

Le carbure de silicium

Thierry Billon

Summary

Silicon carbide

Silicon carbide is a very promising semiconductor material for high power devices and high temperature applications. Aiming at objectives of short-term industrialization, silicon carbide research activities in CEA/LETI are focused on the settling of bulk crystal growth processes and the definition of new industrial technologies.

The aim of this paper is to present the main results on bulk SiC crystal growth and the realization of device demonstrators.

Mots-clés

Carbure de silicium, croissance cristalline, composant électronique, puissance, technologie.

Key-words

Silicon carbide, crystal growth, device, power, technology.

Le carbure de silicium est un matériau semi-conducteur très prometteur pour les applications d'électronique de puissance et d'électronique hautes températures. Visant des objectifs d'industrialisation à court terme, le CEA-LETI développe les procédés de croissance du matériau massif et participe à la mise au point de filières industrielles de composants.

Le but de cet article est de présenter les travaux en cours sur l'élaboration du matériau monocristallin 4H-SiC et la réalisation de composants démonstrateurs.

Les propriétés physiques du carbure de silicium en font un matériau semi-conducteur de choix pour de multiples applications électroniques de moyennes et fortes puissances, hautes fréquences et hautes températures (champ de claquage et gap élevés) (figure 1).

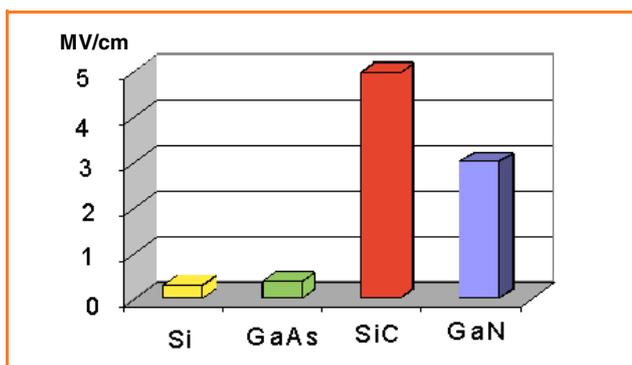


Figure 1 - Champ de claquage : comparaison des potentiels du silicium, arséniure de gallium et carbure de silicium.

Dans le domaine de l'électronique de puissance, le SiC a vocation à prendre l'ensemble du marché des redresseurs et interrupteurs pour des tensions supérieures à 300 V. Les marchés visés sont l'électroménager, les télécoms, les systèmes pour la conversion d'énergie, le véhicule électrique et les réseaux de distribution électrique.

Par ailleurs, les substrats SiC visent également d'autres applications telles que les amplificateurs hyperfréquence de puissance (par exemple pour les stations de base du téléphone portable), les diodes bleues (composants de type

GaN épitaxié¹ sur SiC) et l'électronique pour environnements sévères (électronique et capteurs adaptés aux hautes températures et aux agressions chimiques).

D'après certaines estimations, le marché des substrats SiC visé à une échéance de 5 ans sera d'un million de tranches par an. Aujourd'hui, Cree Research constitue la source quasi unique de substrats SiC dont le coût reste par conséquent extrêmement élevé (de l'ordre de 100 dollars par cm² soit 500 fois plus que le silicium). Le succès d'une filière technologique « carbure de silicium » en Europe dépend donc fortement des résultats liés à la cristallogénèse du matériau SiC massif.

Croissance de substrats SiC 4H-SiC monocristallins

Dans ce contexte, le CEA-LETI a acquis une compétence reconnue dans le domaine de la croissance de substrats SiC. Ceux-ci sont obtenus par un procédé proche de la méthode de Lely modifiée ; méthode consistant à sublimer une poudre de SiC de haute pureté sur un germe monocristallin (températures dans la gamme 2 000-2 400 °C) (figure 2). Ces travaux ont démarré en 1992 dans le cadre d'une thèse commune avec le LMGP (Laboratoire des matériaux et génie physique, INPG) et ont permis le montage d'un premier réacteur expérimental, installé à l'INPG, avec comme objectif la réalisation de matériau 6H-SiC. Au cours des années suivantes, les travaux se sont poursuivis avec le montage, au CEA-LETI, de deux réacteurs de première génération, autorisant la réalisation de lingots de carbure de silicium de

Polytypes SiC (variétés cristallographiques)

Le carbure de silicium cristallise :

- dans le système cubique : sous la forme 3C-SiC 3 pour le nombre d'empilements de bicouches Si-C nécessaires à la maille de base et C pour cubique,
- dans le système hexagonal où il peut prendre plus de 250 formes allotropiques. Les formes les plus courantes sont le 6H-SiC et le 4H-SiC 4 ou 6 pour le nombre d'empilements de bicouches Si-C nécessaires à la maille de base et H pour hexagonal.

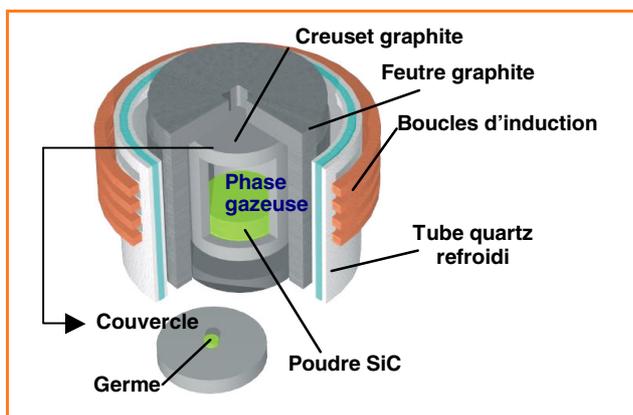


Figure 2 - Schéma de principe de la technique de sublimation.

diamètres compris entre 20 et 30 mm. Plus récemment, dans le cadre du programme national « Saut Technologique » et du programme européen « Jesica », un troisième réacteur a été construit pour la croissance de substrats 4H-SiC de diamètres de 30 à 50 mm (figure 3).



Figure 3 - Réacteur de croissance SiC et poste de supervision.

Ce dernier équipement a une configuration modulable qui lui permettra ensuite de réaliser des lingots SiC jusqu'à 100 mm de diamètre.

Ces équipements ont permis le développement de procédés de croissance de substrats 4H-SiC de 35 mm de diamètre, incluant un important travail sur l'amélioration de la qualité cristalline du matériau (figure 4).



Figure 4 - Substrat 4H-SiC monocristallin de 35 mm de diamètre.

Ainsi, les dernières caractérisations physiques de ce matériau ont permis de mesurer des densités de micropipes inférieures à 20 par cm^2 et des densités de dislocations comprises entre 1 000 et 10 000 par cm^2 ; ce qui situe ces résultats au meilleur niveau en ce qui concerne le polytype 4H.

La qualité du matériau est le premier paramètre « clé » pour la production de composants électroniques fiables et performants. Le second point « clé » concerne la disponibilité de substrats de diamètres adaptés aux moyens technologiques existants. La maîtrise de procédés « grands diamètres » est très délicate : des travaux sont en cours mais nécessiteraient davantage de développements pour atteindre le niveau de Cree Research.

La dernière étape pour l'obtention de substrats monocristallins est le conditionnement des lingots issus des fours de croissance. Ceux-ci sont orientés, carottés, découpés et polis selon un savoir-faire interne ; étapes ultimes conduisant à la fourniture de substrats « epi-ready » (prêts pour épitaxie¹).

Épitaxie par CVD de carbure de silicium

Le CEA-LETI a démarré ses travaux sur le carbure de silicium en 1989 avec le montage d'un réacteur d'épitaxie « prototype » pour l'hétéro-épitaxie de couches de 3C-SiC sur substrats 100 mm silicium. Ce premier axe de recherche, en collaboration avec Schneider Electric, a ensuite été orienté sur le développement de procédés d'homo-épitaxie sur substrats SiC, en collaboration avec le GDR « Grands Gaps ». Plus récemment, le CEA-LETI a acquis un nouveau réacteur d'épitaxie Epigress VP508, financé en partie par le Conseil Général de la Région « Rhône-Alpes » (figure 5).



Figure 5 - Poste de chargement des substrats SiC sur un équipement d'épitaxie SiC (Epigress).

Les couches épitaxiées sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) à des températures de l'ordre de 1 500 °C et par « cracking » de gaz tels que le propane et le silane sous pression contrôlée d'hydrogène.

Les travaux actuels ont pour objectif l'obtention de couches épitaxiées à faible niveau de dopage résiduel : les premiers résultats se situent dans la gamme de dopages de $5 \cdot 10^{14}$ à 10^{15} cm^{-3} . Les caractérisations électriques, par contact Schottky², de ces couches épitaxiées démontrent l'obtention de caractéristiques I(V) proches des courbes théoriques idéales d'un matériau à faible taux de défauts.

Les études de simulations et de modélisations de ce réacteur sont effectuées au Laboratoire de thermodynamique et de physico-chimie métallurgique de Grenoble (LTPCM-INPG). Ces travaux constituent un premier axe de collaboration sur la plate-forme « épitaxie », dans le cadre du programme « Thématiques prioritaires Région Rhône-Alpes » regroupant plusieurs laboratoires rhône-alpins.

En parallèle à une optimisation globale des procédés, la phase suivante concernera principalement la maîtrise de couples dopages/épaisseurs adaptés aux objectifs des programmes en cours. Selon les applications visées, la gamme d'épaisseur de ces épitaxies pourrait varier entre 0,1 et 150 μm . Pour ces deux cas extrêmes, les vitesses de croissance et les conditions d'épitaxie seront très différentes et fortement liées, par ailleurs, aux paramètres technologiques.

Technologie sur carbure de silicium

L'ensemble des moyens technologiques du CEA-LETI dédiés aux recherches et développements sur le silicium est accessible à la technologie « carbure de silicium ». La différence majeure entre ces deux matériaux voisins se situe au niveau des diamètres des substrats.

L'approche choisie par le CEA-LETI consiste à définir des procédures ou développer des adaptations sur les équipements standards de la microélectronique, permettant ainsi le traitement des substrats SiC 35 mm sur des équipements 100 et même 200 mm (figure 6).



Figure 6 - Vue d'une partie de la zone « traitements thermiques » en salle blanche : manipulation d'un substrat SiC.

Les premiers composants démonstrateurs réalisés par le CEA-LETI ont été les transistors MOSFET³. Ces derniers sont encore à l'étude puisqu'il n'existe toujours pas de procédés permettant d'obtenir une bonne interface SiC/SiO₂.

Parallèlement à ces études, la réalisation de composants MESFET⁴ et Schottky est devenue possible par le développement de procédés technologiques tels que l'implantation ionique, les dépôts de métallisations et de passivations.

Aujourd'hui, le CEA-LETI réalise des diodes Schottky 600 V en collaboration avec STMicroelectronics Tours dans le cadre d'un programme STSI⁵. Ces composants ont démontré leur supériorité sur les diodes bipolaires silicium avec des caractéristiques en commutation sans courant de recouvrement et une stabilité exceptionnelle de leurs performances après 1 000 heures à 250 °C.



Figure 7 - Contrôle dimensionnel des diodes en cours de process technologique.

Ces mêmes caractérisations seront très prochainement réalisées sur de nouvelles diodes Schottky 600 V élaborées sur des substrats 4H-SiC épitaxiés, issus des fours de croissance du CEA-LETI.

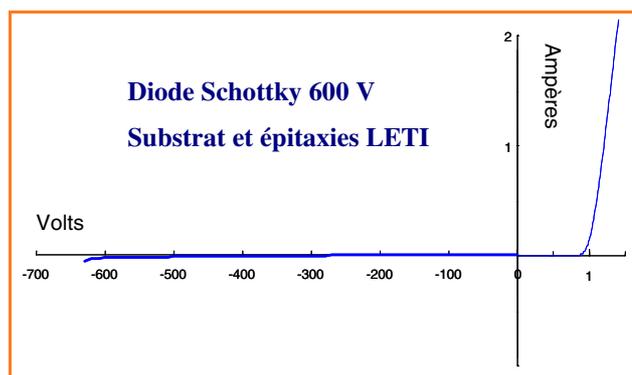


Figure 8 - Caractéristique I(V) directe et inverse d'une diode Schottky SiC 600 V.

Pour les prochaines années, de nombreux travaux sont en perspective pour répondre aux besoins des applications de fortes puissances et à la nécessité de faire émerger une technologie d'interrupteur SiC. Dans cet axe, les transistors MOSFET sont plus que jamais sous les feux de la rampe et vont mobiliser des équipes pluridisciplinaires sur le sujet.

Plate-forme « carbure de silicium »

Dans le cadre du programme fédératif « Alternative SiC », le CEA-LETI met en place, actuellement, une plate-forme « carbure de silicium » qui permettra la réalisation de projets innovants. Ces projets seront soumis à un comité de pilotage et, s'ils sont acceptés, seront réalisés sur les équipements du CEA-LETI.

Notes

- Épitaxie** : étape technologique consistant à déposer des couches SiC monocristallines, contrôlées en épaisseur et dopage, sur un même substrat SiC. L'épitaxie SiC par technique CVD met en œuvre un gaz vecteur (l'hydrogène) et deux gaz précurseurs : le silane (SiH₄) et le

propane. Les molécules de ces deux gaz sont « crackées » à des températures de l'ordre de 1600 °C et contribuent aux apports en espèces chimiques silicium et carbone.

- 2 **Contact Schottky** : contact direct « métal/semi-conducteur » ; lequel possède des propriétés électriques de type « redresseur » (effet diode).
- 3 **Transistor MOSFET** pour metal oxide semiconductor field effect transistor : transistor à effet de champ à grille (commande de grille) de type capacités MOS. Le courant qui passe de la source vers le drain peut être modulé par une tension variable appliquée sur la grille (isolée électriquement) du transistor. Par analogie avec l'eau, c'est le meilleur « robinet » des composants électroniques.
- 4 **MESFET** pour metal effect Schottky field effect transistor : transistor à effet de champ à grille (commande) de type Schottky. Le courant qui passe de la source vers le drain peut être modulé par le couple tension/courant, variables appliquées sur la grille du transistor. C'est aussi un « robinet » électronique ; celui-ci pouvant avoir des « fuites » au niveau même de la commande.

- 5 **STSI** : initiales des programmes de recherche financés par le ministère de l'Industrie.



Thierry Billon

dirige le Laboratoire carbure de silicium SiC du CEA-LETI à Grenoble*.

* CEA-LETI, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex.

Tél. : 04 38 78 36 80. Fax : 04 38 78 94 56.

E-mail : thierry.billon@cea.fr

Pour en savoir plus

- Proceeding(s) des conférences ICSCRM (International conference on silicon carbide and related materials) et ECSCRM (European conference on silicon carbide and related materials).
- Numéro spécial SiC de la SFV.
- *CEA-Technologies*, novembre 2001
- <http://www.cea-technologies.com/ceahtml/composant/58-401.html>
- http://www.minatec.com/minatec2001/act/minatec_lundi02_1BILLON.pdf
- <http://www.ecrin.asso.fr/pages/publica/sommaire/somlet/edp/somlet15.html>
- <http://oberon.imc.kth.se/sic/whysic.htm>
- <http://www.lerc.nasa.gov/WWW/SiC/SiC.html>
- <http://widegap.dj.kit.ac.jp/Research/research.html>
- <http://www.ifm.liu.se/Matephys/AAnew/research/sic-part/BulkGrowth.html>
- <http://www.ecn.purdue.edu/WBG/Index.html>