

Description

Titre de l'invention : Support en carbure de silicium polycristallin pour un substrat destiné à recevoir des dispositifs semi-conducteurs de puissance et substrat comprenant un tel support.

DOMAINE DE L'INVENTION

[0001] La présente invention concerne les substrats destinés à recevoir des dispositifs semi-conducteurs, notamment dispositifs servant des applications nécessitant une forte puissance électrique. Il peut s'agir de dispositifs à base de matériaux III-N, tel que le nitrure de gallium. L'invention concerne également un support particulièrement adapté à former un tel substrat.

ARRIERE PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION

[0002] Les transistors à base de matériaux III-N, du type HEMT (« High Electron Mobility Transistor » selon la terminologie anglo-saxonne ou transistor à haute mobilité d'électrons) trouvent certaines de leurs applications dans le domaine de la gestion d'une puissance électrique importante, par exemple comme interrupteurs dans les convertisseurs de puissance.

[0003] Comme cela est représenté schématiquement sur la [Fig.1], un tel composant 1 met conventionnellement en œuvre :

- un substrat 2 qui peut être typiquement une plaquette de silicium, de saphir ou de carbure de silicium;
- une couche tampon 3, généralement dopée pour être semi-isolante, formée sur le substrat 2;
- une hétérojonction constituée d'une couche canal 5 en GaN et d'une couche barrière 6 d'AlGaIn formées successivement sur la couche tampon;
- des structures d'électrodes de source S, de drain D et de grille G sur/dans l'hétérojonction.
- Un feuillet métallique M en contact ohmique avec la face arrière du support 2. Le feuillet M peut être le cadre de connexion (« lead frame » selon la terminologie anglo-saxonne souvent employée dans ce domaine) en cuivre d'un boîtier pour puce de semi-conducteur. Une couche d'adhésion B, par exemple une pâte d'argent fritté, peut être employée pour rendre adhérent de manière fiable la face arrière du support 2 au feuillet métallique M.

[0004] Le feuillet métallique M contribue à favoriser l'évacuation de la chaleur produite au niveau de l'hétérojonction au cours du fonctionnement du dispositif. Généralement, l'électrode de source S est électriquement reliée au substrat 2, de manière à éviter que le potentiel de ce substrat ne reste flottant. L'état électriquement passant du transistor

entre la source S et le drain D est commandé par la tension appliquée à la grille G. Dans le cas d'application de puissance, la tension V_{DS} qui s'applique aux bornes des électrodes de source S et de drain D peut alors atteindre quelques centaines de volts à plusieurs milliers de volts au blocage du transistor. Le courant de fuite circulant entre la source S et le drain D à l'état bloqué est faible, de l'ordre de quelques nanoampères. A l'état passant au contraire, plusieurs ampères peuvent circuler entre la source S et le drain D. En outre, la commutation entre l'état passant et l'état bloquant est très rapide, de l'ordre de quelques nanosecondes.

- [0005] Plusieurs problèmes limitent toutefois la diffusion de cette technologie.
- [0006] Comme on l'a vu, à l'état bloquant, une forte tension s'applique aux bornes des électrodes de source S et de drain D. Cela conduit à la formation d'un champ électrique dont les lignes pénètrent très en profondeur dans la couche tampon 3 et le substrat 2. Un champ électrique se développe alors entre l'électrode de drain D et le substrat 2, notamment dans l'épaisseur de la couche tampon 3, et entre la source S et le drain D. Afin d'éviter que l'intensité de ce champ n'excède la valeur critique (appelée champ de claquage) au-delà duquel le matériau ne peut plus le soutenir, on doit prévoir de séparer le drain D et la source S d'une distance suffisante d pour que, pour une tension donnée V_{DS} , l'intensité du champ $E = V_{DS}/d$ soit inférieure au champ de claquage. De la même manière, on peut prévoir de fournir une couche tampon 3 d'épaisseur suffisante pour que la valeur du champ électrique à l'interface entre la couche tampon 3 et le substrat 2 soit inférieure à la limite admissible par les matériaux en question.
- [0007] Il est relativement aisé de choisir la distance d séparant l'électrode de drain D de la source S lors de la conception du transistor. Ainsi, pour une tension V_{DS} de l'ordre de 400 V à 2000 V, on peut choisir une distance d de l'ordre de 5 à 20 microns. Mais l'augmentation de cette distance présente des limites, car cela tend à augmenter la taille du dispositif HEMT et donc à le rendre plus onéreux et moins compact.
- [0008] Fournir un dispositif 1 présentant une couche tampon 3 en matériaux III-N suffisamment épaisse (de l'ordre de 3 microns ou plus) est toutefois bien plus difficile, notamment lorsque le substrat 2 est choisi en silicium de grande dimension (200mm de diamètre) plutôt qu'en saphir, pour des raisons de disponibilité et de coût. Cela est notamment dû à la différence entre le coefficient de dilatation thermique du silicium et celui du matériau III-N qui forme la couche tampon. Cette couche est réalisée par dépôt à haute température sur le substrat de silicium, et le retour à l'ambiante conduit à mettre cette couche sous de très fortes contraintes, ce qui peut conduire à la fissurer, voire même à briser le substrat, si les contraintes sont trop importantes. Il est généralement difficile de fournir une couche tampon de plus de 3 microns d'épaisseur sur un substrat de silicium se présentant sous la forme d'une plaquette de 200 mm.
- [0009] On pourrait naturellement chercher à remplacer le substrat en silicium par un substrat

présentant un coefficient de dilatation thermique plus proche de celui du matériau de la couche tampon afin de lever cette contrainte. Il pourrait par exemple s'agir d'utiliser un substrat de carbure de silicium. Mais, outre le fait que ce matériau sous sa forme cristalline est particulièrement peu disponible et onéreux, il doit également être métallisé et traité pour former un contact ohmique avec le feuillet métallique M. Le document « Ohmic contacts to SiC » International Journal of High Speed Electronics and Systems, Vol. 15, No. 04, pp. 781-820 (2005) rappelle qu'un contact couche métallique-SiC est généralement de nature non-ohmique juste après le dépôt de la couche métallique. Il est alors nécessaire de traiter thermiquement, par exemple par un laser, cette interface pour favoriser la formation de siliciures, de carbures ou de phases ternaires conduisant à rendre le contact effectivement de nature ohmique. Il serait souhaitable de simplifier la mise en boîtier du dispositif.

[0010] Les documents US20130112997, EP3351660 et US20050269671 proposent des substrats comprenant des supports en carbure de silicium polycristallin.

OBJET DE L'INVENTION

[0011] Un but de l'invention est de proposer un support pour un substrat destiné à recevoir un dispositif semi-conducteur de puissance qui adresse, au moins en partie ces problèmes. Plus particulièrement, un but de l'invention est de proposer un support pour un substrat apte à recevoir une couche tampon relativement épaisse, de préférence présentant une épaisseur supérieure ou égale à 5 microns, et qui puisse s'intégrer dans un boîtier avec simplicité, sans nécessiter d'appliquer de traitement thermique sur la face qui reçoit la couche d'adhésion. Un but de l'invention est de proposer un substrat qui exploite un tel support et un composant semi-conducteur formé sur/dans un tel substrat.

BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

[0012] En vue de la réalisation de l'un de ces buts, l'objet de l'invention propose un support en carbure de silicium polycristallin pour un substrat destiné à recevoir un dispositif semi-conducteur de puissance. Le support comprend une première face, désignée « face avant » et une seconde face opposée à la première et désignée « face arrière ». Le support comprend :

- une première couche superficielle disposée directement sous la face avant et présentant une résistivité supérieure ou égale à 1 ohm.cm et ;
- une seconde couche superficielle disposée directement sous la face arrière et présentant une résistivité strictement inférieure à 1 ohm.cm.

[0013] Selon d'autres caractéristiques avantageuses et non limitatives de l'invention, prises seules ou selon toute combinaison techniquement réalisable :

- la seconde couche présente une épaisseur minimale de 10 micromètres ou plus

- la seconde couche présentant une concentration de dopants de type n, tel que de l'azote, supérieure à 10^{20} at/cm³ ;
- la concentration en dopant de type n croît de manière monotone depuis la face avant jusqu'à la seconde couche superficielle ;
- la première couche n'est pas intentionnellement dopée ou présente une concentration de vanadium supérieure à 10^{15} at/cm³ ;
- le support présente une épaisseur totale, entre la première face et la seconde face, comprise entre 200 micromètres et 1 mm ;
- le support se présente sous la forme d'une plaquette circulaire, avantageusement de 200 mm de diamètre

[0014] Selon un autre aspect, l'objet de l'invention propose un substrat destiné à recevoir un dispositif semi-conducteur comprenant un support tel que décrit précédemment et une couche germe, reporté sur la face avant du support

[0015] Selon d'autres caractéristiques avantageuses et non limitatives de cet aspect de l'invention, prises seules ou selon toute combinaison techniquement réalisable :

- la couche germe est constituée de nitrure de gallium, de carbure de silicium, de saphir ou de silicium (1,1,1) ;
- le substrat comprend une couche diélectrique de collage disposée entre, et en contact avec, le support et la couche germe, de préférence une couche diélectrique de collage en nitrure de silicium ;
- la couche germe contacte directement le support ;
- une couche tampon à base de nitrure de gallium, de préférence semi-isolante, est disposée sur la couche germe ;
- la couche tampon présente une épaisseur supérieure à 3 microns, préférablement supérieure à 5 micromètres et encore plus préférablement comprise entre 5 micromètres et 10 micromètres ;
- le substrat comprend une hétérojonction disposée sur la couche tampon, l'hétérojonction comprenant une couche canal et une couche barrière et étant susceptible de former un gaz 2D d'électrons.

[0016] Selon un autre aspect encore, l'invention propose un composant semi-conducteur comprenant un substrat tel que décrit précédemment et une structure de source, une structure de drain et une structure de grille disposée sur l'hétérojonction.

[0017] Avantageusement un feuillet métallique est disposé sous la face arrière du support, en contact ohmique avec une couche métallique déposée sur la seconde couche superficielle. Une couche d'adhésion, telle qu'une couche en pâte d'argent frittée, peut être disposée entre le feuillet métallique et la couche métallique déposée sur la seconde couche superficielle.

Brève description des dessins

- [0018] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée de l'invention qui va suivre en référence aux figures annexées sur lesquelles :
- [0019] [Fig.1]
- [0020] La [Fig.1] représente un substrat muni d'un transistor HEMT selon l'état de la technique ;
- [0021] [Fig.2a][Fig.2b]
- [0022] Les figures 2a, 2b représentent deux substrats destinés à recevoir des dispositifs semi-conducteurs conformes à l'invention ;
- [0023] [Fig.3]
- [0024] La [Fig.3] représente un composant semi-conducteur formé à partir d'un substrat conforme à l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

- [0025] Par souci de simplification de la description à venir, les mêmes références sont utilisées pour des éléments identiques ou assurant la même fonction dans les différents modes de mise en œuvre de l'invention ou dans l'exposé de l'état de la technique.
- [0026] Les figures 2a, 2b présentent deux modes de réalisation d'un substrat 2 destiné à recevoir un dispositif semi-conducteur de puissance et qui fait l'objet de la présente description. Comme on l'a brièvement exposé dans l'introduction de cette demande, ce substrat 2 est destiné à recevoir au moins dispositif comprenant une couche tampon en matériau III-N de plusieurs microns d'épaisseur, une hétérojonction comprenant une couche canal et une couche barrière sur la couche tampon et des structures de source, de drain et de grille disposée sur l'hétérojonction.
- [0027] Le substrat 2, lorsqu'il est encore dépourvu de dispositifs, se présente avantageusement sous la forme d'une plaquette circulaire, dont le diamètre est normé pour pouvoir être manipulé par des équipements standard de l'industrie du semi-conducteur. Avantageusement, on choisira un diamètre de 200 mm.
- [0028] Après les étapes de formation des dispositifs et leur singularisation, on forme, comme cela est bien connu en soi, des puces qui sont destinées à intégrer des boîtiers pour former un composant semi-conducteur. Le substrat 2, lorsqu'il est incorporé dans une puce, se présente alors sous la forme d'un parallélépipède rectangle dont les côtés sont de l'ordre du mm ou du cm.

Présentation générale du substrat 2

- [0029] Quelle que soit la forme adoptée par le substrat 2, celui-ci comprend d'une manière très générale un support 2a et une couche germe 2c reportée sur le support 2a. Dans le mode de réalisation de la [Fig.2a], une couche diélectrique de collage 2b est disposée entre, et en contact avec, le support 2a et la couche germe 2c. Dans le mode de

réalisation de la [Fig.2b], le substrat 2 est dépourvue de couche diélectrique de collage et la couche germe 2c est reportée directement sur le support 2a, en contact avec ce support 2a.

- [0030] Le support 2a est entièrement constitué de carbure de silicium polycristallin. Il comprend une première face, désignée « face avant » et une seconde face opposée à la première et désignée « face arrière ». La couche germe est reportée sur la face avant du support, directement ou via la couche diélectrique de collage 2c. Le support 2a a pour fonction principale de soutenir mécaniquement le reste de l'empilement conduisant à former un composant semi-conducteur fonctionnel, comme cela sera exposé dans une section ultérieure de cette description détaillée. A cet effet, il présente une épaisseur, prise entre sa face avant et sa face arrière, relativement importante et typiquement comprise entre 200 micromètres et 1 mm.
- [0031] La couche germe 2c, quant à elle, a pour fonction de fournir une surface exposée du support 2 qui soit apte à recevoir la couche tampon 3 du dispositif. La nature de cette couche est donc choisie pour offrir un paramètre de maille adapté à celui du matériau III-N formant la couche tampon 3, typiquement du nitrure de gallium, afin de faciliter sa croissance par épitaxie sur le support 2. Il peut donc s'agir de nitrure de gallium, de carbure de silicium, de saphir, de silicium (1,1,1), dans tous les cas dans leur forme monocristalline. Il n'est pas nécessaire que cette couche germe 2c soit épaisse, car seules ses propriétés de surface sont exploitées, et on choisira donc une épaisseur relativement faible, inférieure à 2 micromètres.
- [0032] La couche diélectrique de collage 2c a pour fonction de faciliter la fabrication du substrat 2, comme cela sera exposé ultérieurement. On préférera choisir un matériau diélectrique présentant un bon coefficient de diffusion thermique, tel que le nitrure de silicium, et on minimisera son épaisseur, de préférence inférieure à 1 micromètre, pour ne pas affecter les propriétés thermiques du substrat 2, comme cela sera présenté un peu plus loin.
- [0033] On note que la couche germe 2c est nettement moins épaisse que l'épaisseur du support 2a. En conséquence, et par effet de compliance, elle subit les déformations que lui impose le support 2a, lorsque par exemple le substrat 2 est exposé à des variations de température importantes de plusieurs centaines de degrés comme c'est le cas lors de la formation par épitaxie de la couche tampon 3. Dit autrement, la déformation du substrat 2 engendré par son exposition à une variation de température importante est dictée par le comportement du support 2a. C'est pour favoriser cet effet de compliance que l'on préfère choisir l'épaisseur de la couche germe relativement faible, inférieure à 2 micromètres comme on l'a déjà précisé.
- [0034] On note également que le carbure de silicium polycristallin dont est formé le support 2a présente un coefficient de dilatation thermique proche du matériau III-N dont est

composé la couche tampon 3, notamment lorsque cette couche tampon 3 est en nitrure de gallium. Aussi, après la formation par épitaxie à haute température de la couche tampon 3 et lorsque le substrat 2 muni de cette couche est ramené à la température ambiante, peu de contraintes se développent dans la structure. Il est donc possible de former une couche tampon 3 bien plus épaisse que celle qu'il est possible de former sur un substrat de l'état de la technique, en silicium. On peut notamment former une couche tampon 3 présentant une épaisseur d'au moins 3 micromètres, préférablement supérieure à 5 micromètres et encore plus préférablement comprise entre 5 micromètres et 10 micromètres.

- [0035] Enfin le carbure de silicium polycristallin dont est formé le support 2a (qui représente la majeure partie du substrat 2), possède des propriétés de diffusion thermique qui permettent une évacuation efficace de la chaleur produite au niveau du dispositif. On rappelle que ce dispositif étant préférablement destiné à traiter une puissance électrique importante, il a tendance à s'échauffer, et il est nécessaire d'évacuer la chaleur produite pour ne pas affecter son bon fonctionnement. Ainsi, le coefficient de diffusion thermique du carbure de silicium polycristallin est environ trois fois plus important que celui du silicium dont est constitué un substrat de l'état de la technique. En améliorant la conductivité thermique du substrat 2 en comparaison avec un substrat de l'état de la technique, on peut également augmenter la densité de puissance traitée au niveau du dispositif.
- [0036] Selon une caractéristique importante du support 2a, celui-ci comprend une première couche superficielle C1, disposée directement sous la face avant, qui présente une résistivité supérieure ou égale à 1 ohm.cm, et avantageusement supérieure à 10^3 ohms.cm. En présence d'un champ électrique d'intensité importante dont les lignes s'étendent dans la profondeur du substrat 2, et notamment dans cette première couche superficielle C1 du support, le caractère résistif de cette première couche superficielle C1 permet d'élever la tension de claquage. Le dispositif peut donc supporter des tensions drain-source importantes, de plus de 1000V, sans risquer d'endommager le dispositif.
- [0037] Pour obtenir ces valeurs de résistivité, la première couche C1 est de nature intrinsèque, c'est-à-dire qu'elle n'est pas intentionnellement dopée. Alternativement, on peut prévoir de la doper en vanadium dans une concentration supérieure à 10^{15} at/cm³, afin d'augmenter encore sa résistivité.
- [0038] Le support 2a comprend également une seconde couche superficielle C2, disposée cette fois directement sous la face arrière. Cette seconde couche superficielle C2 présente une résistivité strictement inférieure à 1 ohm.cm, et peut être inférieure à 50 milliohm.cm ou à 10 milliohm.cm. Cette faible résistivité, qui peut être obtenue par dopage de type n dans une concentration de dopants (par exemple d'azote) supérieure à

10^{20} at/cm³, permet de conférer à la face arrière du substrat un comportement presque métallique, et donc de recevoir une couche de métal ou d'alliages de métaux, par dépôt, sans nécessité de traitement thermique avant d'appliquer un procédé d'assemblage de cette face à un feuillet métallique, lors de l'étape de mise en boîtier.

- [0039] Il n'est pas nécessaire que cette seconde couche superficielle C2 soit très épaisse, elle présente néanmoins une épaisseur supérieure à 10 micromètres.
- [0040] Préférentiellement, la première couche C1 s'étend dans la profondeur du support 2 jusqu'à la seconde couche C2 fortement dopée. Il peut bien entendu exister une zone de transition entre ces deux couches C1, C2, afin de maîtriser le gradient de dopage nécessaire à cette transition. On peut notamment envisager que la concentration en dopant de type n dans le support 2a croisse de manière monotone depuis la face avant jusqu'à la seconde couche superficielle C2.
- [0041] Mais dans tous les cas, et quelle que soit la manière dont les dopants sont distribués dans l'épaisseur du support 2a, celui-ci présente une première couche superficielle C1 disposée directement sous la face avant, au plus proche du dispositif, résistive ou hautement résistive pour contrer les effets des champs électriques qui peuvent s'y développer. Le support 2a présente également une seconde couche superficielle C2, disposée directement sous la face arrière, très faiblement résistive pour lui donner un comportement métallique favorisant son assemblage robuste à un feuillet métallique lors de la mise en boîtier du dispositif.
- [0042] Fabrication du support en carbure de silicium polycristallin
- [0043] La fabrication d'un support en carbure de silicium polycristallin conforme à l'invention, et présentant donc la première et la seconde couche superficielle C1, C2, met en œuvre une technique de dépôt chimique en phase vapeur (CVD pour « Chemical Vapor Deposition »). Cette technique fait intervenir un mélange gazeux comprenant au moins un gaz précurseur de silicium (tel qu'un silane ou un chlorosilane) et/ou au moins un gaz précurseur de carbone (tel qu'un alcane ou un alcène), et/ou au moins un gaz précurseur de silicium et de carbone (tel que le méthyltrichlorosilane, abrégé MTCS) pour former la partie massive du support 2a.
- [0044] Elle fait également intervenir au moins un gaz dopant de type n pour, à minima, former la seconde couche superficielle C2. Dans le cas d'un dopage à l'azote de cette seconde couche superficielle C2, le gaz dopant pourra par exemple être le NH₃, le N₂H₄, le N₂.
- [0045] Pour le dopage au vanadium de la première couche superficielle C1, dans le cas où un tel dopage est prévu, on pourra prendre par exemple un gaz dopant en chlorure de vanadium (VCl₂, par exemple).
- [0046] Ces gaz peuvent être dilués dans un gaz porteur, qui peut être un gaz réducteur tel que l'hydrogène et/ou un gaz inerte tel que l'argon. A partir de ce mélange gazeux, la

couche de carbure de silicium polycristallin se forme sur un substrat dit « de croissance ».

- [0047] Le mélange gazeux est admis dans un réacteur se trouvant à haute température où les gaz précurseurs sont décomposés et réagissent sur la surface du substrat de croissance, préférentiellement en graphite isostatique à grain fin et purifié, pour former une couche de carbure de silicium polycristallin, par exemple de polytype 3C, dont les propriétés de résistance mécanique et thermique, le coefficient de dilatation thermique et la pureté sont parfaitement adaptés à son utilisation comme support 2a du substrat 2. Le polytype 3C peut, par ailleurs, être dopé avec de l'azote jusqu'à des niveaux très élevés, de l'ordre de 10^{20} atomes/cm³, et présenter ainsi une résistivité inférieure à 10 mOhm.cm.
- [0048] La température du réacteur lors du dépôt par CVD du carbure de silicium doit se situer entre environ 1000°C et environ 1600°C, préférentiellement entre environ 1100°C et environ 1400°C, voire entre environ 1200°C et environ 1400°C. Dans cette plage de température, les vitesses de dépôt peuvent évoluer dans des plages assez larges, du micromètre/h à plus de 100 micromètres/h. Avantageusement, la pression totale dans le réacteur ne dépasse pas 350 mbar, voire 300 mbar.
- [0049] Pour former un support 2a conforme à l'invention, on maîtrise le flux de gaz dopant de type n, pour former en début du procédé de croissance, éventuellement après la formation d'une épaisseur germe sur la surface de graphite, une couche de carbure de silicium polycristallin dopée suffisamment épaisse pour constituer à terme, après toutes les étapes de finition décrites ci-dessous, la seconde couche superficielle C2 du support 2a. Il peut s'agir de former une couche dopée de type n au cours de cette croissance, qui soit 2 à 10 fois plus épaisse que l'épaisseur attendue dans ce support, dont on rappelle qu'elle est typiquement supérieure à 10 micromètres après un éventuel amincissement du substrat.
- [0050] Au cours de cette phase de dépôt, après avoir formé l'épaisseur fortement dopée n, on peut soit interrompre le flux de gaz dopant de type n pour former le reste de l'épaisseur en carbure de silicium polycristallin intrinsèque, non intentionnellement dopé. Alternativement, on peut faire circuler un flux de gaz dopant à base de vanadium, afin d'augmenter encore la résistivité du matériau destiné à former la première couche superficielle C1.
- [0051] A l'issue de cette phase de dépôt, le substrat de croissance en graphite, revêtu par une couche de dépôt de carbure de silicium polycristallin, est usiné, puis oxydé à l'air typiquement à 900°C pour éliminer tout résidu de graphite et fournir un disque brut en carbure de silicium polycristallin. Notons que le retrait du graphite pourrait également être opéré par des techniques d'usinage uniquement mécaniques ou encore essentiellement par brulage/oxydation.

- [0052] On note qu'il est possible de former, au cours de la phase de dépôt, une épaisseur en carbure de silicium polycristallin très importante pour constituer un lingot de matériau. On peut alors prélever des tranches dans ce lingot, par découpe, chaque tranche formant un disque brut en carbure de silicium. Dans cette approche, on prendra soin d'insérer lors de la croissance du lingot, des couches intercalaires fortement dopées n (qui seront destinées à former des secondes couches superficielles C2) entre des couches intrinsèques ou dopées à base de vanadium (qui seront destinées à former des premières couches superficielles C1). On choisira de découper le lingot en des positions permettant, après toutes les étapes de finition décrites ci-dessous, de former des supports conformes à l'invention.
- [0053] En tout état de cause, un disque brut en carbure de silicium polycristallin résultant de la phase de dépôt est ensuite traité mécaniquement et thermiquement pour former le support 2a aux dimensions choisies. Il peut s'agir d'étapes d'aminçissement par rectification grossière puis fine. Elles peuvent être suivies d'une étape de polissage, afin de fournir un état de surface, en termes de rugosité, satisfaisant. Ces étapes de rectification ou de polissage, connues de l'état de la technique, visent notamment à éliminer une épaisseur suffisante du côté de la face du disque qui était en contact avec le graphite, pour retirer la zone de croissance initiale des cristaux, génératrice de fortes contraintes. Elles permettent également, par enlèvement de matière sur les deux faces du disque brut, d'obtenir un support 2a de carbure de silicium polycristallin qui se présente sous la forme d'une plaquette, par exemple une plaquette présentant un diamètre de 200 mm et une épaisseur typiquement comprise entre 350 micromètres et 500 micromètres, mais qui peut s'étendre par exemple entre 200 nm et 1 mm.

Fabrication du substrat 2

- [0054] Très généralement le substrat 2 peut être réalisé par un procédé de fabrication par report d'une couche germe sur le support 2a dont on vient de décrire la préparation. Un tel procédé de transfert comprend :
- l'assemblage, éventuellement via une couche diélectrique de collage 2b, de la première face du support 2a et d'une face principale d'un substrat donneur afin de constituer une structure intermédiaire;
 - l'élimination d'une partie du substrat donneur de la structure intermédiaire pour définir la couche germe 2c, reportée sur le support 2a.
- [0055] La couche diélectrique de collage 2b peut être formée, par dépôt et préalablement à l'étape d'assemblage, sur le substrat donneur ou sur la face avant du support 2a ou en partie sur l'un et l'autre de ces deux éléments. La couche diélectrique de collage 2b peut ainsi être réalisée selon une technique LPCVD (acronyme de l'expression anglo-saxonne « Low Pressure Chemical Vapor Deposition » ou dépôt chimique en phase vapeur à pression sous atmosphérique) ou PECVD (acronyme de l'expression

anglo-saxonne « Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition » ou dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma). Comme on l'a déjà précisé, cette couche est avantageusement en nitrure de silicium, pour des raisons de diffusivité thermique.

- [0056] Par « substrat donneur », on désigne un substrat constitué du matériau de la couche germe 2c, ou comprenant une épaisseur superficielle en ce matériau. Ainsi, le substrat donneur peut, à titre d'exemple, être formé d'un substrat massif de nitrure de gallium monocristallin, de silicium (1,1,1) monocristallin, de saphir ou de carbure de silicium monocristallin. A titre d'exemple complémentaire, il peut se présenter sous la forme d'un substrat composite formé d'un premier substrat sur lequel repose une épaisseur (au moins égale à celle de la couche germe 2c) de matériau dont on cherche à constituer la couche germe. Il peut notamment s'agir d'une épaisseur d'un matériau III-N tel que du nitrure de gallium formé sur un substrat de silicium (1,1,1).
- [0057] L'étape d'assemblage du procédé de fabrication par report de couche est avantageusement mise en œuvre par adhésion moléculaire. Comme cela est bien connu en soi, au cours d'un procédé d'adhésion moléculaire, la première face du support 2a et une face du substrat donneur (éventuellement recouvertes l'une et/ou l'autre d'une couche diélectrique destinée à former la couche diélectrique de collage 2b), parfaitement propres, planes et lisses, sont mises en contact intime pour favoriser le développement de liaisons moléculaires, par exemple de type van der Waals ou covalentes. L'assemblage des deux corps est alors obtenu sans utilisation d'un adhésif. Ces liaisons peuvent être renforcées par l'application d'un traitement thermique à la structure intermédiaire ainsi formée. Lorsque l'on souhaite former un substrat 2 dépourvue de couche diélectrique de collage, la première face du support 2a et la face du substrat donneur ne sont pas munies de couche diélectrique, et sont mise en contact intime directement l'une avec l'autre.
- [0058] L'étape d'élimination d'une partie du substrat donneur peut être réalisée par amincissement mécano-chimique de ce substrat.
- [0059] Préférentiellement toutefois, le substrat 2 est fabriqué par application de la technologie Smart Cut™, selon laquelle une couche destinée à former la couche germe 2c est délimitée par l'intermédiaire d'un plan de fragilisation formé par implantation d'espèces dites « légères » (typiquement de l'hydrogène et/ou de l'hélium) dans le substrat donneur. Après l'étape d'assemblage, cette couche est prélevée du substrat donneur par fracture au niveau du plan de fragilisation et ainsi reportée sur le support 2a.
- [0060] Que l'élimination d'une partie de l'épaisseur du substrat donneur soit réalisée par amincissement ou par fracture, on peut appliquer au substrat ainsi formé tout type de traitement de finition permettant de conformer la couche germe 2c à des spécifications d'épaisseur, d'uniformité d'épaisseur, de rugosité ou à tout autre type de spécifications.

[0061] Dans le substrat 2 ainsi formé, la face arrière du support 2, sous laquelle est disposée la seconde couche superficielle C2, forme également la face arrière du substrat. La première couche superficielle C1 est quant à elle disposée directement sous la couche germe 2c (ou directement sous la couche diélectrique de collage 2b, lorsque cette couche est présente).

[0062] On note que lorsque le matériau du substrat donneur est un matériau polaire, il est alors nécessaire de procéder à un double transfert de la couche germe 2c qui en est prélevée, en reportant tout d'abord cette couche germe 2c sur un substrat intermédiaire puis, au cours d'un second report, sur le support 2a en carbure de silicium polycristallin. De la sorte, la couche germe 2c présente, sur ce support 2a, sa polarité initiale. C'est notamment le cas lorsque le substrat donneur comprend du nitrure de gallium, ce matériau présentant dans sa forme la plus disponible, une face gallium que l'on souhaite généralement exposer, et une face azote.

Fabrication du composant semi-conducteur

[0063] Le substrat 2, sous la forme d'une plaquette, est exploité pour former au moins un composant semi-conducteur. Ainsi, et comme cela a été exposé dans un passage précédent et illustré sur la [Fig.3], on forme par épitaxie sur la face exposée de la couche germe 2c du substrat 2, une couche tampon 3 à base de matériau III-N. Préférentiellement, la couche principale 3 est dopée pour la rendre semi-isolante. Il peut s'agir par exemple d'un dopage au carbone dont la concentration dans la couche principale peut être comprise entre $5 \cdot 10^{18}$ et $5 \cdot 10^{19}$ at/cm³. Il peut s'agir également d'un autre dopage de type p, par exemple au fer ou au magnésium.

[0064] On peut prévoir de positionner dans la couche tampon 3 principalement en nitrure de gallium une ou des couches intercalaires, par exemple en AlGa₂N ou plus généralement en AlInGa₂N. Dans tous les cas, le paramètre de maille de la couche germe 2c et le coefficient de dilatation thermique du support en carbure de silicium polycristallin 2a sont particulièrement adaptés à la nature du matériau de la couche tampon 3 en matériau III-N. Il est en conséquence possible de former une épaisseur relativement importante de cette couche tampon 3 sur le substrat 2, par exemple une épaisseur supérieure à 3 microns, préférentiellement supérieure à 5 micromètres et encore plus préférentiellement comprise entre 5 micromètres et 10 micromètres.

[0065] Dans une étape suivante de préparation du composant semi-conducteur 1, on forme une hétérojonction sur la couche tampon 3. Comme cela est bien connu en soit, une telle hétérojonction combine au moins une couche canal 5 (par exemple en GaN) et une couche barrière 6 (par exemple en AlGa₂N). Un gaz d'électron 2D est susceptible de se développer à l'interface de ces deux couches. Puis, on dispose une structure de source S, une structure de drain D et une structure de grille G sur l'hétérojonction 5.

[0066] Il est possible de relier électriquement la structure de source S à la seconde couche

superficielle C2 afin d'exploiter celle-ci comme plan de masse du composant semi-conducteur 1.

- [0067] Dans certains cas, on peut prévoir d'amincir le substrat 2, en éliminant une épaisseur du support 2a du côté de la seconde couche superficielle C2. On prendra soin toutefois à préserver une épaisseur suffisante de cette couche C2, supérieure ou égale à 10 microns.
- [0068] Dans une étape suivante, on forme une couche métallique sur la face arrière du support 2a, en contact avec la seconde couche superficielle C2. Cette couche métallique peut être de toute nature qui convient, par exemple du titane, de l'aluminium, du nickel, de l'or ou un empilement constitué de ces matériaux. Du fait du fort dopage de la seconde couche superficielle C2 et de sa faible résistivité, le contact avec la couche métallique est de nature ohmique, sans qu'il soit nécessaire de traiter thermiquement cette interface, ce qui forme une caractéristique particulièrement avantageuse d'un support conforme à l'invention.
- [0069] On forme usuellement un grand nombre de dispositifs collectivement sur le substrat 2 en forme de plaquettes. Ces dispositifs sont ensuite singularisés, par découpe de la plaquette sur laquelle ils reposent, pour former des puces de semi-conducteur. Ces puces sont mises en boîtier pour former des composants semi-conducteurs 1, assemblées à un feuillet métallique M à l'aide d'un adhésif, tel qu'une pâte d'argent fritté, formant une couche d'adhésion B particulièrement fiable pour un composant de puissance.
- [0070] Bien entendu l'invention n'est pas limitée aux modes de mise en œuvre décrits et on peut y apporter des variantes de réalisation sans sortir du cadre de l'invention tel que défini par les revendications.

Revendications

- [Revendication 1] Support (2a) en carbure de silicium polycristallin pour un substrat (2) destiné à recevoir un dispositif semi-conducteur de puissance, le support comprenant une première face, désignée « face avant » et une seconde face opposée à la première et désignée « face arrière », le support comprenant :
- une première couche superficielle (C1) disposée directement sous la face avant et présentant une résistivité supérieure ou égale à 1 ohm.cm et;
 - une seconde couche superficielle (C2) disposée directement sous la face arrière et présentant une résistivité strictement inférieure à 1 ohm.cm.
- [Revendication 2] Support (2a) en carbure de silicium polycristallin selon la revendication précédente dans lequel la seconde couche superficielle (C2) présente une épaisseur de 10 micromètres ou plus.
- [Revendication 3] Support (2a) en carbure de silicium polycristallin selon l'une des revendications précédentes dans lequel la seconde couche superficielle (C2) présentant une concentration de dopants de type n, tel que de l'azote, supérieure à 10^{20} at/cm³.
- [Revendication 4] Support (2a) en carbure de silicium polycristallin selon la revendication précédente dans lequel la concentration en dopant de type n croît de manière monotone depuis la face avant jusqu'à la seconde couche superficielle (C2).
- [Revendication 5] Support (2a) en carbure de silicium polycristallin selon l'une des revendications précédentes dans lequel la première couche superficielle (C1) n'est pas intentionnellement dopée ou présente une concentration de vanadium supérieure à 10^{15} at/cm³.
- [Revendication 6] Support (2a) en carbure de silicium polycristallin selon l'une des revendications précédentes présentant une épaisseur totale, entre la première face et la seconde face, comprise entre 200 micromètres et 1 mm.
- [Revendication 7] Support (2a) en carbure de silicium polycristallin selon l'une des revendications précédentes se présentant sous la forme d'une plaquette circulaire, avantageusement de 200 mm de diamètre.
- [Revendication 8] Substrat (2) destiné à recevoir un dispositif semi-conducteur comprenant un support (2a) selon l'une des revendications

- précédentes et une couche germe (2c) reportée sur la face avant du support (2a).
- [Revendication 9] Substrat (2) selon la revendication précédente dans laquelle la couche germe (2c) est constituée de nitrure de gallium, de carbure de silicium, de saphir ou de silicium (1,1,1).
- [Revendication 10] Substrat (2) selon l'une des deux revendications précédentes comprenant une couche diélectrique de collage (2b) disposée entre, et en contact avec, le support (2a) et la couche germe (2c), de préférence une couche diélectrique de collage (2b) en nitrure de silicium.
- [Revendication 11] Substrat (2) selon la revendication 8 ou 9, dans laquelle la couche germe (2c) contacte directement le support (2a).
- [Revendication 12] Substrat (2) selon l'une des revendications 8 à 11 comprenant une couche tampon (3) à base de nitrure de gallium, de préférence semi-isolante, disposée sur la couche germe (2c).
- [Revendication 13] Substrat (2) selon la revendication précédente dans laquelle la couche tampon (3) présente une épaisseur supérieure à 3 microns, préférablement supérieure à 5 micromètres et encore plus préférablement comprise entre 5 micromètres et 10 micromètres.
- [Revendication 14] Substrat (2) selon l'une des revendications 12 et 13 comprenant une hétérojonction disposée sur la couche tampon (3), l'hétérojonction comprenant une couche canal (5) et une couche barrière (6) et étant susceptible de former un gaz 2D d'électrons.
- [Revendication 15] Composant semi-conducteur (1) comprenant un substrat (2) selon la revendication précédente et une structure de source (S), une structure de drain (D) et une structure de grille (G) disposée sur l'hétérojonction.
- [Revendication 16] Composant semi-conducteur (1) selon la revendication précédente comprenant un feuillet métallique (M) disposé sous la face arrière du support, en contact ohmique avec la seconde couche superficielle (C2).
- [Revendication 17] Composant semi-conducteur (1) selon la revendication précédente comprenant une couche d'adhésion (B), telle qu'une couche en pâte d'argent frittée, disposée entre le feuillet métallique (M) et la seconde couche superficielle (C2).
- [Revendication 18] Composant semi-conducteur (1) selon l'une des deux revendications précédentes comprenant une couche métallique disposée contre la seconde couche superficielle (C2).