

SUBSTRAT POUR DISPOSITIF ELECTRONIQUE

DOMAINE DE L'INVENTION

La présente invention concerne un substrat pour un dispositif électronique, notamment pour application à l'électronique de puissance ou radiofréquence. L'invention se rapporte également à un dispositif électronique comprenant un tel substrat, et à un procédé de fabrication d'un tel substrat.

ETAT DE LA TECHNIQUE

Le carbure de silicium (SiC) est largement utilisé pour la fabrication de composants électroniques de puissance ou radiofréquence.

Un substrat pour réaliser de tels composants comprend typiquement un substrat support pouvant être en SiC polycristallin (p-SiC), et une couche superficielle de SiC monocristallin (m-SiC) s'étendant sur le substrat support. Des composants électroniques sont fabriqués dans ou sur la couche de SiC monocristallin. La structure est découpée sous forme de puces comprenant chacune un ou plusieurs composants électroniques. Chaque puce est brasée sur un empilement de dissipation thermique, comprenant des couches métalliques, une céramique conductrice de chaleur et un dissipateur thermique.

La chaleur est ainsi évacuée principalement par l'empilement de dissipation thermique, impliquant des contraintes thermiques importantes sur le matériau d'apport liant par brasage le composant électronique et la couche métallique supérieure de l'empilement de dissipation thermique.

Cependant, le coefficient de dilatation thermique (CTE) et le module de Young du SiC et de l'empilement thermique, notamment le cuivre, sont très différents. Des variations en température engendrent donc des déformations d'ampleur inégale dans les différentes couches au-dessus et en-dessous de la brasure.

Ainsi, le matériau d'apport est très sollicité, ce qui entraîne des fissures, délaminations, ou un effritement au niveau de l'interface de la brasure, résultant en une durée de vie du dispositif raccourcie.

Pour diminuer ces contraintes mécaniques, il est connu d'amincir les couches de la structure composite, notamment du substrat de base en SiC polycristallin. Cependant, l'abrasion d'un tel substrat de base est longue et laborieuse, résultant en un coût élevé du composant électronique. En outre, l'amincissement implique un risque de casse, rendant la structure composite inutilisable.

Une autre solution est de modifier les matériaux utilisés pour réaliser le brasage, ce qui est difficile à mettre en œuvre, en particulier en préservant la solidité mécanique et la conductivité électrique et thermique du brasage.

EXPOSE DE L'INVENTION

Un but de l'invention est de proposer une structure composite pour la réalisation des dispositifs d'électronique, présentant une meilleure tenue aux cycles en température, en évitant des fissures, délaminations et effritements au niveau de l'interface de brasage.

5 A cette fin, l'invention propose un substrat pour dispositif électronique de puissance ou radiofréquence, comprenant

- un substrat support en carbure de silicium polycristallin présentant une face avant et une face arrière, ledit substrat support étant autosupporté, et
- une couche superficielle de carbure de silicium monocristallin s'étendant sur la face

10 avant dudit substrat support,

ledit substrat étant caractérisé en ce que le substrat support présente au moins une portion poreuse s'étendant à partir de la face arrière, ladite portion poreuse présentant un taux de porosité supérieur à 5 %.

Le substrat support présente une épaisseur supérieure à 50 μm , avantageusement
15 supérieure à 80 μm , plus avantageusement supérieure à 100 μm et encore plus avantageusement supérieure à 150 μm .

De préférence, la portion poreuse comprend une couche de SiC porosifié.

Dans certains modes de réalisation, le substrat support comprend une portion non poreuse entre la couche superficielle de SiC monocristallin et la portion poreuse.

20 Dans certains modes de réalisation, la portion poreuse présente une partie arrière présentant un premier taux de porosité et une partie avant présentant un second taux de porosité inférieur au premier taux.

La portion poreuse peut présenter un gradient de porosité décroissant de la face arrière vers la face avant.

25 La portion poreuse peut présenter des pores remplis d'un matériau présentant un module d'Young inférieur au module d'Young du carbure de silicium.

De manière avantageuse, la distance moyenne entre les pores est supérieure à 10nm, de préférence supérieure à 50nm.

L'invention se rapporte aussi à un dispositif électronique comprenant un substrat tel
30 que décrit ci-dessus et au moins un composant électronique de puissance ou radiofréquence formé dans ou sur la couche superficielle de carbure de silicium monocristallin.

De préférence, le dispositif électronique comprend en outre un dispositif d'évacuation de chaleur, le substrat étant brasé sur le dispositif d'évacuation de chaleur par
35 l'intermédiaire d'un matériau d'apport de sorte que le matériau d'apport est en contact solidaire d'au moins une partie de la portion poreuse sur la face arrière du substrat support.

Un autre objet de l'invention concerne un procédé de fabrication d'un dispositif électronique de puissance ou radiofréquence comprenant :

- un substrat support autosupporté en carbure de silicium polycristallin présentant une face avant et une face arrière, et
- 5 • une couche superficielle de carbure de silicium monocristallin s'étendant sur la face avant dudit substrat support,

le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend une étape de formation, dans le substrat support, d'au moins une portion poreuse s'étendant à partir de la face arrière, ladite portion poreuse présentant un taux de porosité supérieur à 5 % et une épaisseur supérieure
10 à 100 nm, avantageusement supérieure à 1 μm , et plus avantageusement supérieure à 3 μm .

Le procédé peut comprendre en outre une étape d'assemblage de la couche superficielle et du substrat support.

De préférence, le substrat support présente une épaisseur supérieure à 50 μm ,
15 avantageusement supérieure à 80 μm , plus avantageusement supérieure à 100 μm et encore plus avantageusement supérieure à 150 μm .

Avantageusement, la formation du substrat support comprend une étape de porosification d'au moins une partie d'un substrat de base de carbure de silicium non poreux pour former la portion poreuse.

20 Dans certains modes de réalisation, la porosification est effectuée sur l'ensemble du substrat de base pour former un substrat support entièrement poreux.

La porosification peut être réalisée de sorte à former un gradient de porosité décroissant dans la portion poreuse de la face arrière vers la face avant.

La porosification peut être réalisée de sorte à former une zone de collage présentant
25 un taux de porosité inférieur à 40% sur la face avant du substrat support.

Dans certains modes de réalisation, le procédé comprend une étape de comblement d'au moins une partie des pores de la portion poreuse par un matériau présentant un module d'Young inférieur au module d'Young du carbure de silicium.

Le procédé peut comprendre en outre une étape d'amincissement du substrat
30 support par la face arrière, de sorte que l'épaisseur de la portion poreuse reste supérieure ou égale à 100 nm.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description
35 détaillée qui va suivre, en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

La figure 1 illustre un dispositif comprenant deux composants électroniques réalisés à partir d'un substrat selon l'invention et un empilement de dissipation de chaleur.

La figure 2 illustre un substrat selon l'invention comprenant une couche superficielle en carbure de silicium monocristallin et un substrat support comprenant une portion poreuse.

La figure 3 illustre un substrat selon l'invention comprenant une couche superficielle en carbure de silicium monocristallin et un substrat support comprenant une portion poreuse en SiC polycristallin porosifié et une portion non poreuse.

La figure 4 illustre un substrat selon un mode de réalisation comprenant une couche superficielle en carbure de silicium monocristallin et un substrat support comprenant une portion poreuse en SiC fritté et une portion non poreuse.

La figure 5 illustre un substrat selon un autre mode de réalisation comprenant une couche superficielle en carbure de silicium monocristallin et un substrat support comprenant une portion non poreuse et une portion poreuse comprenant deux zones présentant des taux de porosité différents.

La figure 6 est un graphe de mesure de résistance à la fracture d'un substrat en carbure de silicium poreux en fonction de la porosité dudit substrat.

Les figures 7A à 7D illustrent les étapes d'un mode de réalisation d'un procédé de fabrication d'un substrat selon l'invention.

Les figures 8A à 8C illustrent les étapes d'un autre mode de réalisation d'un procédé de fabrication d'un substrat selon l'invention.

Les figures 8D à 8I illustrent les étapes d'une variante du mode de réalisation du procédé illustré sur les figures 8A à 8C.

Les figures 9A et 9B illustrent les étapes d'un troisième mode de réalisation d'un procédé de fabrication d'un substrat selon l'invention.

Les figures 10A à 10F illustrent les étapes d'un quatrième mode de réalisation d'un procédé de fabrication d'un substrat selon l'invention.

Les figures 11A à 11E illustrent les étapes d'un cinquième mode de réalisation d'un procédé de fabrication d'un substrat selon l'invention.

La figure 12 est un graphe du module d'Young de différents échantillons en carbure de silicium poreux en fonction du taux de porosité des échantillons.

La figure 13 est un graphe du module d'Young de différents échantillons en carbure de silicium.

Pour des raisons de lisibilité des figures, les structures illustrées n'ont pas nécessairement été représentées à l'échelle.

DESCRIPTION DETAILLÉE DE MODES DE REALISATION

La figure 1 illustre un dispositif électronique de puissance ou radiofréquence comprenant une ou plusieurs puces électroniques 11, 12 réalisées à partir d'un substrat

selon l'invention. Les puces peuvent être liées par des interconnexions. Dans le cas d'un dispositif radiofréquence la puce électronique peut porter un dispositif latéral en nitrure de gallium.

Les puces électroniques 11, 12 sont montées sur une structure dissipatrice de chaleur par des brasures 21, 22. Cette structure dissipatrice (DBC, acronyme du terme anglo-saxon Direct Bonded Copper) comprend deux métallisations en cuivre 17, 19 et un substrat 18 en une céramique conductrice de chaleur et électriquement isolante, par exemple en nitrure d'aluminium. Des connexions électriques 27, 28 sont fixées sur la métallisation en cuivre 17 par l'intermédiaire de brasures 25, 26.

Une brasure 29 fixe le dispositif sur un dissipateur thermique 34 et une plaque de base 32. Une couche de graisse thermique 31 assure le contact thermique entre le dissipateur 34 et la plaque de base 32. Le dispositif électronique de puissance ou radiofréquence est encapsulé dans un boîtier 39 qui est typiquement en plastique.

Chaque puce est formée à partir d'un substrat comprenant un substrat support en carbure de silicium et une couche superficielle de carbure de silicium monocristallin dans ou sur laquelle est formé au moins un composant électronique de puissance ou un composant électronique radiofréquence.

La couche superficielle en carbure de silicium monocristallin présente typiquement une épaisseur comprise entre 100 nm et 1500 nm. Sur cette couche superficielle, on peut déposer par épitaxie une couche monocristalline en carbure de silicium d'une épaisseur comprise entre 1 μm et 150 μm , dans laquelle au moins une partie du composant électronique est formé.

Le substrat support présente une face avant, sur laquelle s'étend la couche superficielle, et une face arrière opposée à la face avant.

La couche superficielle peut avoir été assemblée sur le substrat support, qui peut alors être polycristallin, selon des modes de réalisation qui seront décrits plus bas.

Le substrat support peut être lui-même monobloc ou être constitué d'un empilement d'au moins deux couches. L'épaisseur du substrat support est de préférence choisie de sorte que le substrat support est autosupporté sans la couche superficielle, c'est à dire qu'il est mécaniquement stable pour être manipulé tout seul, sans ajout de support ou substrat de manipulation supplémentaire. A cette fin, le substrat support présente typiquement une épaisseur supérieure à 150 μm , avantageusement supérieure à 100 μm , plus avantageusement supérieure à 80 μm et encore plus avantageusement supérieure à 50 μm . L'utilisation d'un substrat support autosupporté facilite les étapes de fabrication du substrat.

Dans certains cas, le dispositif électronique peut être fabriqué à partir d'un substrat support sans limite d'épaisseur qui n'est pas nécessairement autosupporté. Dans ce cas, le dispositif d'évacuation de chaleur permet de stabiliser mécaniquement le composant électronique. La fabrication d'un tel substrat peut nécessiter un support de manipulation.

Cependant, le substrat support peut être réalisé selon les mêmes modes de réalisation qu'un substrat support autosupporté.

Dans le cas d'un dispositif électronique de puissance, une bonne conductivité électrique entre la couche mince et le substrat support est nécessaire. Pour un tel dispositif, le substrat support présente par exemple une résistivité électrique de 50 mΩ.cm ou moins, notamment 20 mΩ.cm ou moins.

Dans le cas d'un dispositif radiofréquence, le substrat support présente avantageusement une haute résistivité électrique, par exemple une résistivité électrique supérieure à 500 Ω.cm.

Le substrat support présente au moins une portion poreuse qui s'étend à partir de la face arrière. La couche superficielle est en revanche non poreuse, c'est-à-dire qu'elle présente un taux de porosité inférieur à 5% ou nul.

La porosité du carbure de silicium est définie comme la fraction de volume inoccupé au sein du carbure de silicium, ledit volume pouvant être rempli d'air ou d'un autre gaz ou d'inclusions solides d'un autre matériau. Par exemple, des pores d'une couche de carbure de silicium poreux peuvent être remplis par des inclusions de carbone.

Les pores peuvent être interconnectés ou séparés les uns des autres, selon notamment la méthode de formation de la portion poreuse. Typiquement, des pores issus d'une porosification par voie électrochimique du carbure de silicium sont interconnectés au moins partiellement et sont généralement remplis d'air. Dans le cas du carbure de silicium poreux obtenu par frittage, les pores typiquement séparés les uns des autres, et peuvent être remplis au moins partiellement par des inclusions de carbone.

Dans le cas de pores interconnectés et remplis d'air, on peut mesurer la porosité par gravimétrie. Dans d'autres cas, la porosité peut être mesurée par réflectivité d'une surface poreuse du carbure de silicium. Il est également possible de mesurer la porosité en observant une coupe du carbure de silicium poreux au microscope optique ou à balayage d'un faisceau d'électrons et en estimant le quotient entre la surface occupée par des pores et/ou inclusions et la surface occupée par le carbure de silicium.

Le taux de porosité de la portion poreuse du substrat support est avantageusement compris entre 5% et 30%, et, dans le cas d'un substrat en carbure de silicium porosifié, plus avantageusement entre 5% et 20%. Le taux de porosité peut être constant sur toute l'épaisseur de la portion poreuse, ou bien être variable par paliers ou de manière continue selon un gradient, selon des modes de réalisation décrits plus bas.

La présence d'une telle porosité permet de réduire le module d'Young du carbure de silicium. La figure 12 illustre le module d'Young (module d'élasticité, E) du carbure de silicium en fonction du taux de porosité Φ selon L.L. Snead et al. Malgré la large dispersion, on constate que la diminution du module d'Young est visible même pour les faibles taux de porosité, et particulièrement marqué à partir d'un taux de porosité d'environ 5%.

Dans le cas où les pores sont remplis par des inclusions d'un matériau solide, ledit matériau solide présente avantageusement un module d'Young inférieur à celui du carbure de silicium, afin de ne pas contrebalancer la réduction du module d'Young procurée par la porosité du carbure de silicium. Par ailleurs, pour ne pas dégrader la conductivité électrique du substrat support, le matériau solide est avantageusement électriquement conducteur. Par exemple, les inclusions peuvent comprendre du carbone, du silicium, un métal ou un alliage métallique.

Un taux de porosité inférieur ou égal à 30% permet de conserver une résistance à la rupture acceptable au regard des contraintes mécaniques susceptibles d'être appliquées à la puce, notamment lorsque l'ensemble du substrat support est poreux. La figure 6 montre des mesures de la résistance à la rupture en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ en fonction de la porosité d'un échantillon de carbure de silicium poreux. Pour un taux de porosité jusqu'à environ 25%, la modification de la résistance à la rupture est négligeable pour le comportement de la puce électronique.

Dans certains modes de réalisation, la portion poreuse s'étend sur toute l'épaisseur du substrat support.

Dans d'autres modes de réalisation, la portion poreuse ne s'étend que sur une partie de l'épaisseur du substrat support. Dans ce cas, une portion intermédiaire non poreuse s'étend entre la portion poreuse et la couche superficielle. Une telle configuration présente typiquement une meilleure résistance à la fracture du substrat.

Dans tous les cas, la portion poreuse présente une épaisseur totale supérieure à 100 nm, de préférence supérieure à 1 μm , voire supérieure à 3 μm .

Grâce à une telle épaisseur, combinée à la porosité susmentionnée, la portion poreuse du substrat support présente un module d'Young sensiblement inférieur à celui du carbure de silicium non poreux et présente ainsi un comportement plus favorable à la réduction des contraintes mécaniques exercées sur le matériau d'apport de la brasure lors des variations de températures subies par le dispositif.

La figure 13 est un graphe (obtenu par une simulation informatique) de la contrainte relative au point de fatigue dans la brasure en fonction du module d'Young E de différents substrats en carbure de silicium, présentant une portion poreuse de différentes épaisseurs. L'épaisseur totale de chaque substrat est de 350 μm . La courbe 1 correspond à un substrat ne présentant pas de portion poreuse, la courbe 2 correspond à une épaisseur de la portion poreuse de 1 μm , la courbe 3 à 5 μm , la courbe 4 à 10 μm , la courbe 5 à 25 μm , la courbe 6 à 50 μm , et la courbe 7 correspond à une épaisseur de la portion poreuse de 100 μm . Chaque courbe présente la contrainte dans la brasure au point le plus externe de contact entre la brasure et le SiC poreux, divisée par la contrainte dans le cas où aucune couche poreuse n'est présente.

La contrainte au point de fatigue de la brasure diminue avec l'épaisseur croissante de la portion poreuse. Dans les simulations, on suppose que le module d'Young du SiC poreux dépend de la porosité comme représenté dans la figure 12. Par exemple, dans le cas d'un taux de porosification de 5%, le module d'Young est de 400 GPa. Dans le cas d'une couche de 10 μm d'épaisseur (courbe 4), on obtient une contrainte relative au point de fatigue de 0,93, c'est-à-dire que la contrainte est diminuée de 7% par rapport à un substrat sans portion poreuse. Pour un taux de porosification de 15%, correspondant à un module d'Young de 300 GPa, et une couche poreuse d'une épaisseur de 20 μm , la contrainte relative au point de fatigue est de 0,8 et donc diminuée de 20% par rapport à un substrat sans portion poreuse.

Le module d'Young de la portion poreuse du substrat support, qui est située à l'interface de brasage, est plus proche du module d'Young de la structure DBC que le module d'Young de la couche superficielle. Cela implique que les déformations engendrées par des variations en température sont moins importantes et plus proches de celles de la structure DBC et de la brasure. Par conséquent, les contraintes mécaniques exercées sur la brasure en raison de ces déformations sont moins importantes que dans les puces connues. La diminution de ces contraintes augmente la durée de vie de la brasure et du dispositif électronique de puissance ou radiofréquence.

Enfin, la présence d'une telle portion poreuse sur la face arrière du substrat ne pénalise pas la conductivité électrique du substrat dans les applications de puissance.

Exemples de modes de réalisation

La figure 2 illustre un premier substrat selon l'invention, comprenant un substrat support 30 et une couche superficielle 1. Le substrat support 30 est constitué d'une seule portion poreuse 3 en carbure de silicium poreux, présentant une porosité homogène. Cette portion poreuse est en carbure de silicium fritté, en carbure de silicium polycristallin porosifié ou en carbure de silicium monocristallin porosifié. La portion poreuse s'étend de la face arrière 20 jusqu'à la face avant 10 du substrat support 30. La couche superficielle 1 est en carbure de silicium monocristallin non-poreux. Cette couche est agencée sur la face avant du substrat support 30. Dans certains modes de réalisation, la portion poreuse et la couche superficielle sont formées d'un seul tenant à partir d'un unique substrat de carbure de silicium monocristallin.

La figure 3 illustre un deuxième mode de réalisation, dans lequel le substrat support 30 comprend une portion 3A en carbure de silicium porosifié s'étendant à partir de la face arrière 20 du substrat. La porosité de cette portion 3A est homogène. Les pores sont interconnectés et remplis d'air. Le substrat support 30 comprend en outre une portion non-poreuse 2A en carbure de silicium polycristallin agencée entre la portion poreuse et la face avant 10 du substrat support 30. Une couche superficielle 1 en carbure de silicium monocristallin non-poreux est agencée sur la face avant 10 du substrat support 30.

La figure 4 illustre un troisième mode de réalisation, dans lequel le substrat support 30 comprend une portion 3B en carbure de silicium fritté s'étendant à partir de la face arrière 20 du substrat. Le carbure de silicium fritté comprend des inclusions de carbone qui peuvent être séparées les unes des autres. Les pores sont ainsi remplis de carbone, et typiquement
5 non interconnectés. La porosité de cette portion est homogène. Le substrat support 30 comprend en outre une portion non-poreuse 2B en carbure de silicium polycristallin agencée entre la portion poreuse 3B et la face avant 10 du substrat support 30. Une couche superficielle 1 en carbure de silicium monocristallin non-poreux est agencée sur la face avant 10 du substrat support 30.

10 La figure 5 illustre un quatrième mode de réalisation, dans lequel le substrat support 30 comprend successivement, de sa face arrière 20 vers sa face avant, une première portion poreuse 3C en carbure de silicium porosifié, une deuxième portion poreuse 2D en carbure de silicium fritté et une portion non poreuse 2C. Les pores de la première portion
15 poreuse 3C sont interconnectés et remplis d'air. Les pores de la deuxième portion poreuse 2D sont remplis d'inclusions de carbone et séparés les uns des autres. Le taux de porosité de la couche 3C en carbure de silicium porosifié est supérieur au taux de porosité de la portion 2D en carbure de silicium fritté. Une couche superficielle 1 en carbure de silicium monocristallin non-poreux est agencée sur la face avant 10 du substrat support 30.

Dans d'autres modes de réalisation non illustrés, la portion poreuse en carbure de silicium porosifié présente un gradient de porosité, de sorte que la porosité diminue de la face arrière en direction de la face avant du substrat support.

Dans d'autres modes de réalisation non-illustrés, plusieurs portions en carbure de silicium fritté ou en carbure de silicium porosifié peuvent être superposées pour former un substrat support 30 ou une partie d'un substrat support 30. La taille et la forme des pores
25 peuvent être similaires ou différentes dans les différentes portions poreuses. Avantagusement, la distance moyenne entre les pores est supérieure à 10nm, de préférence supérieure à 50nm, dans chaque portion poreuse présente dans le substrat afin d'éviter la formation d'une possible zone de déplétion dans le SiC.

Dans certains modes de réalisation, on utilise un substrat support pouvant être non-autosupporté pour former un dispositif d'électronique de puissance ou radiofréquence.
30 Ledit substrat comprend un substrat support en carbure de silicium polycristallin présentant une face avant et une face arrière, et une couche superficielle de carbure de silicium monocristallin s'étendant sur la face avant dudit substrat support, ledit substrat étant caractérisé en ce que le substrat support présente au moins une portion poreuse s'étendant
35 à partir de la face arrière, ladite portion poreuse présentant un taux de porosité supérieur à 5 %. Au moins un composant électronique de puissance ou radiofréquence est formé dans ou sur la couche de carbure de silicium monocristallin.

Le dispositif peut en outre comprendre un dispositif d'évacuation de chaleur, le substrat étant brasé sur le dispositif d'évacuation de chaleur par l'intermédiaire d'un matériau d'apport de sorte que le matériau d'apport est en contact solidaire d'au moins une partie de la portion poreuse sur la face arrière du substrat support.

5

Fabrication du substrat

On va maintenant décrire les étapes de fabrication d'un substrat selon différents modes de réalisation.

10 La formation d'un substrat selon l'invention comprend la formation d'au moins une portion poreuse.

Une portion poreuse peut être formée par porosification d'un substrat de carbure de silicium. Les méthodes connues de porosification de carbure de silicium, dont certaines sont décrites ou référencées dans les publications de Y. Shishkin et al. et de Gautier et al. peuvent être appliquées pour former la portion poreuse. La porosification peut être réalisée à partir de la face avant ou de la face arrière du substrat.

15 Une étape de porosification peut par exemple être réalisée par immersion dans un bain d'acide ou par voie électrochimique ou photo-électrochimique. Une porosification par voie électrochimique peut être une anodisation électrochimique dans laquelle la portion à porosifier est placée dans un électrolyte tel qu'une solution comprenant de l'acide hydrofluorique et/ou de l'éthanol. Une anode et une cathode immergées dans l'électrolyte sont connectées à une source électrique afin d'appliquer un courant électrique entre lesdites électrodes. L'anodisation décompose électrochimiquement, dans une certaine mesure, le cristal de carbure de silicium dans la région de la couche poreuse de carbure de silicium. Au lieu de décomposer uniformément le cristal de silicium, la décomposition électrochimique peut retirer localement des atomes de silicium du réseau cristallin du carbure de silicium, formant ainsi de petits trous ou pores dans le cristal de carbure de silicium. A la fin du traitement, la portion porosifiée est rincée afin d'enlever les résidus de l'électrolyte.

20 Dans une étape de porosification, il est possible de conserver la structure non-poreuse d'une portion d'un substrat. Dans ce cas, on maintient la portion concernée à l'extérieur du bain d'électrolyte.

Dans certains cas, la porosité ainsi formée est homogène sur la totalité du substrat support, à l'exception de la couche superficielle. Dans d'autres modes de réalisation, on réalise un gradient de porosité décroissant de la face arrière vers la face avant, de sorte que le taux de porosité est plus faible du côté de la couche superficielle et plus importante du côté de la face arrière. La porosité peut également être augmentée par paliers, en ajustant les paramètres de porosification d'abord pour un substrat d'une certaine épaisseur, et en poursuivant cette porosification par portions d'épaisseur décroissante s'étendant de

35

la face arrière du substrat. Pour chaque portion successive, on peut modifier les paramètres de porosification de sorte à créer un taux de porosité plus important que dans l'étape précédente.

On peut modifier le taux de porosité et créer un gradient en variant les différents
5 paramètres du substrat tel que le dopage, et du procédé de porosification tels que le courant et la tension appliqués, la température, la composition de l'électrolyte et, dans certains cas, l'intensité et la longueur d'onde d'une lumière appliquée.

De manière alternative, une portion poreuse peut être formée par frittage de carbure
10 de silicium avant l'assemblage du substrat. Un frittage est un traitement thermique d'une structure en carbure de silicium à une température comprise entre 1600 °C et 2400 °C dans une atmosphère qui peut être par exemple de l'argon, du nitrogène ou d'un gaz inerte. Un tel traitement thermique peut modifier la distribution du carbone et du silicium présentes dans le substrat, formant ainsi des inclusions en carbone dans le carbure de silicium.

Dans certains modes de réalisation, la zone poreuse peut être formée directement
15 dans un substrat de carbure de silicium monocristallin comprenant la couche superficielle, par porosification dudit substrat sur une partie de son épaisseur. Dans ce cas, la porosification est réalisée à partir de la face arrière.

Dans d'autres modes de réalisation, la formation du substrat peut comprendre
20 l'assemblage du substrat support et de la couche superficielle. La formation de la zone poreuse du substrat support peut être réalisée avant ou après ledit assemblage.

Dans certains modes de réalisation, la formation du substrat support peut
comprendre une ou plusieurs étape(s) d'assemblage de deux ou plusieurs portions poreuses, et/ou d'une portion poreuse avec une portion non-poreuse.

L'assemblage desdites couches ou portions de substrats peut être réalisé par
25 collage, par exemple à partir d'un substrat donneur dans lequel on crée une zone de fragilisation afin de délimiter la couche à assembler. Dans ce cas, on utilise typiquement un procédé du type Smart Cut™. On forme, dans un substrat donneur en carbure de silicium monocristallin, une zone de fragilisation pour délimiter la couche à assembler sur le substrat support. La zone de fragilisation est typiquement créée par irradiation avec des ions, par
30 exemple des ions d'hydrogène et/ou d'hélium. On colle ensuite le substrat donneur sur la face avant du substrat support, la couche délimitée par la zone de fragilisation étant agencée en contact direct avec la face avant du substrat support. On détache ensuite le substrat donneur le long de la zone de fragilisation, afin de transférer la couche de carbure de silicium monocristallin sur le substrat support, par exemple en utilisant un traitement
35 thermique.

Une autre technique pour fragiliser un substrat donneur est de créer une zone de fragilisation présentant une porosité plus élevée que celle du matériau situé au voisinage de cette zone. Dans un tel cas, après collage sur le substrat support, on peut détacher le

substrat donneur en appliquant une contrainte mécanique. Une telle contrainte mécanique est par exemple l'insertion d'une lame ou d'un autre outil biseauté, ou l'application d'un jet d'air ou d'un jet d'eau. Cette technique peut être utilisée lors du transfert d'une couche poreuse ou pour un amincissement tel que décrit ci-dessous.

5 Un autre mode de réalisation de l'assemblage est un dépôt sur une portion du substrat fournie, par exemple un dépôt chimique en phase vapeur (CVD, acronyme du terme anglo-saxon « Chemical Vapour Déposition ») ou un dépôt physique en phase vapeur (PVD, acronyme du terme anglo-saxon « Physical Vapour Déposition »). Par exemple, on peut déposer une couche de carbure de silicium polycristallin par CVD ou PVD sur la
10 couche superficielle de carbure de silicium monocristallin ou sur une autre couche de carbure de silicium polycristallin (poreuse ou non), et porosifier tout ou partie de la couche déposée.

 L'étape d'assemblage du substrat support et de la couche superficielle de carbure de silicium monocristallin peut être réalisée sur un substrat de base destiné à former un
15 substrat support, sur un substrat support finalisé, ou à l'issue d'une ou plusieurs étapes de formation du substrat support.

 Dans le cas d'un collage de deux portions poreuses ou d'une portion poreuse et d'une portion non poreuse, le taux de porosité des interfaces de collage est de préférence inférieur à 40 %, préférablement inférieur à 15 % et plus préférablement inférieur à 5% afin
20 d'assurer une bonne adhésion entre les deux portions.

 On peut réaliser une ou plusieurs étapes d'amincissement facultatives afin d'ajuster l'épaisseur du substrat support ou d'une portion du substrat support, et la porosité sur sa face arrière. Afin de réaliser cette étape d'amincissement, on peut créer, du côté arrière de la zone poreuse à former, une zone de fragilisation présentant un taux de porosité supérieur
25 à 10%, avantageusement supérieur à 15%, de manière particulièrement avantageuse supérieur à 30% par rapport à la porosité de la zone poreuse à former, à une profondeur déterminée qui correspond à l'épaisseur de la portion poreuse à former. On peut ensuite, ou après une étape d'assemblage avec une ou plusieurs couches sur la face avant du substrat, découper le substrat le long de la zone de fragilisation créée. La découpe peut
30 être réalisée par application d'une contrainte mécanique, par exemple par insertion d'une lame ou par application d'un jet d'air ou d'un jet d'eau. La contrainte doit être adaptée pour propager une onde de fracture le long de la zone de fragilisation, qui présente une résistance mécanique inférieure à celle des zones entourant la zone de fragilisation. Avantageusement, une telle zone de fragilisation est entourée par une portion en carbure
35 de silicium polycristallin présentant un taux de porosité moins important que la zone de fragilisation, par exemple de 1% ou de 5% de porosité en moins, avantageusement de 10% moins de porosité.

Dans certains modes de réalisation, on provoque un amincissement du substrat par rupture d'une portion poreuse qui laisse en surface la zone poreuse qui sera fixée à la brasure du composant électronique. Un tel amincissement évite une étape de polissage qui peut être longue et coûteuse.

- 5 L'étape d'amincissement peut également être réalisée par gravure chimique ou une technique d'abrasion mécanique.

De préférence, on conserve une portion poreuse présentant une épaisseur supérieure à 100 nm, de manière avantageuse supérieure à 1 μm , et de manière particulièrement avantageuse supérieure à 3 μm . L'épaisseur de la couche a une influence
10 sur les déformations engendrées par des variations de température. Les contraintes mécaniques appliquées sur la brasure de la puce électronique diminuent ainsi davantage avec une épaisseur plus importante de la portion poreuse.

On peut également appliquer une ou plusieurs étapes d'amincissement à l'issue de la création d'une portion poreuse, afin d'ajuster l'épaisseur de ladite portion poreuse avant
15 l'assemblage avec une autre portion, poreuse ou non.

On peut réaliser une étape facultative de passivation ou d'un autre traitement de la face arrière, par exemple par dépôt d'une couche diélectrique, tel que de l'oxyde de silicium, qui forme une couche barrière afin d'éviter un contact direct entre le carbure de silicium et l'air de l'environnement et, par conséquent, d'éviter la création d'une zone de déplétion
20 impliquant une baisse de la conductivité électrique de la face arrière.

Exemples de modes de réalisation

Les figures 7A à 7D illustrent un procédé de fabrication d'un substrat selon l'invention, dans lequel la couche superficielle et le substrat support sont réalisés à partir
25 d'un substrat de départ 40 unique en carbure de silicium monocristallin.

En référence à la figure 7A, on choisit une face avant 410, préférentiellement une face silicium. On peut appliquer un traitement à la face avant 410, par exemple un polissage. La portion s'étendant à partir de cette face avant 410 est destinée à former la couche superficielle 41.

30 Ensuite, en référence à la figure 7B, une porosité est formée à partir de la face arrière 420 de la portion destinée à former le substrat support 43, de sorte qu'aucune porosité n'est formée dans la portion destinée à former la couche superficielle 41.

On peut ensuite, de manière facultative, assembler une ou plusieurs couches supplémentaires 43B, 43C sur la face arrière du substrat support 43. L'assemblage d'une
35 première couche 43B est illustré dans la figure 7C. La première couche 43B présente un taux de porosité plus élevé que la portion 43 s'étendant de la face arrière 420 du substrat unique porosifié. Une telle couche est, par exemple, une couche en carbure de silicium fritté ou une couche en carbure de silicium porosifié, ou une combinaison de deux ou plusieurs

couches poreuses. Une couche en carbure de silicium fritté peut, par exemple, être obtenue par un frittage réactionnel à une température d'environ 2000°C. On forme ainsi une nouvelle face arrière 421 du substrat support 430 à former.

L'assemblage optionnel d'une deuxième couche 43C est illustré dans la figure 7D.

5 On forme, par cet assemblage, une nouvelle face arrière 422 du substrat à former. La deuxième couche 43C présente un taux de porosité plus élevé que la face arrière de la première couche 43B. Ainsi, on forme un nouveau substrat support 431 dont la porosité augmente successivement de la face avant 410 jusqu'à la face arrière 422 du substrat support 431 formé.

10 On peut également réaliser un assemblage d'une ou plusieurs couches 43B, 43C sur la face arrière du substrat 420 et/ou réaliser une porosification supplémentaire après l'assemblage (non illustré). Par exemple, on peut d'abord coller une couche en carbure de silicium fritté sur la face arrière du substrat de départ, déposer ensuite une couche de carbure de silicium polycristallin sur la face arrière de la couche en carbure de silicium fritté,
15 et réaliser une étape de porosification de la couche en silicium polycristallin déposé sur la couche en carbure de silicium fritté.

Un mode de réalisation préféré est illustré dans les figures 8A à 8C. On forme d'abord un substrat support 530 et réalise par la suite un assemblage avec une couche superficielle 51 en carbure de silicium monocristallin.

20 En référence à la figure 8A, on forme un substrat support à partir d'un substrat 50 en carbure de silicium polycristallin. En référence à la figure 8B, on réalise une porosification d'une portion 53 destinée à former la portion poreuse s'étendant de la face arrière 520 du substrat à former. En référence à la figure 8C, on assemble le substrat support sur sa face avant 510 avec une couche superficielle 51 de carbure de silicium monocristallin,
25 typiquement par un procédé du type Smart Cut™ tel que décrit plus haut.

Afin d'illustrer les variantes d'un tel mode de réalisation, un procédé plus complexe est illustré dans les figures 8D à 8I. Dans ce mode de réalisation, on forme d'abord un substrat support et on réalise par la suite un assemblage avec une couche superficielle 51 en carbure de silicium monocristallin.

30 Pour former le substrat support, on peut, en référence à la figure 8D, partir d'un substrat 50 de carbure de silicium polycristallin. On peut ensuite réaliser une porosification dudit substrat tel que décrite ci-dessus afin de former une zone poreuse 53 s'étendant à partir de la face arrière 520 du substrat 50. En référence à la figure 8E, la porosification peut être réalisée de telle sorte qu'uniquement une portion 53 s'étendant à partir de la face
35 arrière 520 du substrat présente une porosité, en conservant une portion 52 s'étendant à partir de la face avant 510 dans son état d'origine sans porosité. De manière alternative, on peut créer un gradient de porosité, de sorte que le taux de porosité augmente successivement ou par paliers de la face avant 510 vers la face arrière 520 du substrat 50.

Dans d'autres cas, en référence à la figure 8F, on réalise la porosification de manière homogène sur toute l'épaisseur du substrat comme illustré dans la figure 8B.

On peut ensuite, en référence à la figure 8G, réaliser une étape facultative de collage d'une couche 53B présentant un taux de porosité supérieur sur la face arrière 520 du substrat et créer ainsi un nouveau substrat support 531 comportant une nouvelle face arrière 521. La couche 53B présente un taux de porosité plus élevé que la portion 53 s'étendant de la face arrière 520 du substrat unique porosifié. Une telle couche est, par exemple, une couche en carbure de silicium fritté ou une couche en carbure de silicium porosifié avec un taux de porosité supérieur à celui de la portion 53 précédemment porosifiée, ou une combinaison de deux ou plusieurs couches poreuses. On forme ainsi une nouvelle face arrière 521 du substrat support 531 à former. En référence à la figure 8H, on peut, de manière facultative, réaliser une étape de porosification supplémentaire dans une portion 53C s'étendant à partir de la nouvelle face arrière 521 du substrat à former. Pour cette étape de porosification supplémentaire, on va choisir les paramètres de sorte que la portion 53C présente un taux de porosité plus élevé que la couche poreuse 53B dans son état de départ. Ainsi, la porosité du substrat support 532 augmente progressivement de sa face avant 510 jusqu'à sa face arrière 522.

On peut, de manière facultative, réaliser un ou plusieurs collages d'autres couches présentant des taux de porosité supérieurs sur la face arrière du substrat (non illustré).

On peut, de manière facultative, assembler une ou plusieurs couches présentant un taux de porosité inférieur sur la face avant du substrat (non illustré).

En référence à la figure 8I, on assemble le substrat support sur sa face avant 510 avec une couche superficielle 51 de carbure de silicium monocristallin.

Si aucune couche n'est assemblée sur la face avant du substrat 532, la couche superficielle 51 en carbure de silicium monocristallin peut être assemblée au substrat support 532 entre deux étapes quelconques du processus de formation du substrat support 532.

Dans certains modes de réalisation non illustrés, on réalise l'assemblage d'une partie du substrat support et de la couche superficielle en carbure de silicium monocristallin au cours de la formation du substrat support, avant la finalisation de toutes les étapes de la formation dudit substrat support.

D'autres modes de réalisation sont illustrées dans les figures 9A à 9B. En référence à la figure 9A, on peut former le substrat support à partir d'un substrat 60 en carbure de silicium fritté. Le carbure de silicium fritté comprend généralement des inclusions de carbone, il s'agit donc d'un matériau poreux dont les pores sont remplis de ces inclusions.

On peut, en référence à la figure 9B, assembler le substrat support 60 de carbure de silicium fritté avec une couche superficielle 61 de carbure de silicium monocristallin sur

sa face avant 610. Ainsi, le substrat en carbure de silicium fritté forme une seule zone poreuse 60 s'étendant à partir de sa face arrière 620.

De manière alternative, en référence à la figure 10A, on part du même substrat de départ 60 en carbure de silicium fritté. En référence à la figure 10B, on peut déposer une
5 couche 62 de carbure de silicium polycristallin sur la face avant 610 du substrat 60 en carbure de silicium fritté. Un tel dépôt peut par exemple être réalisé par un dépôt chimique en phase vapeur (PVD). Ainsi, le substrat 60 en carbure de silicium fritté est utilisé en tant que support et en tant que germe de cristallisation pour le carbure de silicium polycristallin. On peut, de manière optionnelle, créer une porosité dans la couche 62 de carbure de
10 silicium ainsi déposée, comme illustré dans la figure 10C. Dans ce cas, le taux de porosité créé dans la portion 62 déposée sur la face avant 610 est inférieur au taux de porosité dans le substrat initial 60 en carbure de silicium fritté. Dans certains cas, on maintient ladite couche 62 dans son état initial non-poreux.

De manière facultative, en référence à la figure 10D, on peut déposer une deuxième
15 couche 63 de carbure de silicium polycristallin sur la face arrière 620 du substrat en carbure de silicium fritté, formant un nouveau substrat support 630 comportant une nouvelle face arrière 621. On procède ensuite, en référence à la figure 10E, à une étape de porosification de la couche 63 en carbure de silicium polycristallin sur la face arrière 620, de sorte que la couche 63 sur la face arrière présente un taux de porosité plus important que le substrat 60
20 en carbure de silicium fritté.

On peut ensuite réaliser des étapes facultatives (non illustrées) de collage et/ou d'assemblage d'une ou plusieurs couches présentant un taux de porosité supérieur sur la face arrière du substrat, ou/ou d'une ou plusieurs couches présentant un taux de porosité inférieur sur la face avant du substrat.

25 On assemble, en référence à la figure 10F, le substrat support ainsi créé avec une couche superficielle 61 en carbure de silicium monocristallin sur la face avant 611 du substrat support.

Dans un autre mode de réalisation, en référence à la figure 11A, on part d'un substrat donneur 70 en carbure de silicium monocristallin dont une portion 71 sur la face
30 avant 710 est destinée à former la couche superficielle. On forme, en référence à la figure 11B, une zone de fragilisation 77 pour délimiter la portion 71 destinée à former la face avant du substrat à former. De préférence, la zone de fragilisation est créée par implantation d'atomes d'hydrogène et/ou d'hélium dans le substrat donneur.

En référence à la figure 11C, on assemble une portion 73 en carbure de silicium
35 polycristallin poreux sur la face avant 710. La porosité de la portion 73 peut être formée avant ou après l'assemblage de la portion 73 sur la face avant 71 du substrat donneur 70. Par exemple, la portion 73 peut être en carbure de silicium porosifié ou fritté avant le collage. De manière alternative, la portion 73 en carbure de silicium polycristallin peut être

déposée, par exemple par CVD ou par PVD, sur un substrat donneur 70 en carbure de silicium monocristallin, et une étape de porosification est réalisée sur la portion 73 après l'étape de dépôt.

Le taux de porosité de la portion 73 peut être homogène, sous forme d'un gradient ou plusieurs paliers, ou concerner uniquement une certaine épaisseur du substrat.

On provoque, en référence à la figure 11D, le détachement du substrat donneur 70 de la portion 71, par exemple par un traitement thermique. En référence à la figure 11E, la portion 73 forme le substrat support en carbure de silicium poreux, et la portion 71 forme la couche superficielle en carbure de silicium monocristallin du substrat finalisé.

Dans certains modes de réalisation, on part d'un substrat en carbure de silicium monocristallin destiné à former la couche superficielle. On forme ensuite le substrat support sur le substrat en carbure de silicium monocristallin, de sorte que la face avant du substrat est en contact avec le substrat en carbure de silicium monocristallin. La formation du substrat support peut comprendre une ou plusieurs étapes de dépôt, de porosification, de frittage et d'assemblage de plusieurs portions formant le substrat support. On peut ensuite procéder à un amincissement du substrat en carbure de silicium monocristallin tel que décrit ci-dessus.

On peut ensuite, à partir d'un tel substrat, former des puces pour des applications électronique de puissance et/ou radiofréquences. Quand le dispositif est conçu pour une application radiofréquence, les puces électroniques peuvent être formées dans une couche de carbure de silicium ou d'un nitrure du groupe III-N, par exemple un empilement de couches GaN/AlGaN/AlGaNInN délimitant un gaz d'électrons bidimensionnel. Une telle couche ou un tel empilement est porté par la couche superficielle en carbure de silicium monocristallin.

REFERENCES

- Y. Shishkin et al : Phorochemical etching of n-type 4H silicon carbide, Journal of Applied Physics 96, 2311, 2004
- Gautier et al : Electrochemical formation of porous silicon carbide for micro-device applications, Materials science forum, ISSN : 1662-9752, Vol 924, pages 943-946, 2018
- L.L. Snead et al, Journal of Nuclear Materials 371 (2007) 329-377

REVENDICATIONS

1. Substrat pour dispositif électronique de puissance ou radiofréquence, comprenant
- 5 ○ un substrat support (30) en carbure de silicium polycristallin présentant une face avant (10) et une face arrière (20), ledit substrat support (30) étant autosupporté, et
- une couche superficielle (1) de carbure de silicium monocristallin s'étendant sur la face avant (10) dudit substrat support (30),
- ledit substrat étant caractérisé en ce que le substrat support (30) présente au moins
- 10 une portion poreuse (3) s'étendant à partir de la face arrière (20), ladite portion poreuse (3) présentant un taux de porosité supérieur à 5 %.
2. Substrat selon la revendication 1, dans lequel le substrat support (30) présente une épaisseur supérieure à 50 μm , avantageusement supérieure à 80 μm , plus
- 15 avantageusement supérieure à 100 μm et encore plus avantageusement supérieure à 150 μm .
3. Substrat selon l'une des revendications 1 ou 2, dans lequel la portion poreuse (3) comprend une couche (3, 3A, 3C) de SiC porosifié.
- 20
4. Substrat selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel le substrat support (30) comprend une portion non poreuse (2A, 2B, 2C) entre la couche superficielle (1) de SiC monocristallin et la portion poreuse (3).
- 25
5. Substrat selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la portion poreuse (3) présente une partie arrière (3A, 3B, 3C) présentant un premier taux de porosité et une partie avant (2A, 2B, 2C) présentant un second taux de porosité inférieur au premier taux.
- 30
6. Substrat selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la portion poreuse (3) présente un gradient de porosité décroissant de la face arrière (20) vers la face avant (10).
- 35
7. Substrat selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la portion poreuse (3) présente des pores remplis d'un matériau présentant un module d'Young inférieur au module d'Young du carbure de silicium.

8. Substrat selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la portion poreuse (3) présente des pores, la distance moyenne entre lesdits pores étant supérieure à 10nm, de préférence supérieure à 50nm.
- 5 9. Dispositif électronique comprenant un substrat selon l'une quelconque des revendications précédentes et au moins un composant électronique de puissance ou radiofréquence formé dans ou sur la couche (1) superficielle de carbure de silicium monocristallin.
- 10 10. Dispositif électronique selon la revendication 9, comprenant en outre un dispositif d'évacuation de chaleur, le substrat étant brasé sur le dispositif d'évacuation de chaleur par l'intermédiaire d'un matériau d'apport de sorte que le matériau d'apport est en contact solidaire d'au moins une partie de la portion poreuse (3) sur la face arrière (20) du substrat support (30).
- 15 11. Procédé de fabrication d'un dispositif électronique de puissance ou radiofréquence comprenant :
- un substrat support (30) autosupporté en carbure de silicium polycristallin présentant une face avant (10) et une face arrière (20), et
 - 20 ○ une couche superficielle (1) de carbure de silicium monocristallin s'étendant sur la face avant (10) dudit substrat support (30),
- le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend une étape de formation, dans le substrat support (30), d'au moins une portion poreuse (3) s'étendant à partir de la face arrière (20), ladite portion poreuse (3) présentant un taux de porosité supérieur à 5 %.
- 25 12. Procédé selon la revendication 11, comprenant en outre une étape d'assemblage de la couche superficielle (1) et du substrat support (30).
- 30 13. Procédé selon la revendication 11 ou la revendication 12, dans lequel le substrat support (30) présente une épaisseur supérieure à 50 μm , avantageusement supérieure à 80 μm , plus avantageusement supérieure à 100 μm et encore plus avantageusement supérieure à 150 μm .
- 35 14. Procédé selon l'une quelconque des revendications 11 à 13, dans lequel la formation du substrat support (30) comprend une étape de porosification d'au moins une partie d'un substrat de base de carbure de silicium non poreux pour former la portion poreuse (3).

15. Procédé selon la revendication 14, dans lequel la porosification est effectuée sur l'ensemble du substrat de base pour former un substrat support (30) entièrement poreux.

5 16. Procédé selon l'une des revendications 14 ou 15, dans lequel la porosification est réalisée de sorte à former un gradient de porosité décroissant dans la portion poreuse (3) de la face arrière (20) vers la face avant (10).

10 17. Procédé selon l'une des revendications 14 à 16, dans lequel la porosification est réalisée de sorte à former une zone de collage présentant un taux de porosité inférieur à 40% sur la face avant (10) du substrat support (30).

15 18. Procédé selon l'une des revendications 11 à 17, comprenant une étape de comblement d'au moins une partie des pores de la portion poreuse (3) par un matériau présentant un module d'Young inférieur au module d'Young du carbure de silicium.

19. Procédé selon l'une des revendications 11 à 18, comprenant en outre une étape d'amincissement du substrat support (30) par la face arrière (20), de sorte que l'épaisseur de la portion poreuse (3) reste supérieure ou égale à 100 nm.