Réf. : ONSAR3222

Répondre aux défis de la fabrication du carbure de silicium pour la réussite des futures applications de puissance

Par : Catherine De Keukeleire, Responsable de l'assurance qualité et fiabilité, Wide Bandgap, onsemi

Pendant des décennies, le silicium (Si) a constitué le matériau primaire à destination des industries de semi-conducteurs, avec un usage polyvalent allant des microprocesseurs aux composants discrets de puissance. Néanmoins, les applications énergivores modernes des secteurs tels que l'automobile et les énergies renouvelables mettent à jour ses limites.

Tandis que le secteur recherche des solutions, les matériaux à large bande (WBG), parmi lesquels le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de gallium (GaN), sont envisagés pour répondre à cette problématique. Le nom de larges bandes provient de la différence énergétique entre le sommet de la bande valence et le bas de la bande de conduction. Le silicium présente une bande interdite assez étroite de 1,1 électron-volt (eV), tandis que le SiC et le GaN présentent respectivement 3,3 eV et 3,4 eV.

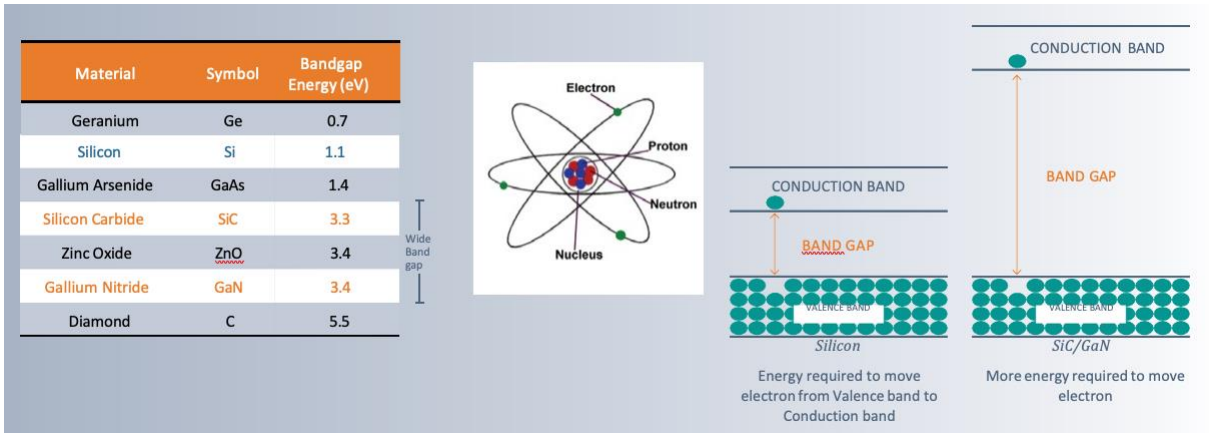

Figure 1 – Propriétés physiques d'un matériau à large bande (Source : onsemi)

Ces caractéristiques indiquent que les matériaux WBG se comportent davantage comme des isolants, et sont capables de fonctionner à des tensions, des fréquences et des températures plus élevées. En conséquence, ils conviennent aux applications de puissance telles que les véhicules électriques (VE) et les énergies renouvelables.

Carbure de silicium (SiC)

Le SiC n'est pas nouveau. Sa fabrication en tant que matériau abrasif remonte à plus d'un siècle. Néanmoins, le SiC revêt une importance croissante en raison de ses attraits majeurs le rendant compatible avec des applications de puissance élevée et de haute tension. Les propriétés physiques, telles que la forte conductivité thermique, une vitesse de propagation

des électrons ayant une limite élevée ainsi qu'un champ électrique de claquage important confèrent aux conceptions en SiC des pertes extrêmement faibles, des vitesses de commutation plus rapides et des géométries plus petites que les MOSFET ou les IGBT en pur Silicium.

Nombreux sont les acteurs de l'industrie à considérer le SiC comme une source d'avantages concurrentiels, car il leur permet d'accroître leur efficacité tout en réduisant la taille, le poids et les coûts. Tandis que les systèmes SiC fonctionnent à des fréquences plus élevées, les compsants passifs utilisés sont plus petits et les pertes moindres. En outre, ils nécessitent une températuer de fonctionnement plus élevée. Enfin, ces derniers permettent d'atteindre des densités d'énergie plus élevées, que nombre d'applications modernes requièrent.

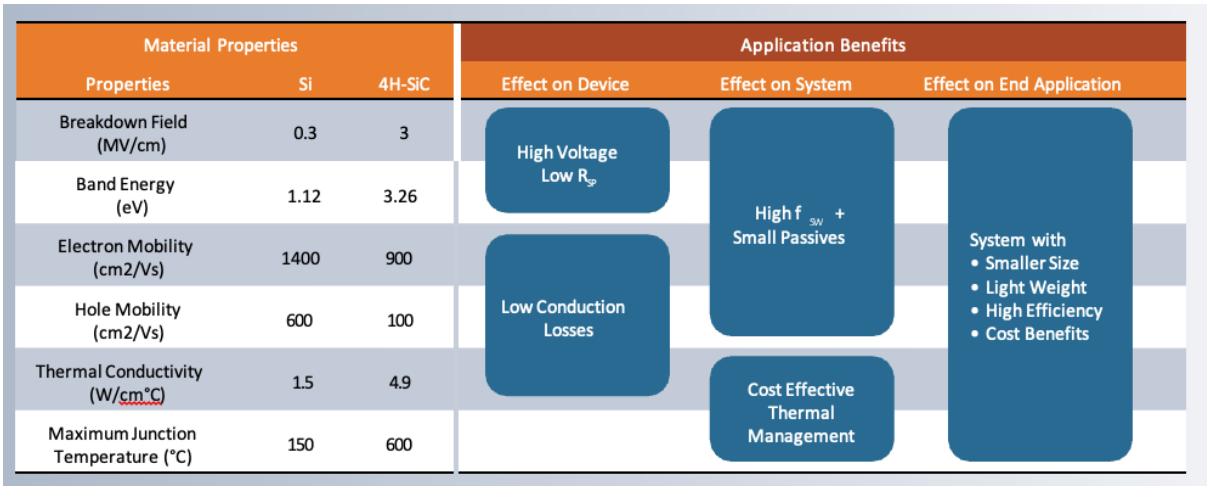

Figure 2 – Avantages du SiC dans de nombreuses applications (Source : onsemi)

Outre le choix du matériau, la mise en œuvre de nouvelles technologies de soudure dans les composants de puissance au SiC contribue à évacuer plus facilement les pertes thermiques de ces composants. Les techniques telles que le frittage, destiné à créer un lien solide entre la soudure et le substrat, assurent ainsi une interconnexion fiable. Par conséquent, ces dernières peuvent optimiser l'efficacité du transfert de chaleur et améliorer les performances thermiques.

Le SiC est habituellement utilisé dans les applications de haute tension (> 650 V) bien qu'il soit lui-même doté d'une tension de 1 200 V et plus. Il devient ainsi la meilleure solution pour les onduleurs solaires et les systèmes de charge des VE. Il s'agit également d'un élément essentiel aux transformateurs actifs (Solid State Transformers) où les semi-conducteurs remplaceront les composants magnétiques.

Défis de fabrication

La fabrication du SiC n'est pas simple. Tout d'abord le granulat doit être d'une pureté extrême et les billes nécessitent un haut niveau de régularité. Étant donné que le SiC ne peut jamais être à l'état liquide, les cristaux ne peuvent pas se développer à partir de la fusion. Par

conséquent, ils requièrent une pression contrôlée avec minutie dans une technique en phase vapeur connue sous le nom de sublimation. Pour ce faire, la poudre de SiC est placée dans un four et chauffée à plus de 2 200 °C, sublimant et cristallisant depuis un germe. Pour autant, les taux de croissance sont lents : jusqu'à 0,5 mm par heure.

L'extrême dureté du SiC en fait un matériau dur à couper, même avec une scie diamantée, ce qui rend la création de galettes encore plus difficiles qu'avec le silicium. D'autres techniques peuvent être utilisées, mais elles peuvent introduire des défauts dans les cristaux.

Le SiC étant un matériau hautement défaillant et son dopage étant complexe, produire de larges galettes présentant peu de défauts est difficile. Néanmoins, des entreprises à l'image d'onsemi produisent dorénavant couramment des substrats de 8 pouces.

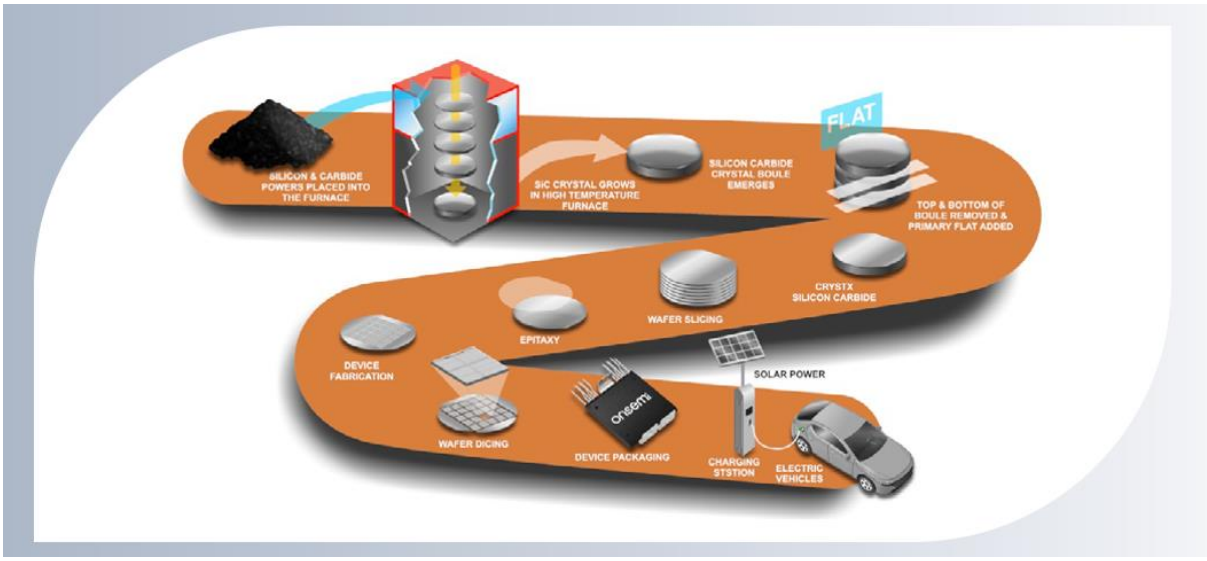

Figure 3 –Processus de fabrication du SiC (Source : onsemi)

Soutenir la recherche

onsemi reconnait l'importance du monde académique dans le développement de la technologie des semi-conducteurs. Dans le cas du SiC, des recherches sont en cours dans des domaines tels que :

- La robustesse concernant les rayons cosmiques
- La modélisation de la durée de vie intrinsèque pour l'oxyde de grille
- La modélisation de la durée de vie et la caractérisation de l'interface SiC/SiO2
- La population extrinsèque (par inspection)
- L'épitaxie et la défectuosité du substrat
- La détérioration de la diode de structure
- Les tests de fiabilité de blocage haute tension (HTRB)
- Amélioration des performance concernant les terminaisons, la tenue en avalanche et en courts-circuit
- La conception pour une robustesse élevée aux transitoires de tension (dv/dt)

- La tenue aux surcharges

En outre, onsemi s'est engagé envers USD8M en faveur d'une collaboration stratégique autour du Silicon Carbide Crystal Center (SiC3) à l'université d'État de Pennsylvanie (PSU). Cette collaboration s'étend à au moins six autres établissements en Europe, en faveur du développement de la technologie.

Les avantages de la fabrication d'onsemi

L'unicité d'onsemi réside dans l'offre complète de l'entreprise d'une chaîne d'approvisionnement entièrement intégrée pour les composants SiC. Cette chaîne permet un contrôle complet de l'ensemble des aspects du processus et de la qualité associée, depuis le granulat jusqu'au composant en SiC.

Le processus débute dans le New Hampshire par le développement de galettes SiC à cristal unique, auquel est ajouté ensuite une couche épitaxiale. Enfin, de nombreuses étapes de processus et d'emballage sont exécutées jusqu'au produit final.

La capacité « end-to-end » des sites de production d'onsemi facilite l'exécution des tests les plus complets possibles et favorise l'analyse des causes de défaillances possibles (« root cause analysis »). L'objectif est d'obtenir des composants ayant une très bonne fiabilité, exempts de défauts.

Figure 4 – La qualité ultime : zéro défaut (Source : onsemi)

Une maitrise et un contrôle de chaque étape permettent d'adapter relativement facilement la capacité à répondre à une demande croissante. En outre, le processus peut être affiné pour maximiser le rendement de production tout en contrôlant les coûts. En effet, le cabinet

McKinsey & Company a reconnu les avantages d'une chaîne d'approvisionnement intégrée en galette de SIC en déclarant que « l'intégration de l'étape de production de SiC à la fabrication des composants SiC peut améliorer le rendement de production de cinq à dix pourcents ».

Cinq étapes vers le succès

S'agissant de répondre aux défis spécifiques du SiC, onsemi adopte la méthodologie en cinq étapes pour répondre aux problématiques telles que les niveaux de défaillance de l'épitaxie et des substrats, la dégradation des diodes de structure, la fiabilité durant le blocage en haute tension et les performances liées à l'application.

Figure 5 –Une approche en cinq étapes pour répondre aux défis du SiC (Source : onsemi)

L'intégrité de l'oxyde de grille (GOI) est essentielle et constitue une étape où l'approche en cinq étapes est utilisée.

Contrôle : des outils tels que le plan de contrôle, le contrôle des processus statistiques et l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (FMEA) sont déployés. Les données sont collectées et utilisées en vue de l'amélioration du processus.

Amélioration : les défauts dans la couche de substrat ou épitaxiale ainsi que les contaminants métalliques et les particules peuvent affecter la qualité de l'oxyde de grille (GOI). Une amélioration continue diminue l'occurrence de tels défauts.

Test et contrôle : des contrôles visuel et électrique sont effectués pour identifier toute puce défectueuse. Les galettes sont scannés avant et pendant le traitement, identifiant les défauts à chaque étape. Un test électrique est effectué au niveau des galettes et inclue un test de vieillissement thermique et un tri des galettes.

Caractérisation :la charge de claquage (QBD) est utilisée pour mesurer la qualité de la grille (GOI) en raison de sa détection des détails les plus infimes. Le test a démontré une supériorité du SiC 50 fois plus importante par rapport au silicium pour les performances

intrinsèques de l’oxyde de grille. Un test par échantillonnage est effectué durant l’étape de production et les galettes sont rejetées en cas de non-conformité aux critères d’acceptation prédéfinis.

Modèles d’extraction et qualification :la performance intrinsèque de la grille d’oxyde est aussi évaluée via le claquage de diélectriques en fonction du temps (TDDB). La polarisation de la grille et la température sont associées pour accentuer les contraintes sur les MOSFET en SiC et l’occurrence des défauts est enregistrée. Les distributions statistiques de Weibull sont ensuite utilisées pour extraire les durées de vie.

La distinction SiC d'onsemi

onsemi anticipe le rôle essentiel du SiC dans l’avenir des systèmes électriques, et particulièrement les applications de conversion dans des domaines tels que l’automobile et les énergies renouvelables. Cette compréhension de ce rôle essenciel guide notre investissement dans des capacités de production et l’innovation dans de nombreux domaines afin de garantir que le SiC atteigne son plein potentiel dès que possible.

En tant que fournisseur « verticalement » intégré (du granulat jusqu’au composant), le processus entier repose entièrement et seulement entre nos mains. Ce processus permet donc de contrôler les coûts et de garantir un produit exempt de défauts, qui sera livré auprès des acteurs dans les domaines industriels et automobiles.

FIN