

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①① N° de publication : **3 122 034**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national : **21 03986**

⑤① Int Cl⁸ : **H 01 L 23/12 (2020.12), H 01 L 21/71**

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ Procédé de fabrication d'une structure multicouche.

②② Date de dépôt : 16.04.21.

③⑦ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 21.10.22 Bulletin 22/42.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 14.04.23 Bulletin 23/15.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑦ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public —FR et SOITEC Société
Anonyme à Conseil d'Administration — FR.*

⑦② Inventeur(s) : ROUMANIE Marilyne, NAVONE
Christelle, QUENARD Sébastien, LANDRU Didier et
VEYTIZOU Christelle.

⑦③ Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public, SOITEC Société Anonyme à
Conseil d'Administration.

⑦④ Mandataire(s) : CABINET GERMAIN ET MAUREAU.

FR 3 122 034 - B1



Description

Titre de l'invention : Procédé de fabrication d'une structure multicouche

[0001] La présente invention se rapporte au domaine de la fabrication de substrats avancés pour des applications en électronique (par exemple pour des MEMS) en microélectronique, en optoélectronique (par exemple pour des LEDs), en électronique de puissance en RF, pour le packaging et les poignées de transfert. En particulier, l'invention concerne un procédé de fabrication d'une structure multicouche, résistante à des températures élevées, et notamment d'une structure de type SeOI (pour Semiconductor On Insulator) proposant une couche semi-conductrice séparée d'un substrat support par une couche épaisse aux propriétés modulables, par exemple pour l'intégration de composants RF. Selon un autre aspect, l'invention concerne également une structure multicouche obtenue par ledit procédé de fabrication.

[0002] La tendance actuelle tend à une intégration de plus en plus dense de composants et à la miniaturisation des dispositifs, ce qui augmente le besoin en substrats qui présentent des performances améliorées, dont notamment une très bonne capacité de dissipation thermique, ainsi qu'une excellente tenue aux variations de températures. La fabrication de structures toujours plus complexes impose en effet des recuits à des températures pouvant aller jusqu'à 1000°C sans compter que la température de travail peut atteindre 800°C, notamment en ce qui concerne les applications RF. Les différents matériaux nécessaires à l'élaboration de ces structures multicouches sont à l'origine de dilatations différentes au sein de la structure. Ceci génère des contraintes pouvant aller jusqu'à l'apparition de défauts, de fissures au sein des couches ou la délamination des couches. Ces contraintes excluent d'avoir recours à des polymères traditionnels, supportant au maximum une température de 400°C, pour obtenir le collage entre les couches.

[0003] L'un des buts de la présente invention est de proposer un procédé de fabrication d'une structure multicouche qui dépasse au moins l'un des verrous mentionnés ci-dessus. A cet effet, la présente invention propose un procédé de fabrication d'une structure multicouche destinée à des applications dans le domaine de la microélectronique, le procédé comprenant les étapes suivantes:

- [0004] – a) fourniture d'un premier substrat,
– b) dépôt d'une couche épaisse d'une formulation précurseur comprenant un polymère précéramique chargé en particules inorganiques sur le premier substrat,
– c) fourniture d'un second substrat,

- d) collage de la couche épaisse et du second substrat,
- e) amincissement du premier substrat ou du second substrat de sorte à obtenir une couche active, destinée notamment à recevoir des dispositifs électroniques,
- f) application d'un traitement thermique de pyrolyse de sorte à céramiser le polymère précéramique de la couche épaisse et obtenir un matériau composite à matrice céramique,

[0005] le taux de charge et la nature des particules inorganiques étant choisis de sorte que la couche épaisse présente un coefficient de dilatation thermique qui diffère, au plus, de 15% de celui du premier substrat et de celui du second substrat entre la température ambiante et la température de pyrolyse, avantageusement qui diffère, au plus de 10% de celui du premier substrat et de celui du second substrat et par exemple qui diffère au plus de 5 % de celui du premier substrat et de celui du second substrat.

[0006] Le procédé de fabrication selon l'invention permet ainsi l'obtention d'une structure multicouche dont les propriétés de la couche épaisse et notamment le coefficient de dilatation thermique (aussi connu sous l'acronyme anglo-saxon CTE pour Coefficient of Thermal Expansion) peuvent être modulés pour être compatible avec les CTE du premier substrat et du deuxième substrat. La structure peut être avantageusement utilisée dans des procédés ou applications impliquant des changements thermiques importants.

[0007] L'existence d'un grand choix de polymère précéramique et de particules inorganiques assure de pouvoir choisir le polymère adapté à la structure multicouche visée, par ses propriétés et sa compatibilité avec le substrat sur lequel il est déposé. En l'occurrence, le polymère précéramique et les particules inorganiques sont choisis pour qu'une fois réticulé et pyrolysé, le matériau composite résultant présente un coefficient de dilatation thermique proche de celui du premier et/ou du deuxième support. Ainsi, les matériaux constitutifs de la structure multicouche se dilatent et se contractent de façon similaire lors des changements de températures, ce qui évite des contraintes dans la structure pouvant endommager les couches par apparition de fissures, défauts, voire une délamination des couches. Selon les particules inorganiques utilisées, la couche épaisse peut être électriquement isolante tout en présentant une forte capacité de dissipation thermique. Ceci est particulièrement avantageux pour réguler la température de la structure, notamment lorsqu'elle est utilisée dans des applications comprenant des composants de type transistor, dont la température de travail peut atteindre 800°C. La couche épaisse selon l'invention permet ainsi une grande modularité.

[0008] De plus, le polymère précéramique présente l'avantage d'une excellente tenue à la température. En effet, un polymère précéramique est un polymère organique/inorganique qui est généralement utilisé afin de réaliser après traitement thermique à

haute température des objets céramiques dit PDC (acronyme anglo-saxon de « Polymer Derived Ceramics »).

- [0009] Ceci permet à la structure de subir des traitements thermiques à hautes températures, notamment lors de guérison des défauts générés par une implantation d'espèces ioniques pour l'amincissement d'un substrat par exemple. Ainsi, ce procédé garantit la stabilité de l'assemblage de la structure multicouche au cours de son procédé de fabrication, malgré notamment une étape de pyrolyse du polymère précéramique, et également de résister à une température de travail élevée (liée au composants électronique de la couche active).
- [0010] Le matériau composite ainsi obtenu présente une résistance mécanique suffisante pour les applications souhaitées. En effet, le polymère précéramique est un liant des particules inorganiques. Après céramisation par pyrolyse notamment aux alentours de 1000°C, il conduit à la formation d'une matrice céramique dans laquelle les particules inorganiques sont enrobées. La matrice céramique PDC obtenue est principalement amorphe, voire totalement amorphe, et forme un liant aux particules inorganiques réparties de manière homogène dans la matrice sans coalescence les unes aux autres. La pyrolyse permet également de compacter la couche épaisse. Aussi, le pré-frittage ou le frittage de la céramique qui s'opère à une température supérieure à celle de la pyrolyse n'est pas nécessaire pour les applications visées, ce qui limite avantageusement les coûts de fabrication. Ainsi, le procédé de fabrication permet d'atteindre de façon simple et fiable une structure multicouche stable aux températures élevées et dont les propriétés peuvent facilement être modulées pour les applications visées.
- [0011] Par l'expression 'couche active' on entend une couche en matériau semi-conducteur dans laquelle les événements électriques ont lieu.
- [0012] Par le terme 'céramiser' ou 'céramisation', et autres dérivés, on entend dans le présent document, la transformation par pyrolyse du polymère précéramique en une céramique non frittée.
- [0013] Avantagusement, la formulation précurseur de la couche épaisse déposée à l'étape a) comprend un taux de charge en particules inorganiques dans une plage allant de 50% à 80% en volume par rapport au volume du polymère précéramique. Ce taux de charge permet de conférer les propriétés souhaitées à la couche épaisse, notamment en terme de coefficient de dilatation thermique. Ceci permet également de limiter les pertes dimensionnelles du polymère précéramique lors de la céramisation. En effet l'utilisation de polymères précéramiques induit un changement dimensionnel important au cours de la pyrolyse permettant la conversion du polymère en céramique. Ceci génère des contraintes mécaniques résiduelles entraînant la formation de défauts, de fissures et parfois l'effondrement de la couche lorsque le polymère précéramique est mis en forme. La présence des charges permet ainsi de limiter la perte de volume.

- [0014] Par ailleurs, les taux de charge restent suffisamment bas pour garantir la présence d'une quantité suffisante de polymère précéramique dans la couche. Le matériau conserve son rôle de liant des particules inorganiques, avant et après céramisation.
- [0015] Selon une disposition, les particules inorganiques sont choisies parmi le Si_3N_4 , le SiC , l' AlN , l' Al_2O_3 et un mélange de ces particules inorganiques. Ces particules, considérées telles quelles ou en mélange, sont utilisées pour conférer au polymère précéramique et à la matrice céramique, un CTE voisin de celui des matériaux semi-conducteur pouvant être utilisés dans la structure multicouche.
- [0016] La taille des particules utilisées varie de quelques nanomètres à une centaine de micromètres, elle est surtout choisie en relation avec l'épaisseur de la couche souhaitée. Pour une couche de primaire d'accroche, une taille inférieure à 1 micromètre sera privilégiée tandis qu'il sera possible d'utiliser toute la plage précitée pour une couche épaisse de plusieurs centaines de micromètres.
- [0017] De manière concrète, le procédé comprend, avant l'étape d) de collage, une étape de rectification de la couche épaisse, de sorte à lisser la surface et atteindre l'épaisseur de couche souhaitée. Typiquement l'épaisseur de la couche épaisse est comprise entre 10 et 500 micromètres.
- [0018] Selon une disposition, le polymère précéramique de la formulation précurseur est choisi parmi les polysiloxanes, les polycarbosilanes, les polysilazanes, les polyborosilanes, les polysilsesquioxanes, les polysilylcarbodiimides, les polysilsesquicarbo-diimides, les polysilsesquiazane, les polyborosiloxanes, les polyborosilazanes et une combinaison de ces polymères. Le choix de la nature du polymère précéramique dépend des propriétés visées pour la structure multicouche souhaitée mais aussi de sa compatibilité avec le substrat sur lequel il est déposé.
- [0019] Les polymères précéramiques dérivés de polysiloxanes, de polycarbosilanes, et de polysilazanes peuvent contenir des métaux tel que le Hf, Zr, Ti, Al.
- [0020] Les matrices céramiques visées sont comprises parmi les SiO_xC_y , où x est inférieur à 2 et y est non nul, les SiCN , Si(M)OC , Si(M)C , Si(M)CN , et les SiBCN .
- [0021] Selon une possibilité, l'étape b) de dépôt de la couche épaisse est réalisée par enduction ou sérigraphie lorsque la formulation précurseur est liquide. Un solvant peut être ajouté à la formulation précurseur de sorte à obtenir une formulation précurseur liquide de la viscosité souhaitée. Il est choisi parmi le xylène, le MEK (pour Methyl Ethyl Ketone ou 2-butanone solvant disponible par exemple chez Sigma Aldrich, Supelco...) ou du Diestone DLS, (composition de solvant fournie par la société Socomore).
- [0022] Selon une autre possibilité, lorsque la formulation précurseur est solide, l'étape b) de dépôt de la couche épaisse est réalisée par thermopressage.
- [0023] Avantagusement, lorsque le premier et le second substrat sont en silicium, le

polymère précéramique utilisée est du SILRES® MK POWDER et les particules inorganiques sont en SiC, l'ensemble conduisant à une céramique de CTE très proche à celui du silicium.

- [0024] Selon un exemple particulier de réalisation du procédé de l'invention, le premier substrat et le deuxième substrat sont en silicium et la formulation précurseur est préparée par mélange d'un polymère précéramique SILRES® MK POWDER dans une proportion allant de 2 % à 4% en poids avec des particules inorganiques de SiC dans une proportion allant de 65 à 72% poids et un solvant, tel que le solvant Diestone DLS, dans une proportion allant de 24% à 33% en poids.
- [0025] Un mélange de particules inorganiques peut également être utilisé à la place du SiC, tel que du Si₃N₄ dans une proportion de 75-85% mélangé avec de l'Al₂O₃ dans une proportion de 15-25%.
- [0026] Un mélange de Si₃N₄ dans une proportion de 45-70% mélangé avec de l'AlN dans une proportion de 30-55% permet également d'obtenir une couche épaisse dont le CTE diffère de moins de 10% du silicium.
- [0027] Avantagement, le collage de l'étape d) entre la couche épaisse et le second substrat est réalisé par l'intermédiaire d'une couche de primaire d'accroche, formée au préalable sur le second substrat et/ou sur la couche épaisse. Cette couche permet d'améliorer l'énergie de collage entre la couche épaisse et le matériau du deuxième substrat. Ceci participe à la tenue mécanique de la structure multicouche lorsqu'elle est soumise à des étapes mécaniques, telle qu'une rectification. Le choix de la nature de la couche de primaire est réalisé pour conférer une résistance à la température de pyrolyse et obtenir une bonne accroche avec la couche épaisse. Elle est ainsi choisie parmi les polymères précéramiques, existant sous forme liquide ou solide, auquel il est possible d'ajouter un solvant de sorte à moduler la viscosité et faciliter son application.
- [0028] Selon une possibilité, la couche de primaire d'accroche présente une épaisseur comprise entre 1 et 10 micromètres. Cette épaisseur suffit pour atteindre son rôle de colle, et au-delà, elle est susceptible de se fissurer. Formée au préalable sur le second substrat et/ou sur la couche épaisse, la formulation précurseur comprend un matériau polymère précéramique d'accroche, tel que le polysiloxane SILRES® H62C disponible auprès de la société Wacker.
- [0029] Avantagement, lorsque le polymère précéramique d'accroche est déposé sur le second substrat, celui-ci est pré-réticulé avant la mise en contact avec la couche épaisse de sorte à permettre un bon collage. Cette étape est réalisée à une température inférieure à celle de réticulation du polymère considéré. Cette étape consiste en une étape de stabilisation du polymère précéramique qui permet d'atteindre un état juste avant l'état thermodurci du polymère. A ce stade, le polymère est déformable mais non soluble. Le polymère précéramique d'accroche pré-réticulé présente en effet quelques

fonctions non réticulées qui lui permettent de se lier à la couche épaisse.

- [0030] Lorsque la couche de primaire d'accroche est déposée sur la couche épaisse, le polymère précéramique de la couche épaisse est pré-réticulé au préalable, par exemple par application d'un traitement thermique à une température inférieure à la température de réticulation du polymère précéramique, typiquement entre 50 et 400°C.
- [0031] Selon une variante dans laquelle le polymère précéramique d'accroche (de la couche de primaire d'accroche) se présente sous forme de poudre solide, par exemple du SILRES® MK POWDER, il peut être dispensé sur la couche épaisse. Le collage aura lieu lorsque la poudre est mise en fusion.
- [0032] En variante, la couche de primaire d'accroche comprend un taux de charge allant jusqu'à 50% du volume total de la formulation de la précéramique d'accroche. Ceci permet de limiter le retrait de volume lors de la réticulation du polymère d'accroche et également fonctionnaliser la couche de primaire selon la nature de la charge et le taux de charge, tel que de prévoir une conductivité électrique avec Cu, Ag, Al ou thermique avec SiC, AlN, BN.
- [0033] Avantagement, le collage de l'étape d) comprend une étape de mise en contact de la couche épaisse et du second substrat de sorte à former un empilement et une étape i) de thermopressage dudit empilement. Cette étape permet de stabiliser le collage en augmentant l'énergie de collage entre la couche épaisse et le second substrat et la tenue mécanique de l'empilement devant conduire à la structure multicouche. Il est entendu dans le présent document que la mise en contact peut être réalisée par un contact direct de la couche épaisse avec le second substrat ou bien une mise en contact indirect, obtenu par l'intermédiaire d'une couche de primaire d'accroche, comme décrit plus haut.
- [0034] Selon une possibilité, l'étape i) de thermopressage comprend l'application d'un traitement thermique de réticulation à une température variant entre 100°C à 400°C et une pression inférieure à 500 kPa de sorte à obtenir la réticulation du polymère précéramique de la couche épaisse. L'utilisation d'une pression permet de s'affranchir de lourdes étapes de préparation des surfaces avant collage, toutefois plus la pression est élevée, plus les surfaces doivent être planarisées et exemptes de poussière pour éviter la casse du substrat. Par ailleurs, le polymère précéramique d'accroche est également réticulé par cette étape le cas échéant.
- [0035] Dans le cas particulier de l'utilisation d'un polymère précéramique SILRES® MK POWDER, le traitement thermique de réticulation est appliqué par une rampe de chauffage comprise entre 0,1 et 20°C/min et de préférence entre 0,5°C/min et 5°C/min et par exemple de 1°C/min.
- [0036] Selon une possibilité, l'amincissement selon l'étape e) du procédé est obtenu par la technologie Smart Cut™. Le procédé comprend avant l'étape b) une étape a1)

d'implantation d'espèces ioniques dans le premier substrat de sorte à créer un plan de fragilisation, et l'étape e) d'amincissement comprend une étape de fracture le long du plan de fragilisation.

- [0037] L'étape de fracture peut être obtenue par application d'un traitement thermique suivi ou non de l'application d'une contrainte mécanique. Un traitement thermique de pyrolyse est ensuite typiquement réalisé dans le prolongement du traitement de fracture, dans une atmosphère neutre, tel que sous argon, ce qui renforce l'interface de collage. Une rampe de chauffage est judicieusement appliquée selon les épaisseurs des couches, des coefficients de dilation thermique et les matériaux considérés de sorte à éviter les déformations dans la structure.
- [0038] L'étape i) de thermopressage peut participer au budget thermique de fracture selon l'étape e) le cas échéant.
- [0039] Selon une possibilité, le procédé comprend après l'étape a1) d'implantation, une étape a2) de dépôt d'une couche raidisseur sur la face implantée. Avantagement, la couche raidisseur est déposée avant l'étape b) de dépôt de la couche épaisse.
- [0040] De préférence, la couche raidisseur est formée en Si_3N_4 par une technique de dépôt à basse température, telle que la PECVD à 300°C sur une épaisseur comprise entre 500 nm et 4 microns. Le matériau de la couche raidisseur est stable à la température de pyrolyse, et présente un CTE voisin de celui des substrats. De plus, les conditions de dépôt utilisées préservent la zone implantée de sorte à ne pas générer de fracture à ce stade du procédé.
- [0041] En variante, le procédé comprend avant l'étape b) de dépôt de la couche épaisse, le dépôt d'une couche complémentaire de primaire d'accroche en polymère précéramique sur la couche raidisseur de sorte à améliorer le contact entre la couche épaisse et la couche raidisseur. Cette couche de primaire d'accroche complémentaire conduit également à procurer un effet raidisseur complémentaire. L'épaisseur de la couche de raidisseur peut être diminuée en conséquence.
- [0042] Selon une alternative à l'étape e) réalisée par fracture, le procédé prévoit un amincissement réalisé par rectification, de sorte à obtenir une épaisseur de couche active allant de 10 micromètres à 140 micromètres, avantagement de 20 à 120 micromètres, et par exemple de 90 micromètres à 110 micromètres.
- [0043] Avantagement, l'étape f) du procédé comprend l'application d'un traitement thermique de pyrolyse sous vide en présence d'azote ou sous atmosphère d'argon. La pyrolyse est effectuée sous atmosphère contrôlée. Une pyrolyse à l'air, en présence d'oxygène, génère par exemple la formation non souhaitée d'un oxyde souvent sous la forme d'une poudre. La température du traitement thermique de pyrolyse est inférieure à la température de frittage de la matrice céramique. Elle dépend de la nature du polymère précéramique utilisée.

- [0044] Selon un deuxième aspect, l'invention propose une structure multicouche destinée à des applications en microélectronique, la structure multicouche comprenant une couche épaisse disposée entre une couche active et un substrat support constitué de l'un parmi un premier substrat et un second substrat, la couche active provenant de l'amincissement de l'autre parmi le premier substrat et le second substrat, la couche épaisse comprenant, ou étant constituée en un matériau composite comportant, ou étant constitué en une matrice céramique dérivée d'un polymère et de particules inorganiques, la nature et le taux de charge en particules inorganiques du matériau composite étant choisis de sorte que la couche épaisse présente un CTE qui diffère au plus de 15% du CTE du matériau du substrat support et de celui de la couche active, notamment qui diffère au plus de 10% du CTE du matériau du substrat support et de celui de la couche active et par exemple qui diffère au plus de 5% du CTE du matériau du substrat support et de celui de la couche active.
- [0045] Ainsi configurée la structure multicouche présente une très bonne tenue mécanique entre la température ambiante et la température d'utilisation, par exemple 800-1000°C.
- [0046] Il est entendu dans le présent document que la céramique de la matrice céramique est une céramique dérivée de polymère provenant de la pyrolyse d'un polymère pré-céramique chargé en particules inorganiques. Ladite matrice céramique est dépourvue de tout frittage. Elle est majoritairement amorphe, voire totalement amorphe, ce qui diffère de la céramique frittée qui est majoritairement polycristalline.
- [0047] Avantagusement, le premier et le deuxième substrat sont constitués du même matériau.
- [0048] Selon une disposition, le premier substrat et/ou le deuxième substrat sont en silicium monocristallin.
- [0049] Selon une possibilité, le matériau de la couche active est choisi en matériau monocristallin en vue d'optimiser les performances des composants.
- [0050] Selon une autre possibilité, la structure multicouche comprend une couche active et un substrat support en silicium, et dans laquelle la couche épaisse est une matrice céramique de SiO_xC_y , avec x inférieur à 2 et y non nul, et les particules inorganiques sont constituées de SiC.
- [0051] Selon d'autres caractéristiques, le procédé de fabrication de la structure multicouche de l'invention et la structure multicouche elle-même, comporte une ou plusieurs des caractéristiques optionnelles suivantes considérées seules ou en combinaison :
- [0052] – La couche épaisse présente une épaisseur comprise entre 10 à 500 micromètres. Au-delà, le risque d'apparition de fissures augmente lors de la céramisation (autrement dit, lors de la pyrolyse).
- La couche épaisse est collée au substrat support ou à la couche active par

- l'intermédiaire d'une couche de primaire d'accroche.
- La couche de primaire d'accroche est formée à partir d'un polymère précéramique polysiloxane, tel que le SILRES® H62C ou le SILRES® MK POWDER,
 - La couche de primaire d'accroche est formée à partir d'une composition comprenant un polymère précéramique polysiloxane de SILRES® H62C dans une proportion allant de 70% à 80% en poids, dilué dans un solvant Diestone DLS dans une proportion allant de 20% à 30% en poids.
 - La couche de primaire d'accroche présente une épaisseur comprise entre 1 et 10 micromètres.
 - La couche active présente une épaisseur variable entre 1,4 micromètre et 100 micromètres.
 - La couche active obtenue par un amincissement par fracture présente avantageusement une épaisseur comprise entre 1,4 et 1,6 micromètres.
 - La couche active présente une épaisseur comprise entre 10 et 100 micromètres lorsqu'elle provient d'un amincissement du premier ou du second substrat par rectification.
 - Les matériaux du premier substrat et du second substrat sont choisis parmi les matériaux semi-conducteurs, notamment le Si, Ge, GaN, et/ou SiC.
 - Les matériaux du premier substrat et du deuxième substrat sont constitués de deux matériaux de nature différente.
 - Les matériaux du premier substrat et du deuxième substrat sont constitués de deux matériaux de nature identique.
 - Les matériaux du premier substrat et/ou du deuxième substrat sont monocristallins.

[0053] Ladite structure multicouche ainsi formée est apte à recevoir des traitements destinés à la fabrication de composants électroniques, telle qu'une rectification, un amincissement, un polissage mécano-chimique, une gravure, un dépôt de diélectrique ou de métal, un dépôt d'au moins une couche, dont une couche active destinée à recevoir au moins un composant électronique, une formation de motifs, une passivation, un traitement thermique, ou une combinaison d'au moins l'un de ces traitements.

[0054] D'autres aspects, buts et avantages de la présente invention apparaîtront mieux à la lecture de la description suivante de deux modes de réalisation de celle-ci, donnée à titre d'exemples non limitatifs et faite en référence aux dessins annexés. Les figures ne respectent pas nécessairement l'échelle de tous les éléments représentés de sorte à améliorer leur lisibilité. Des traits pointillés sont utilisés sur les figures de sorte à illustrer distinctement et clairement un plan de fragilisation dans une couche de matériau qui se présente sous une forme continue. Dans la suite de la description, par

souci de simplification, des éléments identiques, similaires ou équivalents des différentes formes de réalisation portent les mêmes références numériques.

- [0055] [fig.1] est une vue schématique illustrant une étape a1) d'implantation dans un premier substrat selon le premier mode de réalisation de l'invention,
- [0056] [fig.2] est une vue schématique illustrant une étape a2) de dépôt d'une couche raidisseur selon le premier mode de réalisation de l'invention,
- [0057] [fig.3] est une vue schématique illustrant l'étape b) de dépôt d'une couche épaisse selon le premier mode de réalisation de l'invention,
- [0058] [fig.4] est une vue schématique illustrant l'étape c) de fourniture d'un second substrat recouvert d'une couche de primaire d'accroche selon le premier mode de réalisation de l'invention,
- [0059] [fig.5] est une vue schématique illustrant l'étape i) de thermopressage d'une couche épaisse en contact avec le second substrat selon le premier mode de réalisation de l'invention,
- [0060] [fig.6] est une vue schématique illustrant l'étape e) d'amincissement le long d'un plan de fragilisation selon le premier mode de réalisation de l'invention,
- [0061] [fig.7] est une vue schématique illustrant une structure multicouche obtenue selon le premier mode de réalisation de l'invention,
- [0062] [fig.8] est une vue schématique illustrant l'étape b) de dépôt d'une couche épaisse selon un second mode de réalisation de l'invention,
- [0063] [fig.9] est une vue schématique illustrant une étape de thermopressage i) selon le mode de réalisation de la [fig.8],
- [0064] [fig.10] est une vue schématique illustrant l'étape d'amincissement e) selon le mode de réalisation de la [fig.8].
- [0065] Un premier mode de réalisation du procédé de l'invention est illustré aux figures 1 à 7, dans lequel une structure multicouche 100 est obtenue par la technologie Smart Cut™. Pour ce faire, et comme illustré à la [fig.1], un premier substrat 1 en silicium est fourni (étape a) puis implanté par des ions hydrogènes avec une énergie de 160 keV de sorte à obtenir un plan de fragilisation 2 assez profond dans le substrat 1 (étape a1). Une étape a2) de dépôt d'une couche raidisseur 3 en Si₃N₄ est ensuite réalisée sur la face implantée du premier substrat 1 ([fig.2]). Le dépôt est réalisé par une technique à basse température, telle que la PECVD à 300°C avec une épaisseur d'environ 4 micromètres. Ainsi constituée, le CTE de la couche raidisseur 3 est d'environ 3,3.10⁻⁶/°C, ce qui est compatible avec celui du silicium.
- [0066] Selon la [fig.3], une couche épaisse 4 est obtenue par enduction d'une formulation précurseur comprenant polymère précéramique de polysiloxane à 30% en volume et des particules inorganique de SiC (CTE de 4- 4,5.10⁻⁶/°C- source site internet Matweb.com) à 70% en vol. pour 100% du volume total de la formulation précurseur à

sec. Selon d'autres variantes de réalisation non illustrées, le taux de charge en volume des particules inorganiques est compris entre 50 et 70 % en vol. selon la nature des particules et les matériaux des substrats considérés.

- [0067] Plus particulièrement, la formulation précurseur est préparée par le mélange d'un polymère précéramique polysiloxane SILRES® MK POWDER fourni sous forme de poudre par la société Wacker dans une proportion d'environ 2,4 % en poids avec un solvant de Diestone DLS dans une proportion d'environ 27,9% en poids, et des particules inorganiques de SiC dans une proportion de 69,7% poids. Cette composition de formulation précurseur présente un CTE qui diffère de moins de 10% avec celui du silicium, compris entre 3 et $4.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ entre 200°C et 1000°C selon J. Haisman (applied Optics 1999). Selon une autre variante, les particules inorganiques de SiC sont remplacées par un mélange de Si_3N_4 (CTE de $3,3.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) dans une proportion de 75-85% en volume avec de l' Al_2O_3 (CTE de $8,2.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) dans une proportion de 15-25% en volume. Selon encore une autre variante, les particules inorganiques de SiC sont remplacées par un mélange de Si_3N_4 dans une proportion de 45-70% vol. avec de l' AlN (CTE de $5,5.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ entre 25 et 1000°C d'après le site internet matweb) dans une proportion de 30-55% vol.
- [0068] Le solvant de la couche épaisse 4 est ensuite évaporé à température ambiante puis la couche épaisse 4 est rectifiée de sorte à l'amincir jusqu'à l'épaisseur souhaitée et aplanir la surface. L'épaisseur typique de la couche épaisse 4 est comprise entre 10 et 500 micromètres après évaporation du solvant, selon les applications souhaitées.
- [0069] Selon une variante de réalisation non illustrée, le solvant est évaporé en étuve placée entre 30 et 100°C.
- [0070] Selon une autre variante non illustrée, le dépôt de la couche épaisse 4 est réalisée par thermopressage lorsque la formulation précurseur à base de SILRES® MK POWDER et de SiC ne contient pas de solvant.
- [0071] Comme illustré à la [fig.4], un second substrat 5 de silicium est fourni selon l'étape c) du procédé. Une couche de primaire d'accroche 6 est déposée en surface pour atteindre une épaisseur de 10 micromètres de sorte à faciliter le collage avec la couche épaisse 4. Cette couche de primaire est choisie en un polymère précéramique d'accroche de sorte à résister au traitement thermique élevé et à faciliter l'accroche et le collage avec la couche épaisse 4, elle-même en polymère précéramique. Il s'agit ici d'un polysiloxane, le SILRES® H62C disponible sous forme liquide chez le fournisseur Wacker (75% en poids de la formulation précurseur totale), il est dilué par un solvant Diestone DLS (25% en poids de la formulation précurseur totale). Selon d'autres possibilités non représentées, la formulation précurseur de la couche de primaire d'accroche 6 est enrichie de particules métalliques, céramiques ou polymères, selon les propriétés visées et/ou pour limiter le retrait en volume lors de la pyrolyse.

- [0072] Une étape de pré-réticulation est appliquée sur cette couche de primaire d'accroche 6 par application d'un traitement thermique à une température de 175°C pendant 1 heure. Cette étape permet de prédurcir le polymère précéramique d'accroche à une température inférieure à la température de réticulation, de sorte à conférer des propriétés adhésives permettant le collage avec la couche épaisse 4, sans diffuser dans celle-ci. Selon une autre disposition non illustrée, la couche de primaire d'accroche 6 est déposée sur la couche épaisse 4 pré-réticulée au préalable, en vue d'un collage avec le second substrat 5 support.
- [0073] Selon encore une autre variante non illustrée, la couche de primaire d'accroche 6 est déposée sur la couche raidisseur 3 avant le dépôt de la couche épaisse 4, ce qui permet une bonne accroche entre la couche raidisseur 3 et la couche épaisse 4 mais également de compléter l'effet raidisseur de la couche raidisseur 3 en comblant la porosité de la couche épaisse 4.
- [0074] Selon une autre possibilité non illustrée, le procédé est dépourvu d'une étape de formation d'une couche de primaire d'accroche 6, la nature des matériaux choisis et les conditions permettent d'obtenir une énergie de collage suffisante pour les opérations ultérieures souhaitées même en l'absence de cette couche.
- [0075] Selon l'étape d) du procédé illustré à la [fig.5], la couche épaisse 4 est mise en contact avec le second substrat 5 par l'intermédiaire de la couche de primaire d'accroche 6 et forme un empilement 10. Puis une étape i) de thermopressage est appliquée sur l'empilement 10, sur une durée de 4 heures. La pression appliquée est de 470kPa et le traitement thermique est réalisé à une température de 200°C permettant la réticulation et un premier compactage du SILRES® MK POWDER et également celle du SILRES® H62C. La température de réticulation est appliquée par une rampe de chauffage allant classiquement entre 0,1 à 20°C/min. Elle est de 1°C/min dans cet exemple précis.
- [0076] Comme illustré à la [fig.6], une étape e) d'amincissement est ensuite réalisée par application d'un budget thermique de fracture de sorte à obtenir la séparation le long du plan de fragilisation 2. Il est appliqué sous forme d'une rampe de chauffage de 5°C/min avec un palier à 300°C et à 500°C pendant 1h dans cet exemple précis. Une couche active 7 de silicium d'une épaisseur de 1,5 micromètre est ainsi obtenue.
- [0077] Enfin, comme illustré [fig.7], le procédé comprend une étape f) de traitement thermique de pyrolyse sous argon jusqu'à atteindre la température de céramisation du SILRES® MK POWDER avec une rampe de chauffage de 1°C/min jusqu'à 1000°C comprenant deux paliers de 1 heure chacun à 600°C et à 800°C, et pendant lesquels la température descend librement. Le traitement thermique à 1000°C permet également de guérir les défauts d'implantation dans le silicium. La couche épaisse 4 est également compactée, son épaisseur initiale est environ divisée par deux. Une structure mul-

ticouche 100 est ainsi obtenue, elle comprend, de la surface vers la base, une couche active 7 en silicium, une couche raidisseur 3 de Si_3N_4 , une couche épaisse 4 d'un matériau composite à matrice céramique amorphe, non frittée et chargée de particules de SiC , une couche de primaire d'accroche 6 et un second substrat 5 de silicium.

[0078] Un deuxième mode de réalisation de l'invention est maintenant décrit en liaison avec les figures 8 à 10. Ce mode de réalisation diffère du précédent notamment en ce que l'étape d'amincissement e) est obtenue par une opération de rectification du premier substrat 1 ou du second substrat 5. Comme illustré à la [fig.8], une couche épaisse 4 d'une formulation précurseur est déposée par sérigraphie sur un premier substrat 1 de silicium monocristallin. La formulation précurseur est constitué d'un mélange de SILRES MK POWDER (50% en volume) et de particules inorganiques (50% en volume) de Si_3N_4 et de Al_2O_3 dans une proportion respectivement de 80/20, dans lequel le solvant Diestone DLS est ajouté de sorte à atteindre la viscosité souhaitée pour un dépôt par sérigraphie. Après séchage du solvant à l'ambiante, un second substrat 5 de silicium polycristallin recouvert d'une couche de primaire d'accroche 6 en polymère précéramique pré-réticulé est fourni un vue de la mise en contact et du collage avec la couche épaisse 4. Une étape i) de thermopressage est réalisée à une température de réticulation du polymère précéramique de sorte à stabiliser l'empilement 10 obtenu ([fig.9]). Puis une étape e) de rectification est réalisée sur le premier substrat 1 de sorte à obtenir une couche active 7 en silicium monocristallin présentant une épaisseur d'environ 20 micromètres. Notons dans ce cas où l'amincissement est réalisé par rectification que la présence d'une couche raidisseur 3 n'est pas nécessaire. Un traitement de pyrolyse à 1000°C est effectuée (étape f) avec une rampe de chauffage de $1^\circ\text{C}/\text{min}$ comprenant deux palliers à 600°C et à 800°C . Les deux palliers ont une durée de 1 heure chacun pendant lesquels la température est laissée descendre librement. Ainsi est obtenue une structure multicouche 100 comprenant de sa base vers sa surface :

- [0079] - un substrat support constitué du second substrat 5 recouvert d'une couche de primaire d'accroche 6,
- [0080] - une couche épaisse 4 d'un matériau composite à matrice céramique de SiOC amorphe, dépourvue de frittage, comprenant des charges inorganiques de Si_3N_4 et de Al_2O_3 et présentant un épaisseur de 100 micromètres, et
- [0081] - une couche active 7 en Si monocristallin d'une épaisseur de 20 micromètres. La couche épaisse 4 présente avantageusement un CTE qui diffère au plus de 15% du CTE du matériau du substrat support ([fig.10]).
- [0082] Ainsi, la présente invention propose un procédé de fabrication d'une structure multicouche simple à mettre en œuvre. Grâce au choix de la nature et de l'épaisseur des couches, la structure est résistante aux températures élevées et capable d'une dis-

sipation thermique importante. D'autres propriétés peuvent être obtenues par un choix judicieux du polymère précéramique utilisé, comme celui du taux et de la nature des charges inorganiques, tout en conservant les caractéristiques souhaitées concernant les CTE des différentes couches.

Revendications

[Revendication 1] Procédé de fabrication d'une structure multicouche (100) destinée à des applications dans le domaine de la microélectronique, le procédé comprenant les étapes suivantes:

- a) fourniture d'un premier substrat (1),
- b) dépôt d'une couche épaisse (4) d'une formulation précurseur comprenant un polymère précéramique chargé en particules inorganiques sur le premier substrat (1),
- c) fourniture d'un second substrat (5),
- d) collage de la couche épaisse (4) et du second substrat (5),
- e) amincissement du premier substrat (1) ou du second substrat (5) de sorte à obtenir une couche active (7),
- f) application d'un traitement thermique de pyrolyse de sorte à céramiser le polymère précéramique de la couche épaisse (4) et obtenir un matériau composite à matrice céramique,

le taux de charge et la nature des particules inorganiques étant choisis de sorte que la couche épaisse (4) présente un coefficient de dilatation thermique qui diffère, au plus, de 15% de celui du premier substrat (1) et de celui du second substrat (5), entre la température ambiante et la température de pyrolyse.

[Revendication 2] Procédé de fabrication d'une structure multicouche (100) selon la revendication 1, dans lequel le collage de l'étape d) entre la couche épaisse (4) et le second substrat (5) est réalisée par l'intermédiaire d'une couche de primaire d'accroche (6), formée au préalable sur le second substrat (5) et/ou sur la couche épaisse (4).

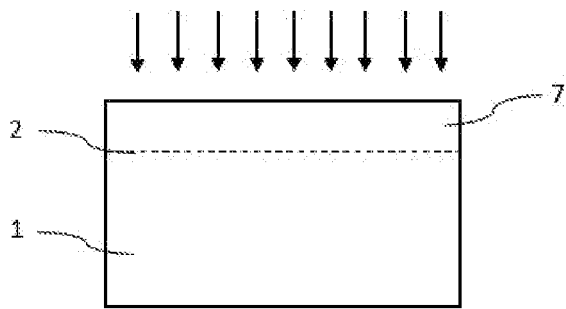
[Revendication 3] Procédé de fabrication d'une structure multicouche (100) selon l'une des revendications 1 à 2, dans lequel le collage de l'étape d) comprend une étape de mise en contact de la couche épaisse (4) et du second substrat (5) de sorte à former un empilement (10) et une étape i) de thermopressage dudit empilement (10).

[Revendication 4] Procédé de fabrication d'une structure multicouche (100) selon l'une des revendications 1 à 3 dans lequel la formulation précurseur comprend un taux de charge en particules inorganiques dans une plage allant de 50% à 80% en volume par rapport au volume du polymère précéramique.

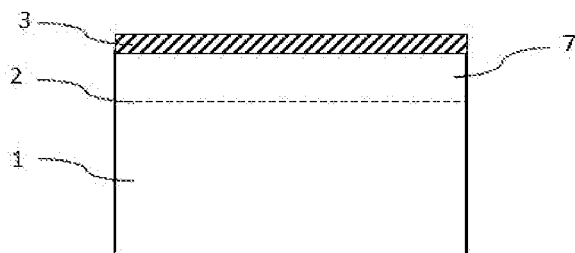
- [Revendication 5] Procédé de fabrication d'une structure multicouche (100) selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel les particules inorganiques sont choisies parmi le Si_3N_4 , le SiC , l' AlN , l' Al_2O_3 et un mélange de ces particules inorganiques.
- [Revendication 6] Procédé de fabrication d'une structure multicouche (100) selon l'une des revendications 1 à 5, dans lequel le polymère précéramique de la formulation précurseur est choisi parmi le groupe comprenant les polysiloxanes, les polycarbosilanes, les polycarbosiloxane, les polysilazanes, les polysilsesquioxanes, les polysilylcarbodiimides, les polysilsesquicarbodiimides, les polysilsesquiazane, les polyborosilanes, les polyborosiloxanes, les polyborosilazanes, et une combinaison de ces polymères.
- [Revendication 7] Procédé de fabrication d'une structure multicouche (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle l'étape b) de dépôt de la couche épaisse (4) est réalisée par enduction ou sérigraphie lorsque la formulation précurseur est liquide.
- [Revendication 8] Procédé de fabrication selon l'une des revendications 1 à 7, comprenant avant l'étape b) une étape a1) d'implantation d'espèces ioniques dans le premier substrat (1) de sorte à créer un plan de fragilisation (2), et dans lequel l'étape e) d'amincissement comprend une fracture le long du plan de fragilisation (2).
- [Revendication 9] Procédé de fabrication selon la revendication 8, comprenant après l'étape a1) d'implantation, une étape a2) de dépôt d'une couche raidisseur (3) sur la face implantée.
- [Revendication 10] Procédé de fabrication d'une structure multicouche (100) selon l'une des revendications 1 à 9, dans lequel l'étape e) d'amincissement est réalisée par rectification, de sorte à obtenir une épaisseur de couche active (7) allant de 10 micromètres à 140 micromètres.
- [Revendication 11] Structure multicouche (100) destinée à des applications en microélectronique, la structure multicouche (100) comprenant une couche épaisse (4) disposée entre une couche active (7) et un substrat support constitué de l'un parmi un premier substrat (1) et un second substrat (5), la couche active (7) provenant de l'amincissement de l'autre parmi le premier substrat (1) et le second substrat (5), la couche épaisse (4) comprenant un matériau composite comportant une matrice céramique dérivée d'un polymère et de particules inorganiques, la nature et le taux de charge en particules inorganiques du matériau composite étant choisis de sorte que la couche épaisse (4) présente un CTE qui diffère au plus de 15% du

CTE du matériau du substrat support et de celui de la couche active (7).

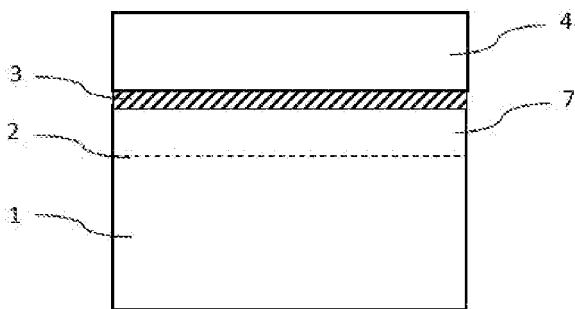
[Fig. 1]



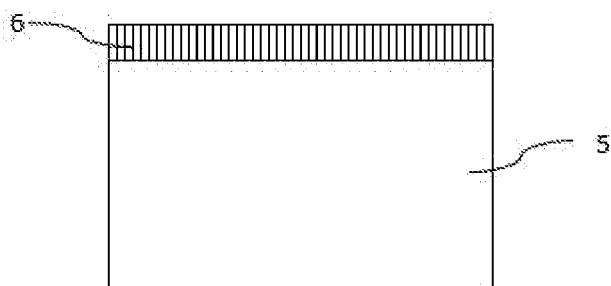
[Fig. 2]



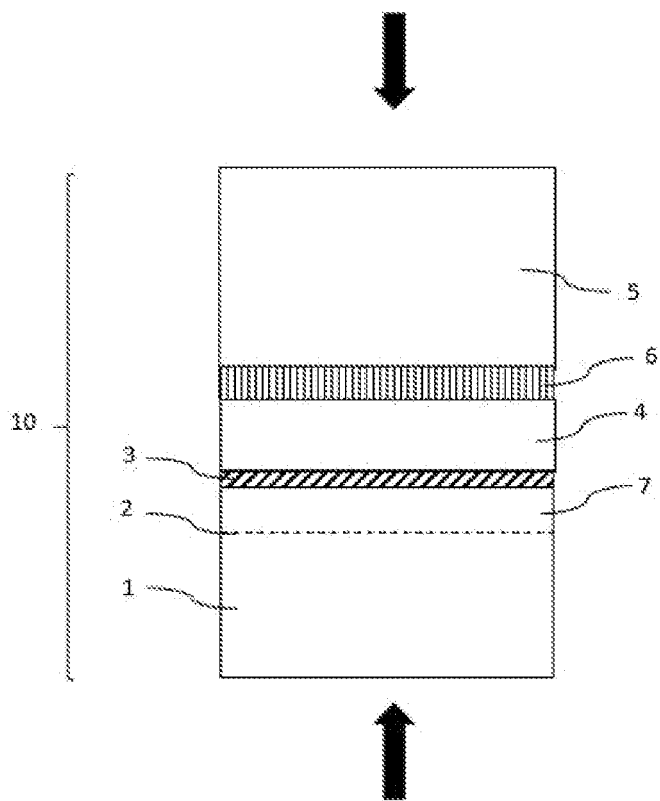
[Fig. 3]



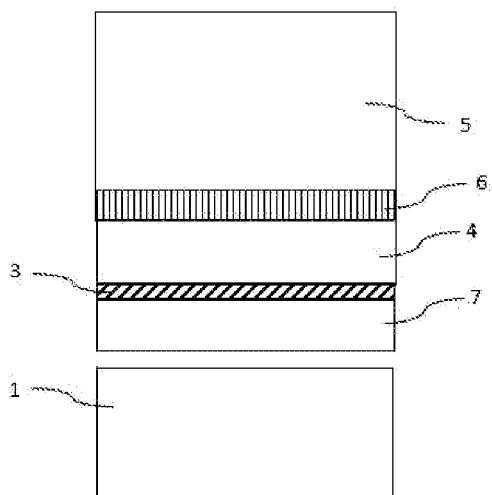
[Fig. 4]



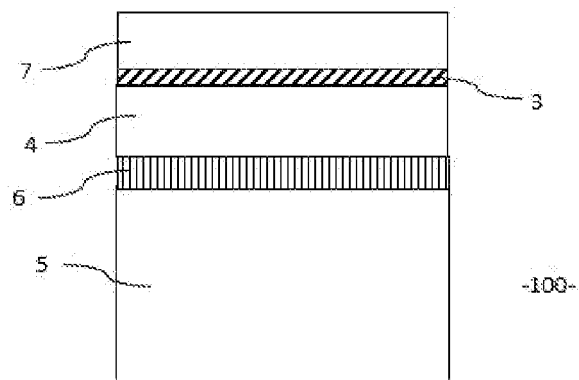
[Fig. 5]



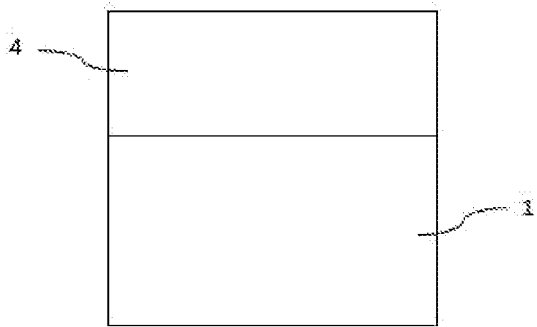
[Fig. 6]



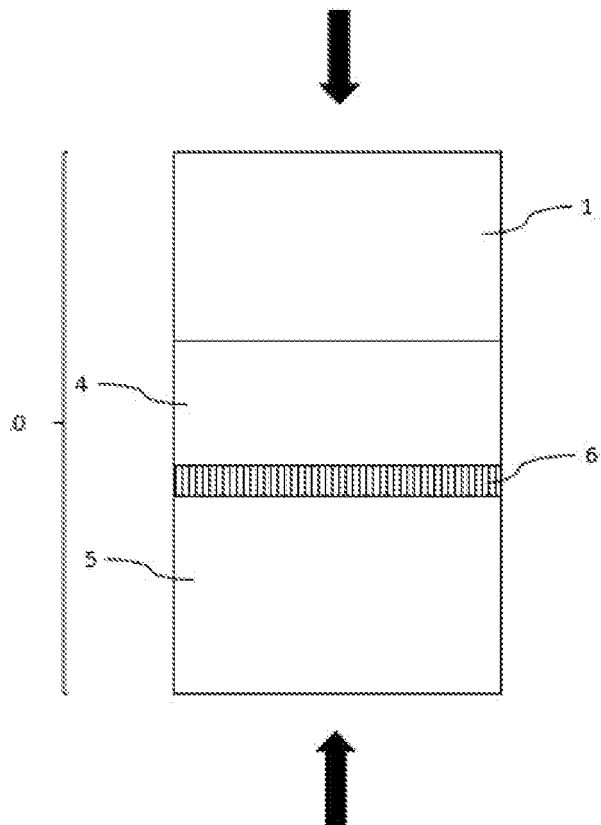
[Fig. 7]



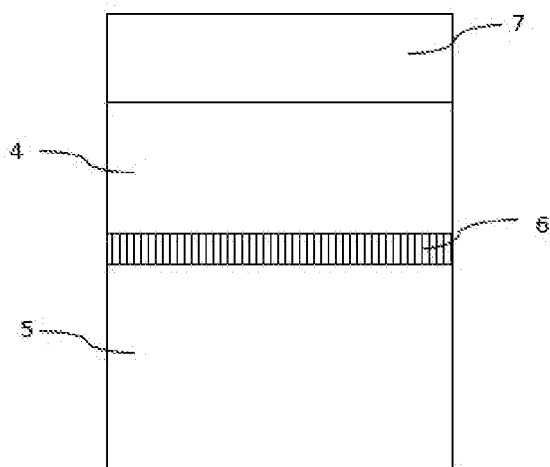
[Fig. 8]



[Fig. 9]



[Fig. 10]



RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

NEANT

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

US 2017/033011 A1 (RUPP ROLAND [DE] ET AL)
2 février 2017 (2017-02-02)

US 2011/073236 A1 (LEE SANG IN [US])
31 mars 2011 (2011-03-31)

US 2015/171045 A1 (BERGER RUDOLF [DE] ET AL)
18 juin 2015 (2015-06-18)

FR 3 102 608 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR])
30 avril 2021 (2021-04-30)

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT