

PROCEDE DE TRANSFERT DE PUCES

DOMAINE TECHNIQUE

L'invention concerne un procédé de transfert de puces d'un substrat, dit pseudo-substrat donneur, sur un substrat receveur.

ETAT DE LA TECHNIQUE

Dans le domaine de la microélectronique, de l'optique ou de l'optoélectronique, la conception de structures multicouches nécessite parfois de transférer des pavés se présentant sous forme de portions d'une couche d'un substrat donneur sur un substrat support ou substrat receveur.

Ce type de procédé est généralement appelé procédé de pavage, et met en jeu un transfert partiel d'une couche prélevée dans le substrat donneur pour former un ou plusieurs pavés agencés selon un motif ou à un emplacement prédéterminé sur le substrat support.

Un tel pavage peut être rendu nécessaire par une différence de taille entre le substrat donneur et le substrat support. En effet, du fait de cette différence de taille, il n'est pas possible de transférer une couche du substrat donneur recouvrant la totalité de la surface du substrat support.

Un procédé de transfert de couche bien connu est le procédé Smart Cut™, dans lequel on forme par implantation d'espèces atomiques dans le substrat donneur une zone de fragilisation délimitant la couche à transférer, on colle le substrat donneur sur le substrat support et on détache le substrat donneur le long de la zone de fragilisation pour transférer la couche du substrat donneur sur le substrat support. Cependant, ce procédé suppose que le substrat donneur et le substrat support présentent une taille identique.

Or, si des substrats de silicium sont disponibles avec une taille relativement grande, typiquement un diamètre de 300 mm, d'autres matériaux d'intérêt n'existent actuellement que sous la forme de substrats massifs de plus petite taille, par exemple de 10 ou 15 cm de diamètre. Par ailleurs, ces matériaux d'intérêt sont parfois particulièrement onéreux, de sorte qu'il est souhaitable de minimiser les éventuels déchets formés lors du transfert. Tel est le cas en particulier des matériaux semi-conducteurs III-V, comprenant les nitrures (par exemple pour ce qui est des composés binaires, le nitrure d'indium (InN), le nitrure de gallium (GaN) et le nitrure d'aluminium (AlN)), les arséniures (par exemple pour ce qui est des composés binaires, l'arséniure d'indium (InAs), l'arséniure de gallium (GaAs) et l'arséniure d'aluminium (AlAs)), et les phosphures (par exemple pour ce qui est des composés binaires, le phosphure d'indium (InP), le phosphure de gallium (GaP) et le phosphure d'aluminium (AlP)).

Au lieu de transférer une couche entière du substrat donneur, une solution basée sur le procédé Smart Cut™ consiste à prélever d'au moins un substrat donneur un ou plusieurs pavés et de reporter lesdits pavés sur un support intermédiaire, pour former un substrat dit pseudo-substrat donneur, former par implantation d'espèces atomiques une zone de fragilisation dans chaque pavé, coller le pseudo-substrat donneur sur un substrat receveur par l'intermédiaire des pavés, et détacher chaque

pavé le long de la zone de fragilisation de sorte à transférer une portion de chaque pavé sur le substrat receveur.

Pour permettre le collage du pseudo-substrat donneur sur le substrat receveur, la surface libre de l'ensemble des pavés doit s'étendre dans un même plan. A cet effet, avant le collage, on peut mettre en œuvre un polissage mécano-chimique (CMP, acronyme du terme anglo-saxon « Chemical Mechanical Polishing ») précédé préférentiellement d'une abrasion mécanique (appelée « grinding » en anglais) du pseudo-substrat donneur. Le polissage mécano-chimique combine une action mécanique d'un patin de polissage et d'une poudre abrasive et une action chimique d'une solution de polissage contenant la poudre abrasive (l'ensemble de la poudre abrasive et de la solution étant dénommé slurry) pour planariser la surface de l'ensemble des pavés.

Or, si la distance entre les pavés est grande, typiquement supérieure ou égale à 250 μm , le patin de polissage, qui présente une certaine souplesse, s'insère partiellement dans l'intervalle entre les pavés et érode ainsi les bords des pavés. Cet arrondissement des bords, qui est appelé « edge rounding » en anglais, réduit la surface utile des puces transférées sur le substrat receveur.

Inversement, les arêtes des pavés dégradent très rapidement le patin de polissage, ce qui nécessite un remplacement fréquent du patin de polissage, augmentant le coût de l'opération de polissage mécano-chimique.

Pour éviter un tel arrondissement des bords des pavés, il est donc souhaitable de former un pseudo-substrat donneur dans lequel la distance entre les pavés est inférieure ou égale à 250 μm .

Cependant, selon les applications de la structure finale comprenant le substrat receveur et les puces, il peut être nécessaire d'avoir une distance entre les puces supérieure à 250 μm , par exemple supérieure à 1 mm, voire davantage.

Une solution consiste alors à réduire la taille des puces transférées sur le substrat donneur, en appliquant un masque de photolithographie pour protéger localement une partie de la surface des puces et exposer une autre partie de la surface des puces. On peut alors réaliser une gravure localisée de la partie des puces exposée par le masque, ce qui a pour effet de réduire la taille des puces et d'augmenter la distance entre puces adjacentes.

Ce procédé ne donne toutefois pas entière satisfaction car il nécessite une grande précision dans le placement du masque et augmente significativement la durée de fabrication de la structure finale. Par ailleurs, il consomme une quantité significative du matériau des puces, qui est généralement onéreux. Ce procédé n'est donc pas économiquement envisageable à l'échelle industrielle.

RESUME DE L'INVENTION

Un but de l'invention est donc de concevoir un procédé de transfert de puces permettant d'éviter un arrondissement du bord des puces, même lorsque les puces sont éloignées les unes des autres, qui soit facile à mettre en œuvre industriellement et qui minimise la consommation du matériau des puces.

A cet effet, l'invention propose un procédé de transfert de puces sur un substrat receveur à partir de pavés agencés sur un substrat support, comprenant :

- la formation d'un substrat, dit pseudo-substrat donneur, comprenant le substrat support et les pavés, dans lequel deux pavés adjacents sont distants d'une première distance,
- la mise en œuvre d'un polissage mécano-chimique des pavés,
- la formation d'une zone de fragilisation dans au moins une partie des pavés de sorte à délimiter une puce respective,
- le collage du pseudo-substrat donneur sur le substrat receveur par l'intermédiaire des pavés,
- le détachement des pavés le long de la zone de fragilisation de sorte à transférer une puce respective sur le substrat receveur, deux puces adjacentes étant distantes d'une seconde distance supérieure à la première distance,

ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend, avant le collage, une rugosification localisée de la surface des pavés et/ou du substrat receveur pour rendre des régions de ladite surface inaptées au collage, de sorte à empêcher le transfert des puces dans lesdites régions.

La rugosification localisée permet de former, à l'interface de collage, des régions dans lesquelles une adhésion entre les pavés et le substrat receveur est insuffisante pour permettre un transfert des puces dans ces régions. Elle permet par conséquent de transférer sélectivement des puces sur le substrat receveur, pour passer d'une grande densité de pavés dans le pseudo-substrat donneur à une plus faible densité de puces dans la structure finale. Dans la mesure où seules les puces souhaitées sont transférées sur le substrat receveur, il n'y a pas de gaspillage du matériau des puces.

Selon d'autres caractéristiques avantageuses mais optionnelles, éventuellement combinées lorsque cela est techniquement possible :

- la rugosification est réalisée par une irradiation laser localisée de la surface du substrat receveur ;
- l'irradiation laser est réalisée avec un laser présentant une longueur d'onde comprise entre 100 nm et 550nm, de préférence entre 250 nm et 400 nm, selon des impulsions d'une durée comprise entre 1 ns et 10 μ s, de préférence entre 10 ns et 500 ns ;
- le procédé comprend l'application d'un masque définissant un motif et l'irradiation de la surface au travers du masque ;
- le motif est choisi pour délimiter une pluralité de zones du substrat receveur séparées par des zones rugosifiées en regard d'un même pavé, de sorte à permettre de diviser le pavé en plusieurs puces selon ledit motif ;
- la première distance est inférieure ou égale à 250 μ m, de préférence inférieure ou égale à 100 μ m ;
- la seconde distance est supérieure ou égale à 1 mm, préférentiellement supérieure ou égale à 2 mm ;
- la formation de la zone de fragilisation est réalisée par implantation d'espèces ioniques ;

- le pseudo-substrat donneur comprend un premier groupe et un second groupe de pavés ;
- le procédé comprend un transfert successif des pavés du premier groupe et des pavés du second groupe sur au moins un substrat receveur ;
- le procédé comprend :
 - une implantation sélective d'espèces ioniques dans les pavés du premier groupe pour former une zone de fragilisation de sorte à délimiter une puce dans lesdits pavés du premier groupe,
 - une rugosification localisée d'un premier substrat receveur en regard des pavés du second groupe,
 - un collage du pseudo-substrat donneur sur le premier substrat receveur,
 - un détachement des pavés du premier groupe le long de la zone de fragilisation pour transférer les puces respectives sur le premier substrat receveur,
 - à partir du pseudo-substrat donneur résultant du détachement des pavés du premier groupe, une implantation sélective d'espèces ioniques dans les pavés du second groupe pour former une zone de fragilisation de sorte à délimiter une puce dans lesdits pavés du second groupe,
 - une rugosification localisée d'un second substrat receveur en regard des pavés du premier groupe,
 - un collage du pseudo-substrat donneur sur le second substrat receveur,
 - un détachement des pavés du second groupe le long de la zone de fragilisation pour transférer les puces respectives sur le second substrat receveur ;
- on transfère uniquement les puces du premier groupe de pavés sur le substrat receveur et on recycle le pseudo-substrat donneur pour un nouveau transfert des puces du premier groupe de pavés ;
- les pavés du premier et du second groupes sont constitués de matériaux différents ;
- les pavés du premier groupe présentent une qualité cristalline supérieure à celle des pavés du second groupe ;
- les matériaux des pavés des premier et second groupes présentent sensiblement une même vitesse d'enlèvement de matière et une même réactivité chimique vis-à-vis du polissage mécano-chimique ;
- les pavés comprennent :
 - un matériau semi-conducteur, tel qu'un matériau III-V, notamment le nitrure d'indium (InN), le nitrure de gallium (GaN), le nitrure d'aluminium (AlN), l'arséniure d'indium (InAs), l'arséniure de gallium (GaAs), l'arséniure d'aluminium (AlAs), le phosphure d'indium (InP), le phosphure de gallium (GaP) ou le phosphure d'aluminium (AlP), ou un matériau IV ou IV-IV, notamment le germanium ou le carbure de silicium (SiC),
 - un matériau piézoélectrique, tel que le tantalate de lithium (LiTaO₃), le niobate de lithium (LiNbO₃), le niobate de potassium-sodium (K_xNa_{1-x}NbO₃ ou KNN), le titanate de baryum (BaTiO₃), le quartz, le titano-zirconate de plomb (PZT), un composé de niobate de plomb-magnésium et de titanate de plomb (PMN-PT), l'oxyde de zinc (ZnO), le nitrure d'aluminium (AlN) ou le nitrure d'aluminium et de scandium (AlScN), et/ou

- un matériau électriquement isolant, tel que le diamant, le titanate de strontium, la zircone yttrée ou le saphir.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

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

- la figure 1 présente une vue de dessus et une vue en coupe d'un pseudo-substrat donneur selon un mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 2 présente une vue de dessus et une vue en coupe du pseudo-substrat donneur de la figure 1 et d'un substrat receveur, avant leur collage ;
- la figure 3 présente une vue en coupe et une vue de dessous du substrat receveur après le transfert de puces du pseudo-substrat donneur ;
- la figure 4 présente une vue en coupe et une vue de dessus d'un pseudo-substrat donneur selon un mode de réalisation dans lequel les pavés sont répartis en deux groupes ;
- les figures 5A à 5F illustrent schématiquement des étapes de deux transferts successifs de puces à partir du pseudo-substrat donneur de la figure 4 ;
- la figure 6 présente une vue en coupe et une vue de dessus d'un pseudo-substrat donneur selon un mode de réalisation comprenant des pavés d'intérêt et des pavés sacrificiels ;
- la figure 7 présente une vue de dessus et une vue en coupe du pseudo-substrat donneur de la figure 1 et d'un substrat receveur, avant leur collage, dans un mode de réalisation dans lequel une zone du substrat receveur a été rugosifiée de sorte à former un motif en regard d'un pavé du pseudo-substrat donneur.

Pour des raisons de lisibilité des figures, les différents éléments n'ont pas nécessairement été représentés à l'échelle. Les éléments désignés par un même signe de référence d'une figure à l'autre désignent des éléments similaires, qui ne sont donc pas décrits à chaque fois.

DESCRIPTION DETAILLEE DE MODES DE REALISATION

Les figures 1 à 3 illustrent le principe général de l'invention.

En référence à la figure 1, un substrat pseudo-donneur 10 est formé en disposant des pavés 1 sur un substrat support 2.

Le substrat support remplit un rôle de support mécanique pour les pavés. Le substrat support peut être en silicium, verre ou saphir (liste non limitative). La couche représentée autour du substrat support 2 sur la figure 1 est une couche d'oxyde, qui est généralement présente autour des substrats de silicium, mais une telle couche est optionnelle.

Le substrat support présente avantageusement un diamètre supérieur ou égal à 150 mm, de préférence supérieur ou égal à 200 mm, et de manière encore préférée supérieur ou égal à 300 mm.

De préférence, au moins certains des pavés sont constitués d'un matériau onéreux et disponible uniquement dans de petites dimensions. Eventuellement, les pavés peuvent être constitués d'un empilement de tels matériaux.

Les pavés peuvent avantageusement comprendre au moins un desdits matériaux :

- un matériau semi-conducteur, tel qu'un matériau III-V, notamment le nitrure d'indium (InN), le nitrure de gallium (GaN), le nitrure d'aluminium (AlN), l'arséniure d'indium (InAs), l'arséniure de gallium (GaAs), l'arséniure d'aluminium (AlAs), le phosphure d'indium (InP), le phosphure de gallium (GaP) ou le phosphure d'aluminium (AlP), ou un matériau IV ou IV-IV, notamment le germanium ou le carbure de silicium (SiC),

- un matériau piézoélectrique, tel que le tantalate de lithium (LiTaO_3), le niobate de lithium (LiNbO_3), le niobate de potassium-sodium ($\text{K}_x\text{Na}_{1-x}\text{NbO}_3$ ou KNN), le titanate de baryum (BaTiO_3), le quartz, le titano-zirconate de plomb (PZT), un composé de niobate de plomb-magnésium et de titanate de plomb (PMN-PT), l'oxyde de zinc (ZnO), le nitrure d'aluminium (AlN) ou le nitrure d'aluminium et de scandium (AlScN), et/ou

- un matériau électriquement isolant, tel que le diamant, le titanate de strontium, la zircone yttrée ou le saphir.

Comme on le verra plus bas, les pavés peuvent être identiques ou constitués de matériaux différents.

Sur les illustrations présentées, les pavés présentent quatre bords rectilignes et sont agencés à intervalles réguliers les uns des autres pour former un quadrillage comprenant un ensemble de lignes et de colonnes parallèles. On notera toutefois que cet agencement des pavés n'est donné qu'à titre d'illustration ; ainsi, les pavés pourront éventuellement présenter des formes différentes, ou être agencés à des distances différentes les uns des autres. Par ailleurs, les pavés ne sont pas nécessairement carrés, mais peuvent présenter toute autre forme adaptée à l'utilisation visée, présentant ou non un bord rectiligne. Par exemple, les pavés peuvent présenter une forme rectangulaire, circulaire, ou toute autre forme composée de lignes et/ou de courbes.

Les pavés sont distants les uns des autres, avec une distance d_1 entre les bords en vis-à-vis de deux pavés adjacents. La distance d_1 peut être identique entre tous les pavés ou variable.

La distance d_1 est inférieure ou égale à 250 μm , de préférence inférieure ou égale à 100 μm .

Pour former le pseudo-substrat donneur, les pavés peuvent être découpés à partir d'un ou plusieurs substrats donneurs respectifs, et placés sur un support temporaire à l'aide d'un robot (technique connue sous le terme « Pick and Place »). De manière avantageuse, les pavés présentent la même épaisseur que le substrat donneur respectif. En général, l'épaisseur des pavés est comprise entre 50 μm et 1 mm, par exemple de l'ordre de 300 à 650 μm selon l'épaisseur du matériau donneur. Le diamètre du ou des substrats donneurs est généralement inférieur à celui du substrat temporaire et du substrat support.

Le support temporaire est par exemple formé de l'un des matériaux suivants : un ruban adhésif maintenu par un cadre, du silicium, ou du verre (liste non limitative).

Les pavés sont ensuite collés sur le substrat support, puis le support temporaire est retiré de sorte à exposer la surface opposée des pavés. De manière avantageuse, le collage des pavés sur le substrat support est direct, mais il est possible d'utiliser une couche de collage entre les pavés et le substrat support.

De manière alternative, il est possible d'assembler directement les pavés sur le substrat support avec une précision suffisante à l'aide du robot en utilisant des marques d'alignements disposées sur le substrat support. On évite ainsi l'utilisation du support temporaire et le transfert des pavés du support temporaire sur le support pour former le pseudo-substrat donneur.

On met ensuite en œuvre un polissage mécano-chimique de la surface libre des pavés.

Eventuellement, ce polissage mécano-chimique peut être précédé d'une étape de planarisation des pavés par abrasion mécanique (« grinding »). Une telle planarisation peut notamment être avantageuse lorsque les pavés présentent des épaisseurs différentes, afin de ramener leur surface libre sensiblement dans un même plan, ou pour réduire l'épaisseur des pavés. Cependant, si les pavés présentent des surfaces libres coplanaires, il est possible de se dispenser d'une telle planarisation et de mettre en œuvre directement le polissage mécano-chimique.

Le polissage mécano-chimique permet de lisser la surface des pavés pour obtenir une rugosité compatible avec un collage sur un substrat receveur. Ladite rugosité est typiquement inférieure à 0,5 nm RMS. Une telle rugosité est classiquement mesurée à l'aide d'un microscope à force atomique (AFM) sur un champ de 1 μm x 1 μm . D'autres méthodes de mesure, telles que l'interférométrie optique, peuvent également être utilisées.

Lorsque la distance entre les pavés est suffisamment faible, le patin de polissage agit essentiellement dans le plan de la surface libre des pavés, sans s'insérer entre les pavés. Par conséquent, les bords des pavés restent droits (non arrondis). Dans le cas contraire on peut avoir un arrondi des bords des pavés.

Une zone de fragilisation est formée dans au moins une partie des pavés de sorte à délimiter une puce à transférer sur un substrat receveur.

La zone de fragilisation est typiquement formée par une implantation ionique, de préférence d'hydrogène et/ou d'hélium. L'homme du métier est à même de définir les conditions opératoires de cette implantation, selon le matériau des pavés et l'épaisseur de la puce à transférer.

La formation de la zone de fragilisation est de préférence réalisée après le polissage mécano-chimique, mais elle peut éventuellement être réalisée avant.

Le substrat receveur peut être un substrat de silicium, mais d'autres matériaux peuvent être envisagés. En particulier, le choix du matériau peut être guidé par l'application visée (par exemple pour répondre à des problématiques de conductivité électrique et/ou thermique dans la structure finale). Le matériau du substrat receveur peut également être choisi en fonction de sa compatibilité

vis-à-vis du matériau des pavés, par exemple avec un coefficient de dilatation thermique proche de celui des pavés. Par exemple, le substrat receveur peut comprendre de l'arséniure de gallium, du saphir, ou du verre (liste non limitative).

Le substrat receveur présente avantageusement un diamètre identique à celui du substrat support du pseudo-substrat donneur, mais il pourrait éventuellement présenter un diamètre supérieur à celui-ci.

Pour disposer les puces sur le substrat receveur avec une distance inter-puces plus grande que la distance inter-pavés sur le substrat support, on procède à un collage localisé du substrat pseudo-donneur sur le substrat receveur. Par collage localisé, on entend que l'adhésion entre les pavés et le substrat receveur n'a pas lieu sur toute la surface des pavés en contact avec le substrat receveur, mais seulement sur une partie déterminée de ladite surface. Le transfert des puces sur le substrat receveur ne se produit que dans les régions où l'adhésion est suffisante.

Pour contrôler l'emplacement des puces transférées, on rugosifie la surface des pavés ou du substrat receveur dans les régions où l'on ne souhaite pas transférer de puces. La surface rugosifiée présente typiquement une rugosité supérieure à 0,5 nm RMS, de préférence supérieure à 2 nm RMS, qui la rend inapte au collage. On permet ainsi un collage sélectif des pavés uniquement dans les régions non rugosifiées.

La rugosification est avantageusement réalisée par une irradiation laser. La longueur d'onde du laser utilisé peut être choisie entre 100 nm et 550nm, de préférence entre 250 nm et 400 nm. L'irradiation est effectuée sous la forme d'impulsions, dont la durée est comprise typiquement entre 1 ns et 10 μ s, plus avantageusement entre 10 ns et 500 ns. Pour un substrat de silicium traité à température ambiante par un laser de longueur d'onde de 308 nm, avec une durée d'impulsion de 160 ns, la densité d'énergie apportée est de l'ordre de 1.9 J/cm² sur des zones de 15x15mm². La densité d'énergie correspond au seuil de fusion du matériau irradié. L'homme du métier est capable d'ajuster la densité d'énergie en fonction du laser à sa disposition et du matériau à traiter.

De préférence, l'irradiation est appliquée au substrat receveur plutôt qu'aux pavés afin de ne pas affecter les propriétés des pavés, notamment lorsqu'ils sont en un matériau III-V.

Les zones rugosifiées peuvent être définies uniquement par un balayage piloté du faisceau laser sur la surface du substrat receveur, notamment lorsque les zones à rugosifier présentent des dimensions de l'ordre de quelques millimètres. De manière alternative, en particulier pour contrôler plus précisément la taille et/ou la forme des zones à rugosifier, il est possible d'effectuer l'irradiation au travers d'un masque appliqué sur le substrat receveur, le masque comprenant des ouvertures en regard des zones à rugosifier.

La figure 2 illustre le substrat receveur 3 sur lequel des régions rugosifiées 30 ont été formées en regard de certains pavés du pseudo-substrat donneur.

On notera que les régions non rugosifiées ne présentent pas nécessairement la même taille ni la même forme que les pavés. En effet, il est possible de rugosifier une partie de la surface du substrat receveur en regard d'un pavé, par exemple correspondant à la périphérie dudit pavé, afin de permettre

de transférer une puce de taille inférieure à celle du pavé (la partie du pavé en contact avec la zone rugosifiée n'étant pas transférée en raison du manque d'adhésion).

Sur la vue en coupe de la figure 2, les régions rugosifiées 30 ont été représentées en léger relief par rapport au reste de la surface du substrat receveur 3 pour faciliter leur visualisation, mais elles sont en général coplanaires avec le reste de cette surface.

Le collage comprend un alignement du pseudo-substrat donneur et du substrat receveur, afin d'assurer que les régions rugosifiées soient en regard des pavés, puis une mise en contact du substrat receveur et des pavés.

Pour cet alignement, le méplat ou l'encoche qui est généralement présent(e) à la périphérie des substrats est en principe suffisant. De manière alternative, la machine de collage peut prendre en compte les bords des pavés pour réaliser l'alignement, ou utiliser des motifs d'alignement placés sur le substrat receveur.

Après la mise en contact des pavés du pseudo-substrat donneur et du substrat receveur, on détache les puces le long de la zone de fragilisation. De manière connue en elle-même (procédé Smart Cut™), le détachement peut être initié par un traitement thermique, une action mécanique et/ou chimique au niveau de la zone de fragilisation.

Ce détachement, et le transfert des puces sur le substrat receveur, n'interviennent que dans les régions où l'adhésion entre les pavés et le substrat receveur est suffisante, c'est-à-dire dans les régions non rugosifiées. Dans les régions rugosifiées, le transfert ne se produit pas, de sorte que les pavés restent intégralement sur le substrat support.

Ainsi, comme illustré sur la figure 3, seule une partie des puces 1' ont été transférées sur le substrat receveur 3. Il en résulte que la distance d2 entre deux puces 1' adjacentes sur le substrat receveur 3 est plus grande que la distance d1 initiale entre les pavés du pseudo-substrat donneur 10.

La distance d2 peut être supérieure ou égale à 1 mm, préférentiellement supérieure ou égale à 2 mm.

Le reliquat du pseudo-substrat donneur, qui comprend le reliquat des pavés dont les puces ont été détachées, et les pavés dont les puces n'ont pas été détachées, peut éventuellement être recyclé en vue d'un nouveau transfert de puces.

On va maintenant décrire différentes formes d'exécution de l'invention.

Dans le cas illustré sur les figures 2 et 3, seule une partie des puces ont été transférées. Le reliquat du pseudo-substrat donneur comprend donc des pavés de deux épaisseurs différentes.

Pour recycler le pseudo-substrat donneur, il faut donc procéder à une abrasion mécanique pour ramener tous les pavés à la même épaisseur puis un polissage mécano-chimique pour obtenir une surface suffisamment lisse pour le collage.

Cependant, ce recyclage implique de consommer, sur les pavés qui n'ont pas été collés, une épaisseur de matériau correspondant à l'épaisseur des puces.

Différentes solutions sont envisageables pour optimiser l'utilisation du matériau des pavés et/ou éviter de gaspiller le matériau des pavés, notamment lorsque celui-ci est onéreux.

Une première solution consiste à utiliser plusieurs fois le pseudo-substrat donneur pour transférer des puces sur un ou plusieurs substrats receveurs.

Comme illustré sur la figure 4, les pavés sont répartis en deux groupes répartis sur la surface du substrat support. Par exemple, le pseudo-substrat donneur comprend une alternance de pavés 11 d'un premier groupe et de pavés 12 d'un second groupe. La distance d_1 entre deux pavés adjacents, notamment de deux groupes différents, est inférieure ou égale à 250 μm . En revanche, la distance entre deux pavés adjacents du même groupe est supérieure à 250 μm , de préférence supérieure à 1 mm.

Les pavés des deux groupes peuvent être formés du même matériau ou empilement de matériaux. De manière alternative, les pavés des deux groupes peuvent être formés de deux matériaux différents ou empilements de matériaux différents. Par exemple, les pavés du premier groupe peuvent comprendre un matériau semiconducteur et les pavés du second groupe peuvent comprendre un autre matériau semiconducteur, ou un matériau piézoélectrique.

Les puces sont transférées en deux étapes, selon le groupe auquel elles appartiennent.

Dans une première étape, on forme sélectivement une zone de fragilisation 110 dans les pavés 11 du premier groupe. A cet effet, on dispose un masque 4, par exemple en graphite, en regard de la surface des pavés, le masque comprenant des ouvertures en regard des pavés 11 du premier groupe (figure 5A). On met alors en œuvre une implantation ionique au travers du masque, de sorte à former la zone de fragilisation 110 dans les pavés 11 du premier groupe mais pas dans les pavés 12 du second groupe.

Par ailleurs, on rugosifie localement la surface du substrat receveur, dans les régions destinées à être en contact avec les pavés du second groupe.

En référence à la figure 5B, on colle le pseudo-substrat donneur sur le substrat receveur. Compte tenu de la rugosification, l'adhésion ne se produit qu'entre les pavés 11 du premier groupe et le substrat receveur 3.

On détache les pavés 11 du premier groupe le long de la zone de fragilisation 110 respective, de sorte à transférer les puces 11' sur le substrat receveur 3 (figure 5C). Le substrat receveur 3 comprend donc des puces 11' espacées d'une distance d_2 supérieure à d_1 .

Le pseudo-substrat donneur peut être réutilisé directement pour une seconde étape de transfert de puces.

On forme sélectivement une zone de fragilisation 120 dans les pavés 12 du second groupe. A cet effet, on dispose un masque 4, par exemple en graphite, en regard de la surface des pavés, le masque comprenant des ouvertures en regard des pavés 12 du second groupe (figure 5D). On met alors en œuvre une implantation ionique au travers du masque, de sorte à former la zone de

fragilisation 120 dans les pavés du second groupe mais pas dans le reliquat des pavés du premier groupe.

Par ailleurs, on rugosifie localement la surface d'un substrat receveur, dans les régions destinées à être en contact avec les pavés du premier groupe. Le substrat receveur peut être le même que le substrat receveur utilisé dans la première étape, par exemple lorsque les puces des premiers et second groupe sont destinées à être transférées dans des zones différentes du substrat receveur. Dans ce cas, l'orientation relative du pseudo-substrat donneur et du substrat receveur peut être différente entre les deux étapes de transfert de puces, selon l'agencement souhaité dans la structure finale. De manière alternative, on utilise pour la seconde étape un substrat receveur différent de celui de la première étape.

En référence à la figure 5E, on colle le pseudo-substrat donneur sur le substrat receveur. Compte tenu de la rugosification, l'adhésion ne se produit qu'entre les pavés 12 du second groupe et le substrat receveur 3.

On détache les pavés 12 du second groupe le long de la zone de fragilisation 120 respective, de sorte à transférer les puces 12' sur le substrat receveur (figure 5F). Le substrat receveur 3 comprend donc des puces 12' espacées d'une distance d_2 supérieure à d_1 .

La surface des pavés du second groupe ayant été polie avant la première étape de transfert de puces, elle est apte au collage et aucun polissage mécano-chimique n'est donc nécessaire entre les deux étapes de transferts de puces.

A l'issue de la seconde étape, le pseudo-substrat donneur peut être recyclé, notamment par la mise en œuvre d'un polissage mécano-chimique, pour mettre en œuvre deux nouvelles étapes de transfert de puces telles que décrites ci-dessus.

Il serait bien sûr possible de prévoir plus de deux groupes de pavés et en conséquence plus de deux étapes de transfert de puces.

Une seconde solution pour économiser le matériau des pavés consiste à utiliser un matériau différent pour les pavés qui ne sont pas destinés au transfert d'une puce.

Comme illustré sur la figure 6, on forme le pseudo-substrat donneur 10 en disposant sur le substrat support 2 des pavés d'intérêt 1, qui sont destinés au transfert d'une puce sur le substrat receveur, et des pavés 5 d'un autre matériau, généralement moins onéreux que le matériau des pavés d'intérêt. Ces autres pavés 5 sont des pavés sacrificiels, destinés uniquement à combler les intervalles entre les pavés d'intérêt pour faire en sorte que la distance d_1 entre deux pavés adjacents soit inférieure à 250 μm , afin d'éviter d'arrondir le bord des pavés d'intérêt lors du polissage mécano-chimique, et d'éviter d'endommager le patin de polissage. De préférence, chaque pavé d'intérêt est entouré de pavés sacrificiels sur chacun de ses bords, afin de permettre un polissage homogène dudit pavé d'intérêt.

Les pavés sacrificiels peuvent être constitués d'un matériau de même composition que les pavés d'intérêt, mais présenter une qualité cristalline inférieure. Par exemple, si les pavés d'intérêt

sont en InP monocristallin, les pavés sacrificiels peuvent être en InP polycristallin, ou en InP monocristallin présentant un fort taux de dislocations. Un avantage d'utiliser le même matériau pour les pavés d'intérêt et les pavés sacrificiels et que l'ensemble des pavés présente le même comportement vis-à-vis du polissage mécano-chimique, notamment la même dureté et la même vitesse d'enlèvement de matière. Il est donc possible de réaliser un polissage homogène de l'ensemble des pavés.

De manière alternative, les pavés sacrificiels peuvent être constitués d'un matériau de composition différente de celle des pavés d'intérêt. Dans ce cas, le matériau des pavés sacrificiels doit être de préférence choisi pour avoir un comportement proche de celui du matériau des pavés d'intérêt vis-à-vis du polissage mécano-chimique, notamment en termes de vitesse d'enlèvement de matière (le rapport des vitesses d'enlèvement devant typiquement être inférieur à 2) et de réactivité chimique vis-à-vis du slurry. En pratique, l'homme du métier sait trouver des couples de matériaux pour les pavés d'intérêt et les pavés sacrificiels adéquats soit en choisissant le slurry et en adaptant le matériau des pavés sacrificiels en conséquence, soit en choisissant le matériau des pavés sacrificiels et en faisant une étude pour déterminer voire adapter sur mesure un slurry pour avoir une vitesse d'enlèvement de matière et une réactivité chimique similaires.

Le pseudo-donneur est soumis à une implantation ionique au moins dans les pavés d'intérêt de sorte à y délimiter les puces à transférer.

Selon le comportement du matériau des pavés sacrificiels vis-à-vis de l'implantation, notamment en termes de bullage, l'implantation peut être réalisée simultanément dans les pavés sacrificiels.

De manière alternative, notamment si le matériau des pavés sacrificiels génère des défauts liés au bullage, l'implantation est réalisée uniquement dans les pavés d'intérêt, en utilisant un masque tel que décrit dans le mode de réalisation précédent.

Le bullage est un phénomène connu de l'homme du métier, dans lequel les espèces ioniques implantées dans le matériau génèrent une déformation de la surface libre du matériau sous l'effet d'un traitement thermique. Les bulles ainsi formées sont donc susceptibles de nuire au collage.

Le substrat receveur est soumis à une rugosification localisée, de sorte à rugosifier la surface en regard des pavés sacrificiels.

Le pseudo-substrat donneur est collé sur le substrat receveur. Compte tenu de la rugosification, l'adhésion ne se produit qu'entre les pavés d'intérêt et le substrat receveur.

Lors du détachement des pavés le long de la zone de fragilisation, seules les puces des pavés d'intérêt 1 sont transférées sur le substrat receveur, que les pavés sacrificiels 5 présentent une zone de fragilisation ou non.

Sur le substrat receveur 3, les puces 1' sont donc distantes d'une distance d_2 supérieure à d_1 .

Le pseudo-substrat donneur peut être recyclé en vue d'une nouvelle utilisation des pavés d'intérêt. A cet effet, on procède si nécessaire à une abrasion mécanique pour rendre les pavés

sacrificiels affleurants avec les pavés d'intérêt, puis à un polissage mécano-chimique pour rendre la surface des pavés d'intérêt apte au collage.

Une autre application de la rugosification est l'obtention de puces de formes et/ou dimensions différentes de celles des pavés. En effet, le transfert ne se produisant que dans les régions suffisamment lisses, il est possible de décomposer un pavé en une pluralité de puces de plus petites dimensions en le collant sur une surface présentant alternativement des zones lisses et des zones rugosifiées.

Ce principe est illustré schématiquement sur la figure 7, qui montre une vue grossie de deux zones en regard sur le substrat receveur et sur le pseudo-substrat donneur. La zone du pseudo-substrat donneur correspond à un unique pavé 1. La zone 32 du substrat receveur 3 comprend en revanche plusieurs régions de rugosités différentes : des régions lisses 31, aptes au collage du pavé, et des régions rugosifiées 30 s'étendant entre les régions lisses, inaptées au collage. Dans le mode de réalisation illustré, ces régions sont agencées selon un motif de damier mais il va de soi qu'elles pourraient prendre toute autre forme selon la forme souhaitée pour les puces.

Après le collage du pavé 1 sur ladite zone 32 du substrat receveur, et détachement du pavé le long de la zone de fragilisation, seules les portions de pavé effectivement collées au substrat receveur sont transférées sur le substrat receveur et forment des puces.

La taille minimale des régions rugosifiées dépend du laser utilisé.

Il peut être utile d'employer un masque permettant de contrôler plus précisément la taille et forme des régions à rugosifier, notamment lorsqu'elles présentent une taille inférieure à 100 μm . Le masque comprend des ouvertures correspondant aux régions à rugosifier, de sorte à ne permettre l'irradiation de la surface du substrat receveur qu'au niveau de ces ouvertures, et de protéger le reste de la surface du substrat receveur.

Naturellement, les modes de réalisation présentés ci-dessus peuvent être combinés.

S'agissant des conditions de collage des pavés et du substrat receveur, l'homme du métier pourra employer toute technique connue et appropriée selon les matériaux considérés. Ainsi, il pourra par exemple former une couche diélectrique, par exemple SiO_2 , Al_2O_3 , AlN ou SiN sur la surface des pavés et/ou du substrat receveur, afin de procéder à un collage de type oxyde sur oxyde. De manière alternative, l'homme du métier pourra utiliser une couche de collage intermédiaire, telle qu'un métal ou un polymère. Le collage pourra être mis en œuvre de préférence à pression atmosphérique, mais si nécessaire, un collage sous vide pourra être réalisé. L'homme du métier pourra également mettre en œuvre des recuits afin de renforcer l'énergie de collage.

REVENDICATIONS

1. Procédé de transfert de puces sur un substrat receveur à partir de pavés agencés sur un substrat support, comprenant :

- la formation d'un substrat (10), dit pseudo-substrat donneur, comprenant le substrat support (2) et les pavés (1, 11, 12), dans lequel deux pavés adjacents sont distants d'une première distance (d1),
- la mise en œuvre d'un polissage mécano-chimique des pavés (1),
- la formation d'une zone de fragilisation (110, 120) dans au moins une partie des pavés (1, 11, 12) de sorte à délimiter une puce (1', 11', 12') respective,
- le collage du pseudo-substrat donneur (10) sur le substrat receveur (3) par l'intermédiaire des pavés (1, 11, 12),
- le détachement des pavés (1, 11, 12) le long de la zone de fragilisation (110, 120) de sorte à transférer une puce (1', 11', 12') respective sur le substrat receveur (3), deux puces adjacentes étant distantes d'une seconde distance (d2) supérieure à la première distance (d1),

ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend, avant le collage, une rugosification localisée de la surface des pavés (1, 11, 12) et/ou du substrat receveur (3) pour rendre des régions (30) de ladite surface inaptées au collage, de sorte à empêcher le transfert des puces dans lesdites régions.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la rugosification est réalisée par une irradiation laser localisée de la surface du substrat receveur (3).

3. Procédé selon la revendication 2, dans lequel l'irradiation laser est réalisée avec un laser présentant une longueur d'onde comprise entre 100 nm et 550nm, de préférence entre 250 nm et 400 nm, selon des impulsions d'une durée comprise entre 1 ns et 10 μ s, de préférence entre 10 ns et 500 ns.

4. Procédé selon la revendication 2, comprenant l'application d'un masque définissant un motif et l'irradiation de la surface au travers du masque.

5. Procédé selon la revendication 4, dans lequel le motif est choisi pour délimiter une pluralité de zones du substrat receveur séparées par des zones rugosifiées en regard d'un même pavé, de sorte à permettre de diviser le pavé en plusieurs puces selon ledit motif.

6. Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, dans lequel la première distance (d1) est inférieure ou égale à 250 μ m, de préférence inférieure ou égale à 100 μ m.

7. Procédé selon l'une des revendications 1 à 6, dans lequel la seconde distance (d2) est supérieure ou égale à 1 mm, préférentiellement supérieure ou égale à 2 mm.

8. Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel la formation de la zone de fragilisation est réalisée par implantation d'espèces ioniques.

9. Procédé selon l'une des revendications 1 à 8, dans lequel le pseudo-substrat donneur comprend un premier groupe et un second groupe de pavés (11, 12).

10. Procédé selon la revendication 9, dans lequel on transfère successivement les pavés (11) du premier groupe et les pavés (12) du second groupe sur au moins un substrat receveur.

11. Procédé selon la revendication 10 en combinaison avec la revendication 8, comprenant :

- une implantation sélective d'espèces ioniques dans les pavés (11) du premier groupe pour former une zone de fragilisation (110) de sorte à délimiter une puce (11') dans lesdits pavés du premier groupe,

- une rugosification localisée d'un premier substrat receveur (3) en regard des pavés (12) du second groupe,

- un collage du pseudo-substrat donneur sur le premier substrat receveur (3),

- un détachement des pavés (11) du premier groupe le long de la zone de fragilisation (110) pour transférer les puces (11') respectives sur le premier substrat receveur (3),

- à partir du pseudo-substrat donneur résultant du détachement des pavés du premier groupe, une implantation sélective d'espèces ioniques dans les pavés (12) du second groupe pour former une zone de fragilisation (120) de sorte à délimiter une puce (12') dans lesdits pavés du second groupe,

- une rugosification localisée d'un second substrat receveur en regard des pavés du premier groupe,

- un collage du pseudo-substrat donneur sur le second substrat receveur,

- un détachement des pavés du second groupe le long de la zone de fragilisation pour transférer les puces respectives sur le second substrat receveur.

12. Procédé selon la revendication 9, dans lequel on transfère uniquement les puces (11') du premier groupe de pavés sur le substrat receveur (3) et on recycle le pseudo-substrat donneur (10) pour un nouveau transfert des puces du premier groupe de pavés (11).

13. Procédé selon l'une des revendications 9 à 12, dans lequel les pavés (11, 12) du premier et du second groupes sont constitués de matériaux différents.

14. Procédé selon la revendication 12, dans lequel les pavés (11) du premier groupe présentent une qualité cristalline supérieure à celle des pavés (12) du second groupe.

15. Procédé selon l'une des revendications 13 ou 14, dans lequel les matériaux des pavés (11, 12) des premier et second groupes présentent une même vitesse d'enlèvement de matière et une même réactivité chimique vis-à-vis du polissage mécano-chimique.

16. Procédé selon l'une des revendications 1 à 15, dans lequel les pavés (1, 11, 12) comprennent :

- un matériau semi-conducteur, tel qu'un matériau III-V, notamment le nitrure d'indium (InN), le nitrure de gallium (GaN), le nitrure d'aluminium (AlN), l'arséniure d'indium (InAs), l'arséniure de gallium (GaAs), l'arséniure d'aluminium (AlAs), le phosphure d'indium (InP), le phosphure de gallium (GaP) ou le phosphure d'aluminium (AlP), ou un matériau IV ou IV-IV, notamment le germanium ou le carbure de silicium (SiC),

- un matériau piézoélectrique, tel que le tantalate de lithium (LiTaO₃), le niobate de lithium (LiNbO₃), le niobate de potassium-sodium (K_xNa_{1-x}NbO₃ ou KNN), le titanate de baryum (BaTiO₃), le quartz, le titano-zirconate de plomb (PZT), un composé de niobate de plomb-magnésium et de titanate de plomb (PMN-PT), l'oxyde de zinc (ZnO), le nitrure d'aluminium (AlN) ou le nitrure d'aluminium et de scandium (AlScN), et/ou

- un matériau électriquement isolant, tel que le diamant, le titanate de strontium, la zircone yttrée ou le saphir.