70, pp. 249
- Wang J. J., Lambers E. S., Pearton S. J., Ostling M., Zetterling C.-M., Grow J. M., Ren F. and SHUL R. J., "ICP Etching of SiC", *Solid-State Electronics*, 1998, 42(12), pp. 2283
- Xie K., Flemish J.R., Zhao J.H., Buchwald W.R. and Casas L., "Low damage and residue-free dry etching of 6H-SiC using electron cyclotron resonance plasma", *Appl Phys Lett.*, 1995, 67, pp. 368
- Yih P.H., Saxena V, Steckl AJ, "A review of SiC reactive ion etching in fluorinated plasmas"
Phys Stat Sol B, 1997, 202, pp. 605