

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

①1 N° de publication : **3 075 461**

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : **17 62569**

⑤1 Int Cl⁸ : **H 01 L 21/20 (2018.01), H 01 L 21/02, H 01 L 21/98**

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤4 PROCÉDE DE FABRICATION D'UNE HÉTÉROSTRUCTURE COMPORTANT DES STRUCTURES ÉLÉMENTAIRES PHOTONIQUES EN MATÉRIAU III-V À LA SURFACE D'UN SUBSTRAT À BASE DE SILICIUM.

②2 Date de dépôt : 20.12.17.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la demande : 21.06.19 Bulletin 19/25.

④5 Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention : 14.02.20 Bulletin 20/07.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥0 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.

⑦2 Inventeur(s) : NEMOUCHI FABRICE, BAUDOT CHARLES, BOGUMILOWICZ YANN, GHEGIN ELODIE et RODRIGUEZ PHILIPPE.

⑦3 Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public.

⑦4 Mandataire(s) : MARKS & CLERK FRANCE Société en nom collectif.

FR 3 075 461 - B1



Procédé de fabrication d'une hétérostructure comportant des structures élémentaires photoniques en matériau III-V à la surface d'un substrat à base de silicium

Le domaine de l'invention est celui des composants III-V et concerne un procédé d'élaboration de structure pour les applications photoniques par exemple laser et plus particulièrement d'hétérostructure de
5 couche III-V sur substrat silicium.

L'intégration hétérogène par exemple d'un laser III-V sur un substrat de SOI contenant des éléments passifs et actifs (guide d'onde, modulateur...) en silicium nécessite généralement le report de puces de matériaux III-V crues sur un substrat InP qui doivent être ensuite découpées et
10 collées.

Actuellement ce report selon l'art connu peut être réalisé selon différents procédés mais utilise dans tous les cas l'utilisation d'un substrat en matériau III-V (généralement un substrat de phosphure d'indium) supportant les différentes couches épitaxiées nécessaires à l'obtention des
15 composants en matériaux III-V.

Les étapes principales de réalisation sont :

1) la réalisation des puces III-V à partir d'un substrat par exemple d'InP typiquement de 4 pouces maximum sur lequel un empilement de couche III-V définissant les couches caractéristiques d'un laser ou un autre dispositif
20 (photodétecteur,...) ont été épitaxiées (l'empilement des couches épitaxiées est inversé afin de coller dans le bon sens) ;

2) puis le report des ces couches est réalisé :
25 - soit de manière collective en ayant découpé et placé des puces sur un support doté d'empreinte appelé couramment « holder » dédié, afin de les reporter sur le substrat ;
- soit de manière individuelle en ayant préalablement découpé les puces de 1 à quelques millimètres carrés puis en reportant
30 et en collant chaque puce de manière individuelle.

Dans tous les cas, les puces de matériaux III-V sont supportées par un substrat InP dont le diamètre initial du wafer est limité, nécessitant la

suppression de la partie support (substrat InP) qui représente environ 98% de l'épaisseur.

Les figures 1a à 1c illustrent l'utilisation d'un substrat porteur appelé « holder ».

5 Plus précisément la figure 1a illustre la réalisation de logements unitaires gravés dans un substrat dit holder **10**, la réalisation en parallèle d'au moins une couche **21** en matériau III-V à la surface d'un substrat **20** en matériau III-V et la découpe d'éléments **21i/20i** désigné par le terme puce dans l'ensemble de la présente description et reporté sur le « holder » **10**
 10 comprenant des logements élémentaires pour recevoir chacun des ensembles **21i/20i**.

La figure 1b est une figure agrandie d'un ensemble unitaire **21i/20i** mettant en évidence la marge de désalignement **d** possible et la rotation possible de chacune des puces lors du report d'une puce dans un logement
 15 dédié.

La figure 1c illustre le report collectif de l'ensemble des puces (dans le « holder ») à la surface, qui devient alors l'interface de collage **30**, d'un substrat de type SOI pouvant comprendre des éléments passifs et actifs (guide d'onde, modulateur,...) et des ensembles de métallisations. Ladite
 20 interface étant positionnée à la surface d'un support **31** dénommé poignée.

Il est nécessaire d'avoir une poignée car le substrat receveur a été, au préalable, aminci (en face arrière) de toute la partie silicium servant de support, le film de quelques μm d'épaisseur contenant les éléments actifs et passifs photoniques, d'un diamètre de 300 mm, ne pouvant pas être
 25 manipulé sans une telle poignée.

Les problématiques majeures rencontrées sont les suivantes :

- la nécessité de fabriquer le « holder », avec des coûts et des difficultés de réutilisation ;
- la mise en place des puces sur le « holder » nécessitant de
 30 cliver des plaques III-V avec des pertes ;
- le processus de mise en place des puces long et fastidieux ;
- le problème de désalignement pouvant typiquement être de 50 μm : plaque à plaque, de 100 à 150 μm : puces à « holder » (report collectifs) avec comme contrainte dans le meilleur des

cas : 300 μm puces à plaque (dans le cadre du report individuel) ;

- le démontage du substrat « holder » entraînant le retrait du substrat III-V (ce qui engendre un coût) avec une décote latérale (pas de sélectivité chimique) ;
- une variabilité (taux de collage des puces et désalignement possible, plus effet potentiel de rotation comme illustré en figure 1b).

La figure 2 illustre, le report et le collage de puces **20i/21i** individuellement réalisées après découpe d'un substrat **20** de matériau III-V et épitaxie d'éléments **21** de matériaux III-V et positionnées sur une plaque comprenant le substrat de type SOI, comprenant une interface **30**, monté sur un support dit poignée **31**.

Dans ce cas les problématiques majeures sont :

- le besoin de cliver des plaques III-V (pertes) ;
- la mise en place des puces (long) ;
- la précision d'alignement : 50 μm plaque à plaque ;
- la variabilité puce à puce ;
- le démontage substrat : avec le retrait du substrat III-V (coût) et une décote latérale (pas de sélectivité chimique) ;
- la variabilité : taux de collage des puces et désalignement plus rotation.

La figure 3 illustre de manière détaillée une structure élémentaire active photonique réalisée dans l'invention, qui peut être de type laser et rappelle les dimensions caractéristiques d'un tel laser III-V. L'empilement multicouche III-V présente une hauteur typiquement de 2 à 5 μm de hauteur et une largeur pouvant typiquement être comprise entre 40 et 90 μm de large. Un guide en Si est intégré dans une couche d'oxyde SiO_2 réalisée à la surface d'un substrat Si. La figure 3 met en évidence, les contacts de type n sur une couche de base n-InP, une structure en mesa comprenant l'empilement de la région active constituée d'une structure à multi-puits quantique sur laquelle est empilée une couche p-InP, une couche p-InGaAs et le contact de type p.

Dans ce contexte et pour résoudre les inconvénients précités, la présente invention a pour objet un procédé utilisant un substrat couramment appelé wafer, pouvant être de silicium ou SOI comme substrat de croissance (ou encore identifié comme substrat donneur) en remplacement d'un substrat en matériau III-V (généralement InP). Le Demandeur exploite pour cela une technique décrite notamment dans le brevet US 8 173 551 et comprenant l'épitaxie de matériau III-V sur un premier substrat de silicium, de manière à préconstituer des substrats élémentaires de matériaux III-V (et non plus d'utiliser des substrats massifs de matériaux III-V), sur lesquels peuvent être réalisées des couches actives constitutives par exemple d'un laser, avant de procéder au report de l'ensemble sur un second substrat pouvant comprendre des éléments passifs et actifs (guide d'onde, modulateur...).

Le procédé de l'invention présente notamment les avantages suivants :

- 15 - l'utilisation d'un substrat moins coûteux et plus facile à retirer ;
- la localisation des structures épitaxiées, ainsi les structures peuvent être reportées de manière collective ;
- l'utilisation de structures élémentaires de type notamment laser pouvant être pré-alignées sur une plaquette « donneur », l'alignement des puces entre elles étant à une précision liée à la lithographie ;
- 20 - lors du report, un seul alignement plaque à plaque permettant d'obtenir une précision dans une gamme pouvant typiquement être de 10 μm à 80 μm avec une moyenne à 50 μm ;
- 25 - l'obtention d'une pré-encapsulation des puces en matériau III-V dans un diélectrique.

Plus précisément la présente invention a pour objet un procédé de fabrication d'une hétérostructure comportant au moins une structure élémentaire active photonique comprenant au moins une couche active en matériau III-V à la surface d'un substrat à base de silicium comprenant :

- 30 - la réalisation d'un premier motif présentant au moins une première ouverture dans un matériau diélectrique à la surface d'un premier substrat à base de silicium ;

- une première opération d'épithaxie d'au moins un matériau III-V de manière à définir au moins une couche de base élémentaire en matériau III-V dans ladite au moins première ouverture ;
- 5 - la réalisation d'un second motif dans un matériau diélectrique de manière à définir au moins une seconde ouverture présentant un recouvrement avec ladite couche de base élémentaire en matériau III-V ;
- une seconde opération d'épithaxie d'au moins un matériau III-V à la surface d'au moins ladite couche de base élémentaire de matériau III-V de manière à réaliser ladite au moins structure élémentaire active photonique en matériau(x) III-V présentant une face externe ;
- 10 - une opération de report et d'assemblage de ladite au moins structure élémentaire active photonique via sa face externe, sur une interface pouvant comporter des éléments passifs et/ou des éléments actifs, ladite interface étant réalisée à la surface d'un second substrat à base de silicium;
- 15 - le retrait dudit premier substrat à base de silicium et de ladite au moins couche de base élémentaire en matériau III-V située sur ladite structure élémentaire active photonique.
- 20

Il peut avantageusement être prévu une opération de polissage mécano-chimique (CMP) afin de retirer les éventuelles couches de matériaux III-V non actives situées au dessus du plan de surface du motif et afin d'obtenir une surface de collage constituée d'un plan unique et répondant aux critères de collages (planéité, rugosité...), cette opération étant préalable à l'opération de report et d'assemblage.

Le substrat peut typiquement être en Si, SOI, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ avec $0 < x < 1$.

Selon des variantes de l'invention, la réalisation dudit premier motif comprend :

- la réalisation d'au moins une ouverture primaire présentant au moins une partie verticale inférieure et une partie horizontale supérieure, ladite partie verticale étant décentrée par rapport à ladite partie horizontale ;

- la réalisation d'au moins une couche de base élémentaire comprenant une partie verticale inférieure et une partie horizontale ;
- la réalisation d'au moins ladite structure élémentaire active photonique à la surface de la partie horizontale de ladite couche de base élémentaire en matériau III-V, de manière décentrée par rapport à la partie verticale inférieure de ladite au moins couche de base élémentaire en matériau III-V.

5

Selon des variantes de l'invention, la réalisation dudit premier motif comprend la réalisation d'au moins une ouverture primaire complexe présentant au moins :

10

- une partie verticale inférieure ;
- une partie horizontale intermédiaire ;
- une partie verticale supérieure ;

15

- lesdites parties verticales inférieure et supérieure étant décentrées de manière opposée par rapport à ladite partie horizontale ;

- ladite première opération d'épitaxie définissant au moins une couche de base élémentaire en matériau III-V primaire présentant au moins une partie verticale inférieure et une partie horizontale.

20

Selon des variantes de l'invention, le procédé comprend pour réaliser ladite au moins première ouverture complexe :

25

- la réalisation de ladite partie verticale inférieure et de ladite partie horizontale intermédiaire ;
- le dépôt d'un matériau sacrificiel dans ladite partie verticale inférieure et dans ladite partie horizontale intermédiaire de manière à définir au moins un élément sacrificiel intermédiaire ;
- le dépôt d'une couche supérieure de diélectrique ;

30

- la réalisation d'au moins ladite partie verticale supérieure de ladite première ouverture dans ladite couche supérieure de diélectrique de manière à former au moins ladite première ouverture complexe ;

- l'épitaxie de matériau III-V dans ladite au moins ouverture primaire complexe, de manière à former ladite au moins couche élémentaire de base.

Le matériau sacrificiel peut avantageusement être du $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ avec $0 < x < 1$ polycristallin ou amorphe. Avantageusement, son retrait peut être effectué dans un mélange HCl gazeux et dihydrogène à température élevée (typiquement $> 500^\circ\text{C}$, la température choisie dépendant de la concentration en Ge de ladite couche sacrificielle).

Avantageusement, ladite opération d'assemblage comprend une opération de collage, pouvant être une opération de collage moléculaire.

Le procédé selon l'invention permet aussi avantageusement de réaliser différentes structures élémentaires pouvant fonctionner à des longueurs d'onde différentes.

C'est pourquoi la présente invention a aussi pour objet un procédé dans lequel on réalise plusieurs structures élémentaires actives photoniques différentes fonctionnant à des longueurs d'onde différentes.

Pour ce faire, ledit procédé peut comprendre des opérations successives d'épitaxie pour réaliser les différentes structures élémentaires actives photoniques, par exemple fonctionnant à des longueurs d'onde différentes, lesdites opérations étant effectuées successivement à des températures d'épitaxie décroissantes.

Avantageusement, l'interface présente un support couramment dénommé « poignée » sur une face opposée audit second substrat. L'invention a ainsi pour objet un procédé selon l'invention dans lequel ledit second substrat à base de silicium est retiré avant assemblage pour laisser à nu, l'interface pouvant comporter des éléments passifs et/ou actifs, ladite interface étant à la surface dudit support.

Selon des variantes de l'invention, pour réaliser des structures élémentaires actives photoniques, on réalise avantageusement des structures à multi-puits quantique en matériau(x) III-V.

Selon des variantes de l'invention, la couche de base élémentaire en matériau III-V peut avantageusement être InP.

L'invention a également pour objet une hétérostructure obtenue selon le procédé de l'invention, ladite hétérostructure pouvant

avantageusement comprendre au moins une structure de type laser ou photodétecteur ou modulateur.

L'invention a encore pour objet un ensemble de structures élémentaires actives photoniques en matériau III-V à la surface d'un substrat à base de silicium obtenu selon le procédé de l'invention, pouvant
5 à base de silicium obtenu selon le procédé de l'invention, pouvant avantageusement comporter un ensemble de structures laser fonctionnant à des longueurs d'onde différentes.

L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages
10 apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre donnée à titre non limitatif et grâce aux figures parmi lesquelles :

- les figures 1a à 1c illustrent un premier exemple de procédé de report de puces en matériau(x) III-V sur un substrat SOI comprenant l'utilisation d'un « holder » selon l'art connu ;
- 15 - la figure 2 illustre un second exemple de procédé de report de puces sur un substrat SOI comprenant le collage individuel de puces en matériau(x) III-V selon l'art connu ;
- la figure 3 illustre les dimensions typiques d'une puce de type laser en matériaux III-V selon l'art connu ;
- 20 - les figure 4a à 4f illustrent les principales étapes d'un premier exemple de procédé selon l'invention ;
- la figure 5 illustre les différentes étapes d'un second exemple de procédé de l'invention comprenant la réalisation d'un motif primaire présentant des premières ouvertures complexes permettant de décentrer des structures élémentaires actives photoniques par rapport aux substrats élémentaires en matériau III-V ;
- 25 - la figure 6 illustre l'opération de report et d'assemblage des structures élémentaires actives photoniques obtenues selon les opérations décrites en figure 5 ;
- 30 - les figures 7a à 7d montrent des vue de dessus et des vues transverses mettant en évidence les dimensions de structures élémentaires actives photoniques dans un procédé selon l'invention ;

- la figure 8 illustre un exemple d'étapes successives de fabrication de structures élémentaires différentes selon le procédé de l'invention ;
- la figure 9 illustre un ensemble de structures élémentaires actives photoniques différentes.

5

Le procédé de l'invention exploite le procédé d'épitaxie par piégeage de défaut cristallin (lié à la différence de paramètre de maille) permettant d'utiliser un substrat de base en matériau semi-conducteur tel que du silicium sur lequel on réalise préalablement des couches de base élémentaires en matériau III-V destinées à la croissance épitaxiale de structures élémentaires actives photoniques telles que par exemple des structures de multi-puits quantiques dont le choix de la nature des couches et leur épaisseurs déterminent les longueurs d'onde de fonctionnement.

10

15

Les couches de base élémentaires en matériau III-V peuvent être réalisées avec des hauts facteurs de forme permettant avantageusement de piéger des défauts liés à l'hétérostructure. Les techniques de croissance à haut facteur de forme ont notamment été décrites dans le brevet US 8 173 551.

20

Le procédé de l'invention peut être décliné selon aux moins les deux alternatives suivantes et qui sont détaillées dans la suite de la description :

25

- première alternative : le procédé comprend deux séquences d'opération de lithographie et d'épitaxie de matériau(x) III-V ;
- seconde alternative : le procédé comprend la fabrication d'un motif particulier avec utilisation d'une couche sacrificielle, dans lequel une opération d'épitaxie de matériau(x) III-V est réalisée.

30

Le Demandeur décrit ci-après différents exemples de procédé selon l'invention.

Exemple de procédé de l'invention selon la première alternative :

35

La figure 4a illustre les premières étapes suivantes :

Etape 1 : on utilise un premier substrat **100** de faible coût en silicium.

Etape 2 : à partir de ce premier substrat **100**, on réalise une couche de diélectrique **200**.

5 Etape 3 : on réalise des ouvertures O_{1i} dans la couche **200** de manière à définir un motif avec des ouvertures comme illustré en figure 4a. Le carré montre un agrandi mettant en évidence le type de flancs, droits ou biseautés pouvant être obtenus dans les ouvertures.

10 Etape 4 : on procède à une première opération d'épithaxie de matériau III-V pouvant être de l'InP de manière à définir des couches de base élémentaires en matériau III-V : **201i**.

La figure 4b illustre l'étape 5 : après avoir procédé à une opération de planarisation de type CMP (de polissage mécanique/chimique), on procède au dépôt d'une seconde couche de diélectrique **200** dans laquelle on réalise des secondes ouvertures O_{12} de manière à définir un second motif.

La figure 4c illustre l'étape 6 : on réalise une seconde opération d'épithaxie de matériau(x) III-V de manière à définir des structures élémentaires actives photoniques **202i**, puis l'on procède en l'étape 7 à une opération de planarisation.

Les secondes ouvertures ont des largeurs supérieures à celles des premières ouvertures de manière à permettre la croissance latérale de matériau(x) III-V à partir des substrats de matériaux III-V. Les défauts de croissance peuvent avantageusement être confinés dans les cavités (les dislocations sont stoppées par les parois de la cavité) des substrats et permettre de réaliser une croissance de matériau(x) III-V à partir des substrats **201i**. Typiquement, à partir d'un substrat Si, les défauts liés à la relaxation des couches se retrouvent principalement dans les plans cristallins $\{111\}$ formant un angle de $54,7^\circ$ avec la surface du substrat. Donc, si la hauteur de la cavité O_{1i} est supérieure à $\tan(54,7^\circ)$ on peut confiner les défauts de ces plans, typiquement, si la hauteur est supérieure à 1,4 fois la largeur de la cavité. Plus ce rapport est grand, et plus l'effet de confinement est élevé.

La figure 4d illustre le second substrat employé dans le procédé de l'invention. Ce substrat peut être de type SOI pouvant comprendre des éléments passifs et actifs (guide d'onde, modulateur,...) et des ensembles de métallisations. Il comporte une partie silicium **301** et une partie intégrant les composants passifs ou actifs **300** destinée à adresser la ou les structures élémentaires actives photoniques élaborées à la surface du premier substrat **100**, ledit second substrat étant présenté retourné (Etape 8) pour réaliser l'opération d'assemblage.

Etape 9 : Pour les besoins du report, ce second substrat est positionné sur un support appelé poignée **302** et l'on procède à l'opération d'assemblage avec la ou les structures élémentaires réalisées en parallèle, comme illustré en figure 4e. Typiquement, l'opération d'assemblage peut être réalisée grâce à une opération de collage moléculaire.

Etape 10 : on procède au retrait de la partie inférieure **100** du premier substrat comme illustré en figure 4f, mettant à nu les substrats élémentaires **201i** par une opération d'amincissement mécanique, puis nettoyage comme illustré en figure 4f.

Etape 11 : on procède enfin au retrait de la partie du substrat comprenant le diélectrique **200** et les couches de base élémentaires en matériau III-V **201i**, pour dégager les structures élémentaires actives photoniques **202i** comme illustré également en figure 4f.

Exemple de procédé de l'invention selon la seconde alternative :

Avantageusement, la couche de base élémentaire en matériau III-V peut être réalisée de manière à comprendre une première partie inférieure verticale étroite pouvant piéger les défauts de croissance à partir du premier substrat et une partie horizontale supérieure plus large, ladite partie inférieure étant décentrée par rapport à ladite partie horizontale, pour pouvoir réaliser la croissance de la structure élémentaire active photonique de manière déportée.

La figure 5 illustre les différentes étapes de ce second exemple de procédé :

5 Etape 1 : on utilise un premier substrat **100** de faible coût en silicium.

Etape 2 : à partir de ce premier substrat **100**, on réalise une couche de diélectrique **200**.

10 Etape 3 : on réalise des ouvertures O_{1i} dans la couche **200** de manière à définir un motif avec des ouvertures, présentant une partie inférieure verticale et une partie horizontale, ladite partie verticale inférieure étant décentrée par rapport à ladite partie horizontale. Le carré montre un agrandi mettant en évidence le type de flancs, droits ou biseautés pouvant être obtenus dans la partie inférieure verticale des ouvertures.

15 Etape 4 : on procède au dépôt d'un matériau sacrificiel de manière à définir des éléments **203i** dans les ouvertures préalablement formées. On dépose alors une couche de diélectrique **200**.

20 Etape 5 : on vient définir dans la couche de diélectrique **200**, de nouvelles ouvertures constituant la partie verticale supérieure des premières ouvertures complexes O'_{1i} , en procédant au retrait également du matériau sacrificiel.

L'intérêt de cette première ouverture complexe réside dans le fait que la partie horizontale est partiellement recouverte de diélectrique permettant d'éviter une étape ultérieure de type CMP pour uniformiser la surface de la couche de base élémentaire en matériau III-V.

25 Etape 6 : on procède à une première opération d'épithaxie de matériau III-V permettant de constituer les couches de base élémentaires en matériau III-V **201i**. Le carré met en évidence l'aspect déporté des dislocations dans la partie verticale inférieure de la couche élémentaire de base par rapport à la partie horizontale de ladite couche élémentaire de base.

30 Etape 7 : on procède à la réaliser de secondes ouvertures (non représentées) dans lesquelles on procède à de nouvelles opérations d'épithaxie afin de réaliser les structures élémentaires actives photoniques **202i**.

35

Les étapes suivantes de report du second substrat à base de silicium et de composants actifs et/ou passifs peuvent être identiques à celles du premier exemple de procédé précédemment décrites et sont illustrées en figure 6 qui illustre les étapes suivantes :

5 Etape 8 : les deux substrats comportant d'une part les couches de base élémentaires en matériau III-V et d'autre part le support comprenant une interface avec des composants actifs et/ou passif sont assemblés et collés.

10 Etape 9 : on procède au retrait de la partie **100** du premier substrat, mettant à nu les couches de base élémentaires en matériau III-V **201i** par une opération d'amincissement mécanique.

15 Etape 10 : on procède enfin au retrait de la partie du substrat supérieur comprenant le diélectrique **200**, et les couches de base élémentaires en matériau III-V **201i** pour dégager les structures élémentaires actives photoniques **202i**.

Des exemples de dimensions des structures élémentaires actives photoniques pouvant être réalisées selon le procédé de l'invention sont illustrées grâce aux figures 7a à 7e.

20 Typiquement, les premières ouvertures complexes O'_{1i} peuvent présenter des surfaces de 50 à 100 μm x 500 μm .

Les épaisseurs des couches de diélectriques successives permettant de définir lesdites premières ouvertures complexes peuvent être respectivement de 1 μm et 5 μm , comme illustré en figure 7a.

25 La figure 7b met en évidence la réalisation d'une couche de base élémentaire en matériau III-V en InP déposé par épitaxie dans ladite ouverture complexe. L'épaisseur de InP peut typiquement être comprise entre 5 à 10 μm avec des effets de charge compris entre 5 et 10.

30 De manière générale, l'effet de charge correspond à la différence d'épaisseur observée lorsqu'un même procédé d'épitaxie est réalisé sur (i) un substrat sans motifs (ii) un substrat avec motif, c'est-à-dire partiellement recouvert par un matériau de motif type SiO₂.

35 L'épaisseur obtenue est souvent supérieure dans le cas (ii). Le rapport épaisseur dans le cas (ii) sur épaisseur obtenue dans le cas (i) définit l'effet de charge.

Dans la présente invention, une épaisseur équivalente de 5 à 10µm sur un substrat sans motif doit permettre de réaliser une croissance latérale de 10 à 50 µm dans les cavités en croissance latérale sur un substrat avec motif, bénéficiant donc de la présence de l'effet de charge.

5

La figure 7c met en évidence la réalisation d'une seconde ouverture de manière classique par photolithographie.

La figure 7d met en évidence la croissance épitaxiale de la structure élémentaire active photonique en matériau(x) III-V, pouvant
10 présenter une épaisseur typiquement comprise entre quelques nanomètres et quelques microns selon les applications visées.

Le procédé de la présente invention permet de séquencer des opérations d'épitaxie localisées, permettant ainsi de réaliser des structures
15 élémentaires actives photoniques différentes, et notamment constituées de différents matériaux III-V ou différentes structures multi-puits quantiques, de manière à fabriquer au sein d'une même ensemble plusieurs fonctions photoniques différentes pouvant fonctionner à des longueurs d'onde différentes.

La figure 8 met en évidence les étapes 7, 7bis, 7 ter et 7 quater
20 correspondantes à l'étape 7 du procédé décrit en figure 5 et relative à des étapes successives d'épitaxie permettant la formation de structures élémentaires différentes **202i**, **202j**, **202k** à partir des couches de base élémentaires en matériau III-V: **201i**, **201j**, **201k** et en procédant à des
25 opérations de masquage différentes. L'étape 7bis met ainsi en évidence qu'après avoir réalisé une première opération de croissance épitaxiale pour élaborer la structure élémentaire **202i**, on réalise une opération de masquage destinée à la croissance épitaxiale de la structure élémentaire **202j**.

La figure 9 illustre un exemple de configuration mettant en
30 évidence 4 structures élémentaires actives photoniques différentes **202i**, **202j**, **202k**, **202l** comprenant des multi-puits quantiques entre couches de matériaux III-V et assemblées, au niveau d'éléments de guide en silicium respectivement **310i**, **310j**, **310k**, **310l** réalisés dans le substrat **300** comprenant trois niveaux de diélectrique de SiO₂ **320**, **321** et **322**, la couche

322 encapsulant avantageusement les 4 structures élémentaires actives photoniques.

Il pourrait également s'agir de composants différents (lasers, photodétecteur, modulateur en III-V.

5 Selon le procédé de l'invention, il est ainsi possible de réaliser grâce à chacune des opérations d'épitaxie un composant optimisé : laser/modulateur/ photodétecteur, de taille de l'ordre de quelques dizaines de microns.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de fabrication d'une hétérostructure comportant au moins une structure élémentaire active photonique en matériau III-V à la surface d'un substrat à base de silicium comprenant successivement:
- 5 - la réalisation d'un premier motif présentant au moins une première ouverture (O_{11}) dans un matériau diélectrique (200) à la surface d'un premier substrat à base de silicium (100) ;
 - 10 - une première opération d'épitaxie d'au moins un matériau III-V de manière à définir au moins une couche de base élémentaire en matériau III-V ($201i$) dans ladite au moins première ouverture ;
 - 15 - la réalisation d'un second motif dans un matériau diélectrique (200) de manière à définir au moins une seconde ouverture (O_{12}) présentant un recouvrement avec ladite au moins couche de base élémentaire en matériau III-V ;
 - 20 - une seconde opération d'épitaxie d'au moins un matériau III-V à la surface de ladite au moins couche de base élémentaire en matériau III-V de manière à réaliser ladite au moins structure élémentaire active photonique en matériau(x) III-V présentant une face externe ;
 - 25 - une opération de report et d'assemblage de ladite au moins structure élémentaire active photonique via sa face externe, sur une interface (300) pouvant comporter des éléments passifs et/ou des éléments actifs, ladite interface étant réalisée à la surface d'un second substrat à base de silicium (301) ;
 - 30 - le retrait dudit premier substrat à base de silicium et de ladite au moins couche de base élémentaire en matériau III-V située sur ladite structure élémentaire active photonique.
2. Procédé selon la revendication 1, comprenant une opération de polissage mécano-chimique (CMP) préalable à l'opération de report et d'assemblage.

3. Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2, dans lequel la réalisation dudit premier motif comprend :

- 5 - la réalisation d'au moins une ouverture primaire présentant au moins une partie verticale inférieure et une partie horizontale supérieure, ladite partie verticale étant décentrée par rapport à ladite partie horizontale ;
- la réalisation d'au moins une couche de base élémentaire en matériau III-V comprenant une partie verticale inférieure et une
- 10 - la réalisation d'au moins ladite structure élémentaire active photonique à la surface de la partie horizontale de ladite couche de base élémentaire en matériau III-V, de manière décentrée par rapport à la partie verticale inférieure de ladite au moins couche de base élémentaire en matériau III-V.

15

4. Procédé selon la revendication 3, dans lequel la réalisation dudit premier motif comprend la réalisation d'au moins une ouverture primaire complexe (O'_{11}) présentant au moins :

- 20 - une partie verticale inférieure ;
- une partie horizontale intermédiaire ;
- une partie verticale supérieure ;
- lesdites parties verticales inférieure et supérieure étant décentrées de manière opposée par rapport à ladite partie horizontale ;
- 25 - ladite première opération d'épitaxie définissant au moins une couche de base élémentaire en matériau III-V primaire présentant au moins une partie verticale inférieure et une partie horizontale.

30

5. Procédé selon la revendication 4, comprenant :

- la réalisation de ladite partie verticale inférieure et de ladite partie horizontale intermédiaire ;
- le dépôt d'un matériau sacrificiel dans ladite partie verticale inférieure et dans ladite partie horizontale intermédiaire de

manière à définir au moins un élément sacrificiel intermédiaire (203i) ;

- le dépôt d'une couche supérieure de diélectrique (200) ;
- la réalisation d'au moins ladite partie verticale supérieure de ladite première ouverture dans ladite couche supérieure de diélectrique de manière à former au moins ladite première ouverture complexe (O'1i) ;
- l'épitaxie de matériau III-V dans ladite au moins ouverture primaire complexe, de manière à former ladite au moins ladite couche de base élémentaire en matériau III-V (201i).

6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel le matériau sacrificiel est du $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ avec $0 < x < 1$, polycristallin ou amorphe.

7. Procédé selon la revendication 6, dans lequel le retrait dudit matériau sacrificiel est effectué dans un mélange HCl gazeux et dihydrogène à température supérieure à 500°C .

8. Procédé selon l'une des revendications 1 à 6 dans lequel ladite opération d'assemblage comprend une opération de collage.

9. Procédé selon la revendication 8, dans lequel ladite opération de collage est une opération de collage moléculaire.

10. Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel on réalise plusieurs structures élémentaires actives photoniques (202i, 202j, 202k, 202l) différentes fonctionnant à des longueurs d'onde différentes.

11. Procédé selon la revendication précédente, comprenant des opérations successives d'épitaxie pour réaliser les différentes structures élémentaires actives photoniques fonctionnant à des longueurs d'onde différentes, lesdites opérations étant effectuées successivement à des températures d'épitaxie décroissantes.

12. Procédé selon l'une des revendications précédentes dans le lequel un support (303) est situé sur la face opposée audit second substrat, ledit procédé comprenant le retrait dudit second substrat avant assemblage, pour laisser à nu l'interface pouvant comporter des éléments passifs et/ou actifs, ladite interface étant à la surface dudit support (303).

13. Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel la au moins structure élémentaire active photonique (202i) comprend une structure à multi-puits quantique en matériau(x) III-V.

10

14. Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel la au moins couche de base élémentaire en matériau III-V (201i) est en InP.

15

15. Hétérostructure obtenue selon le procédé de l'une des revendications 1 à 14.

16. Hétérostructure selon la revendication 15, caractérisée en ce qu'elle comprend au moins une structure de laser ou de photodétecteur ou de modulateur.

20

17. Hétérostructure selon la revendication 16, caractérisé en ce qu'elle comporte un ensemble de structures laser fonctionnant à des longueurs d'onde différentes.

25

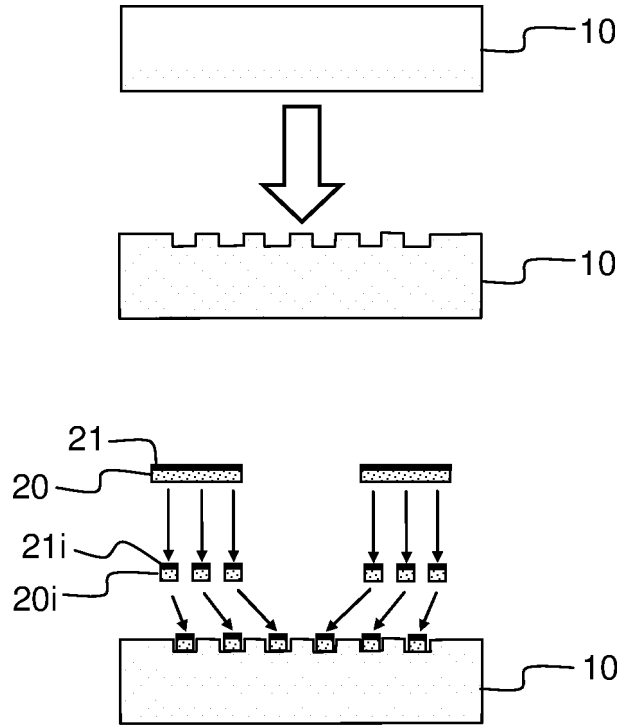


FIG.1a

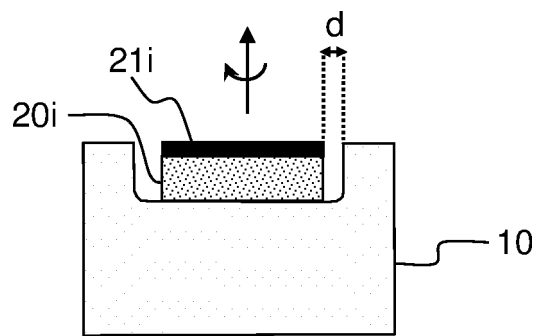


FIG.1b

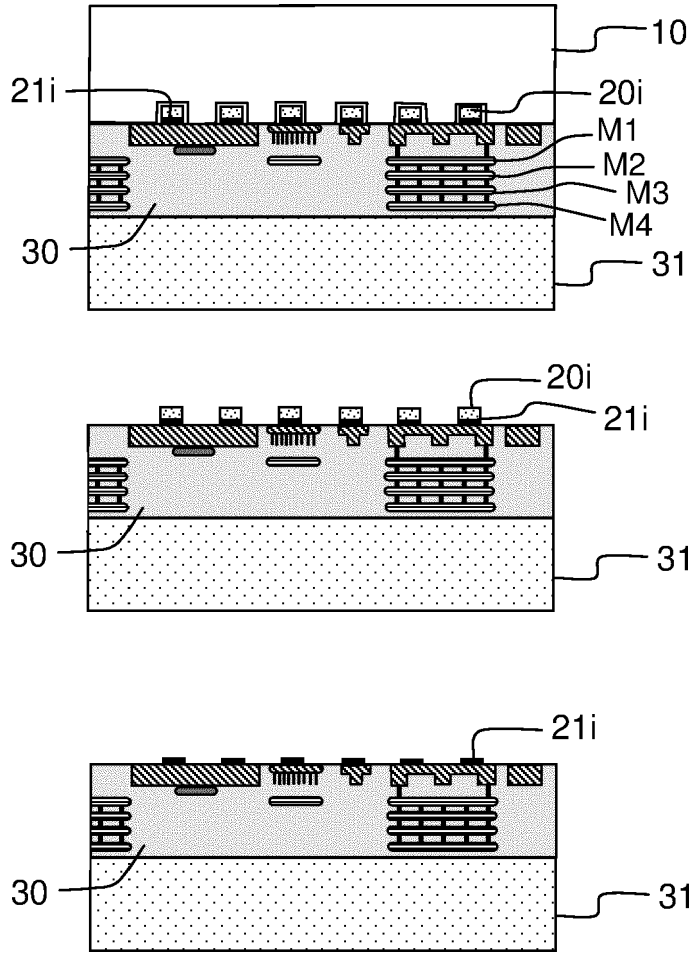


FIG.1c

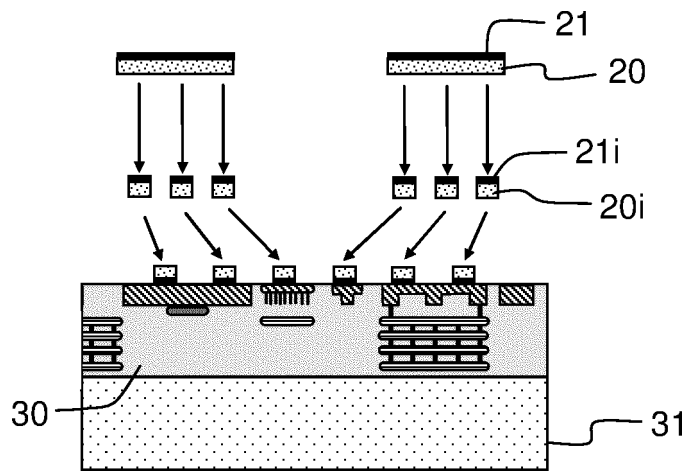


FIG.2

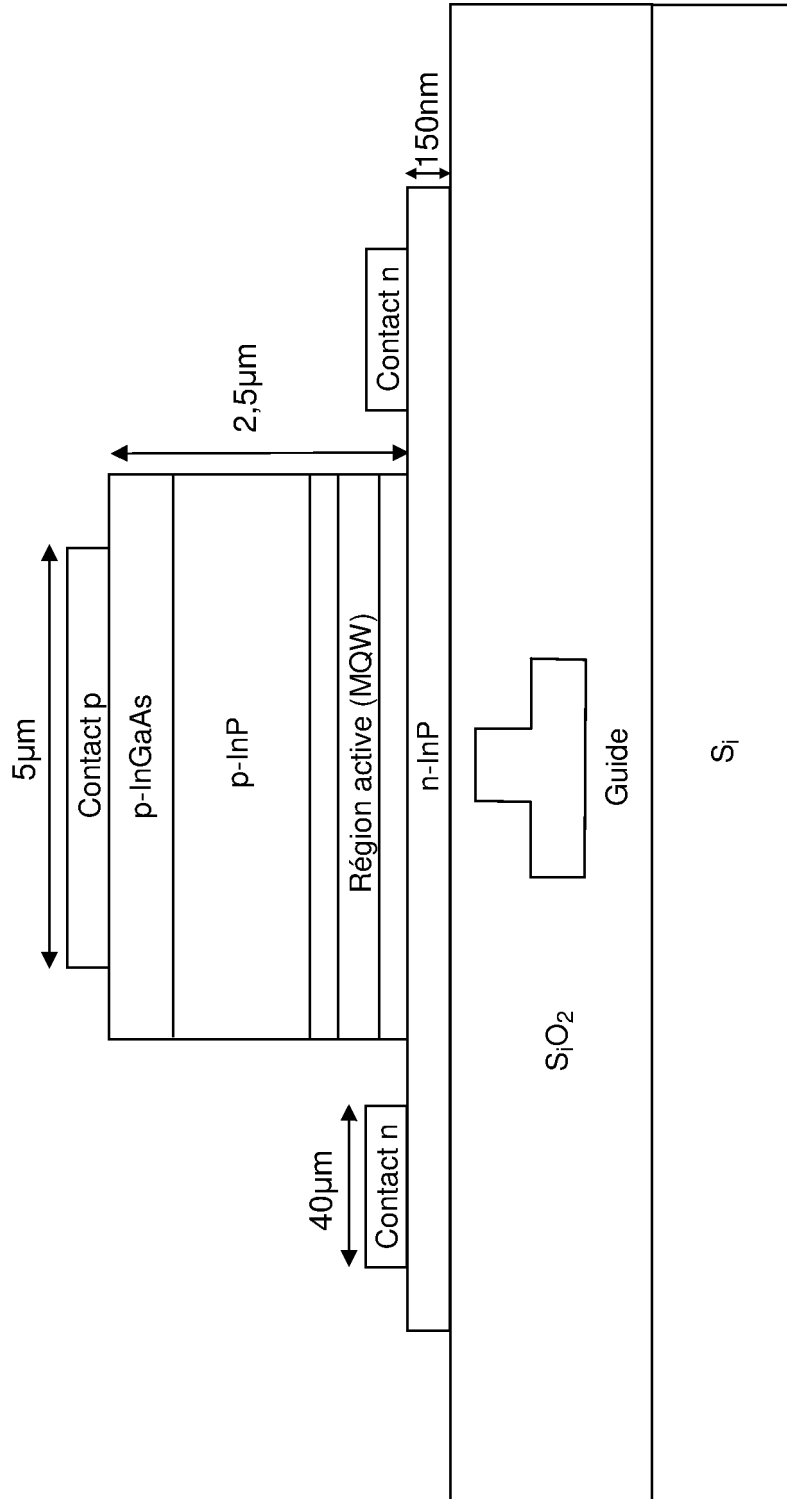


FIG.3

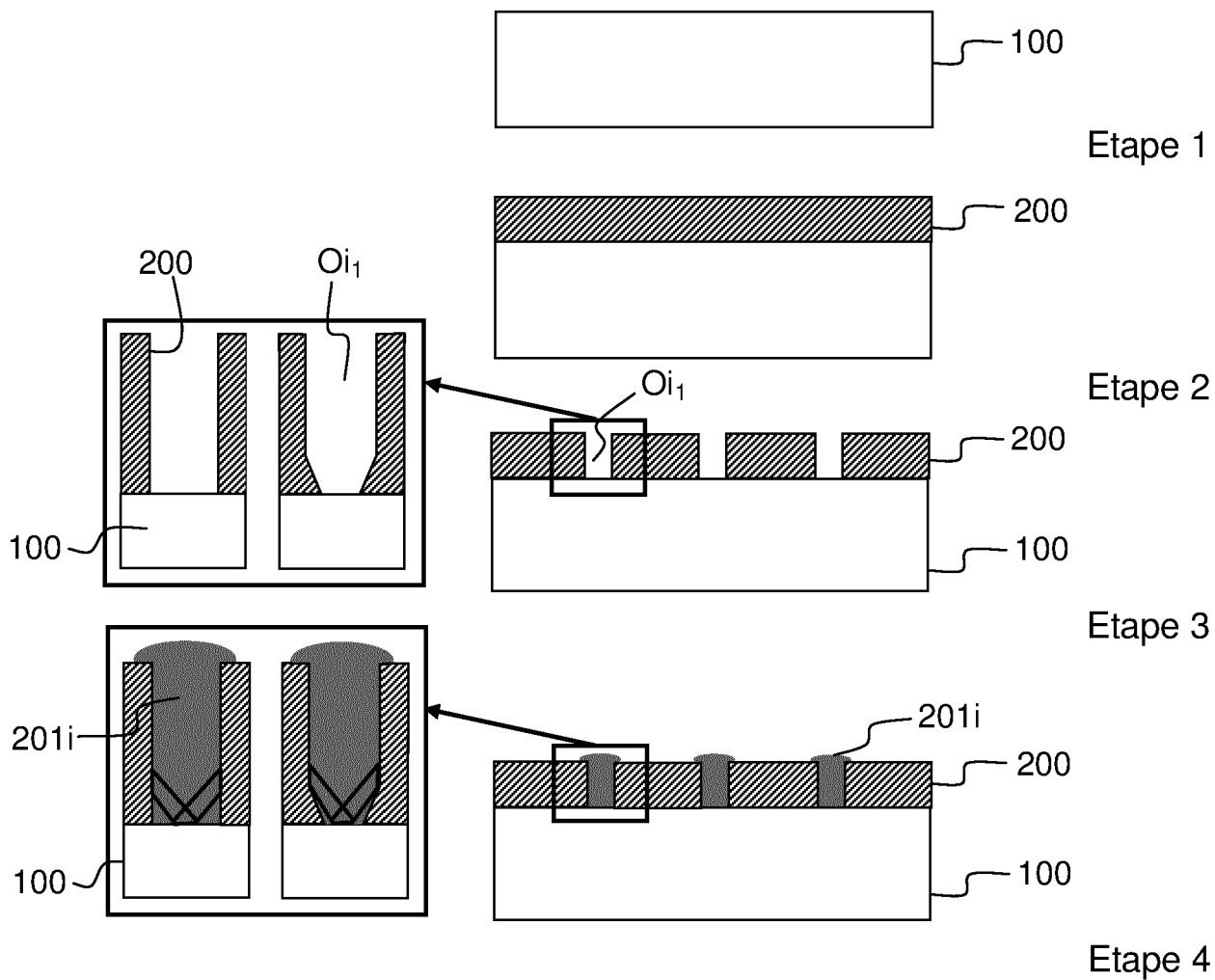


FIG.4a

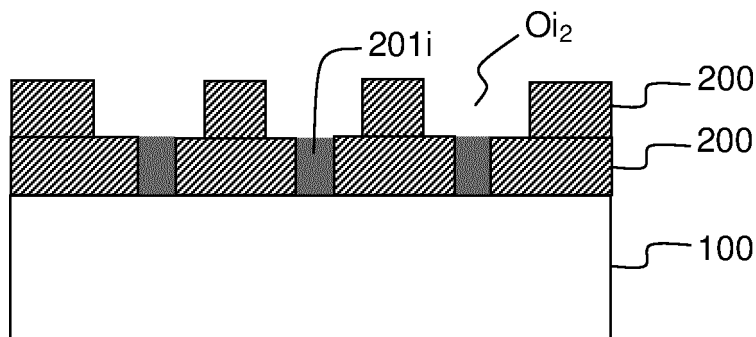
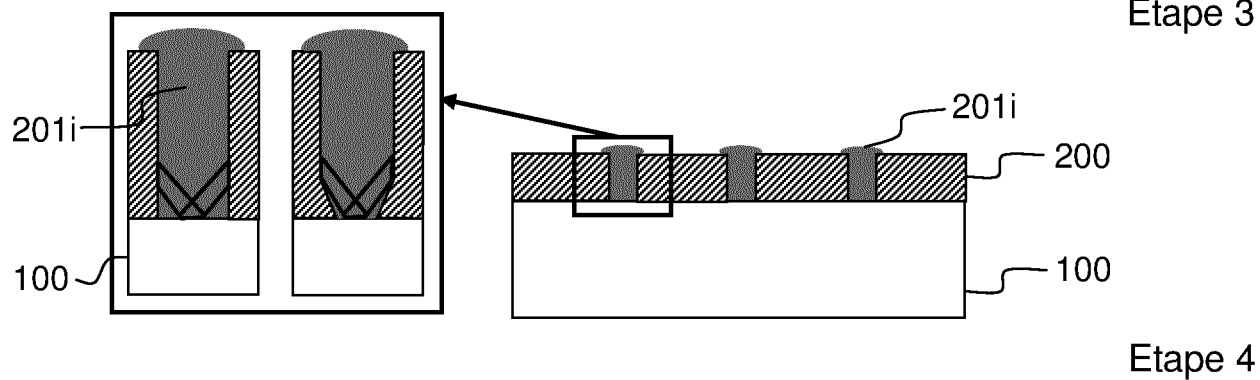


FIG.4b

Etape 5

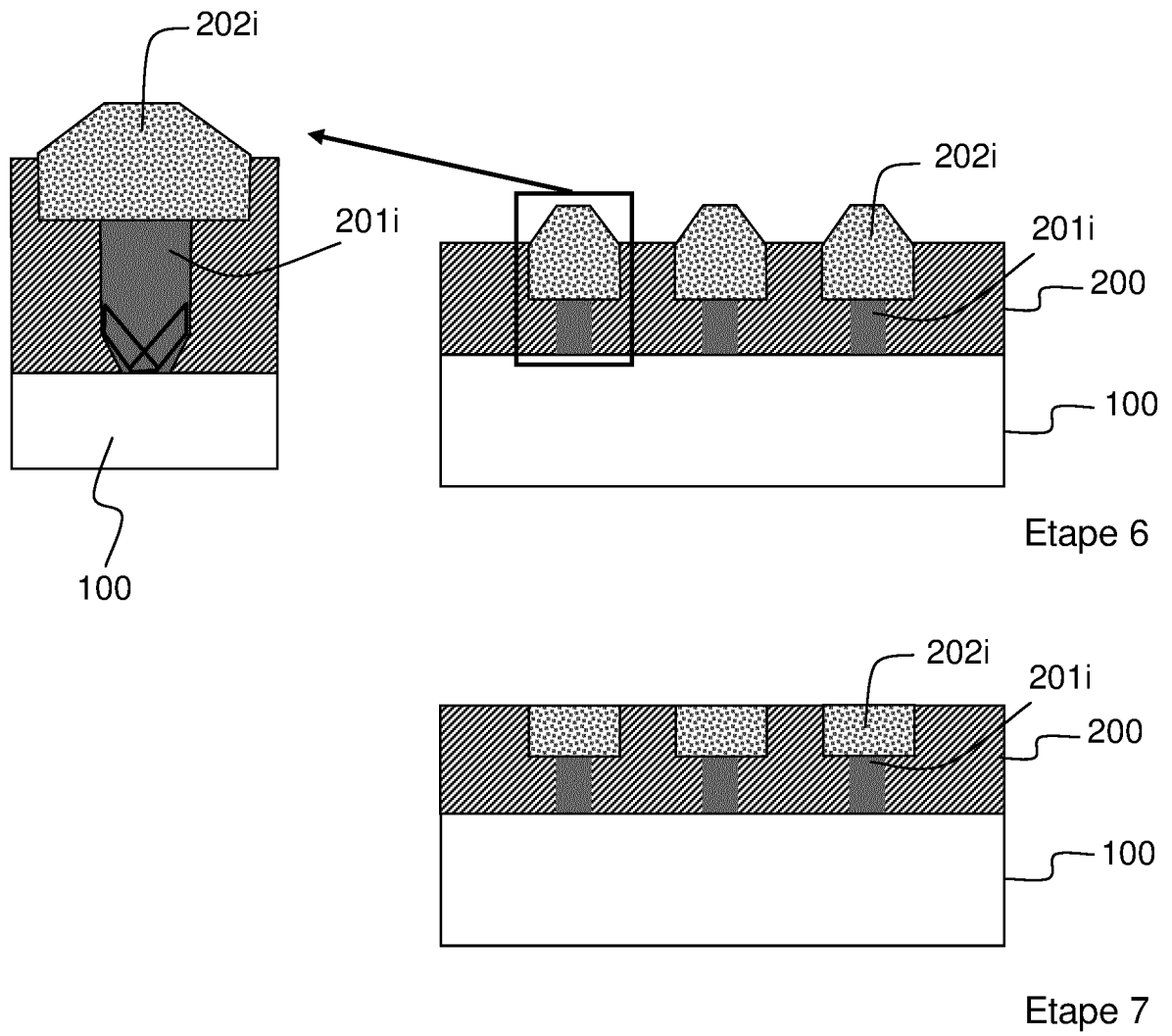


FIG.4c

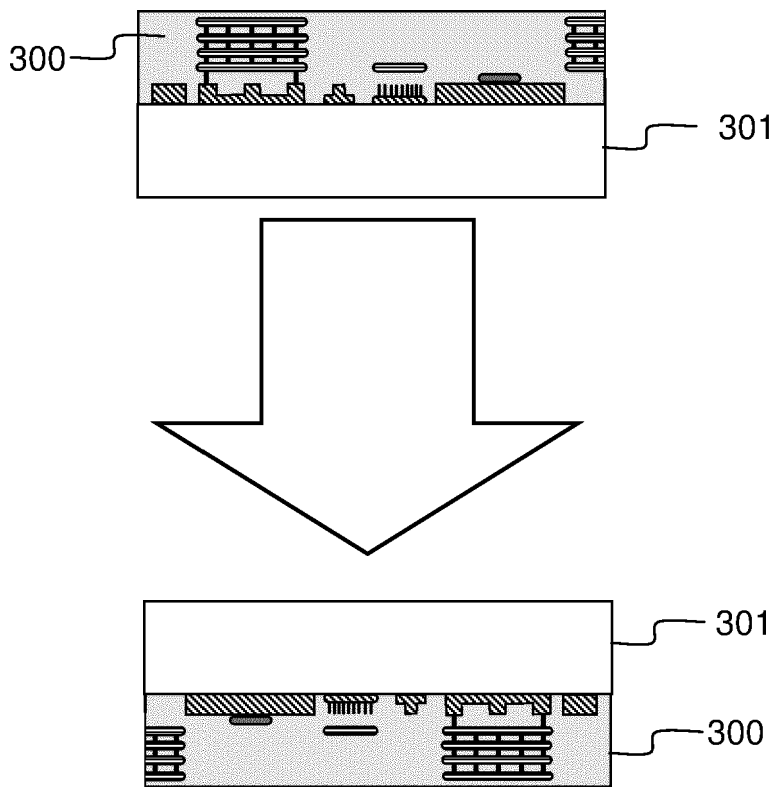


FIG.4d

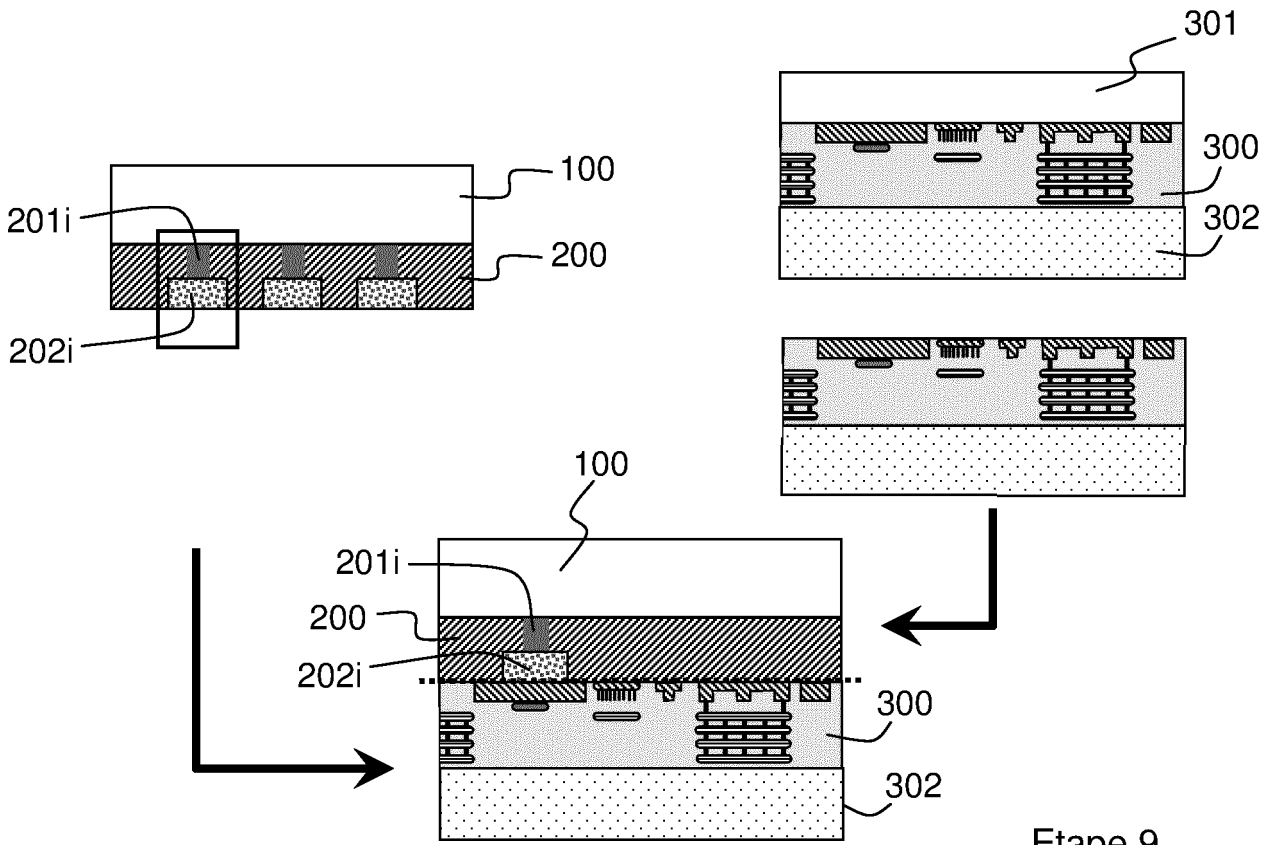
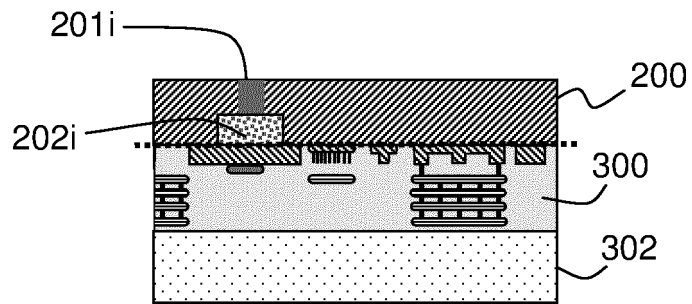
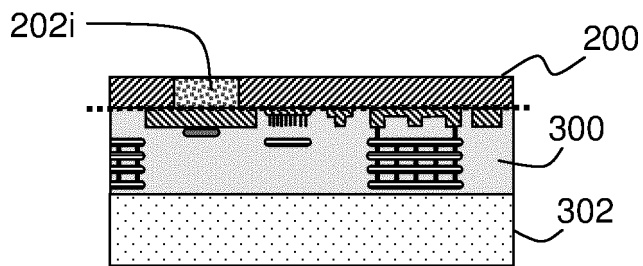


FIG.4e

Etape 9



Etape 10



Etape 11

FIG.4f

8/12

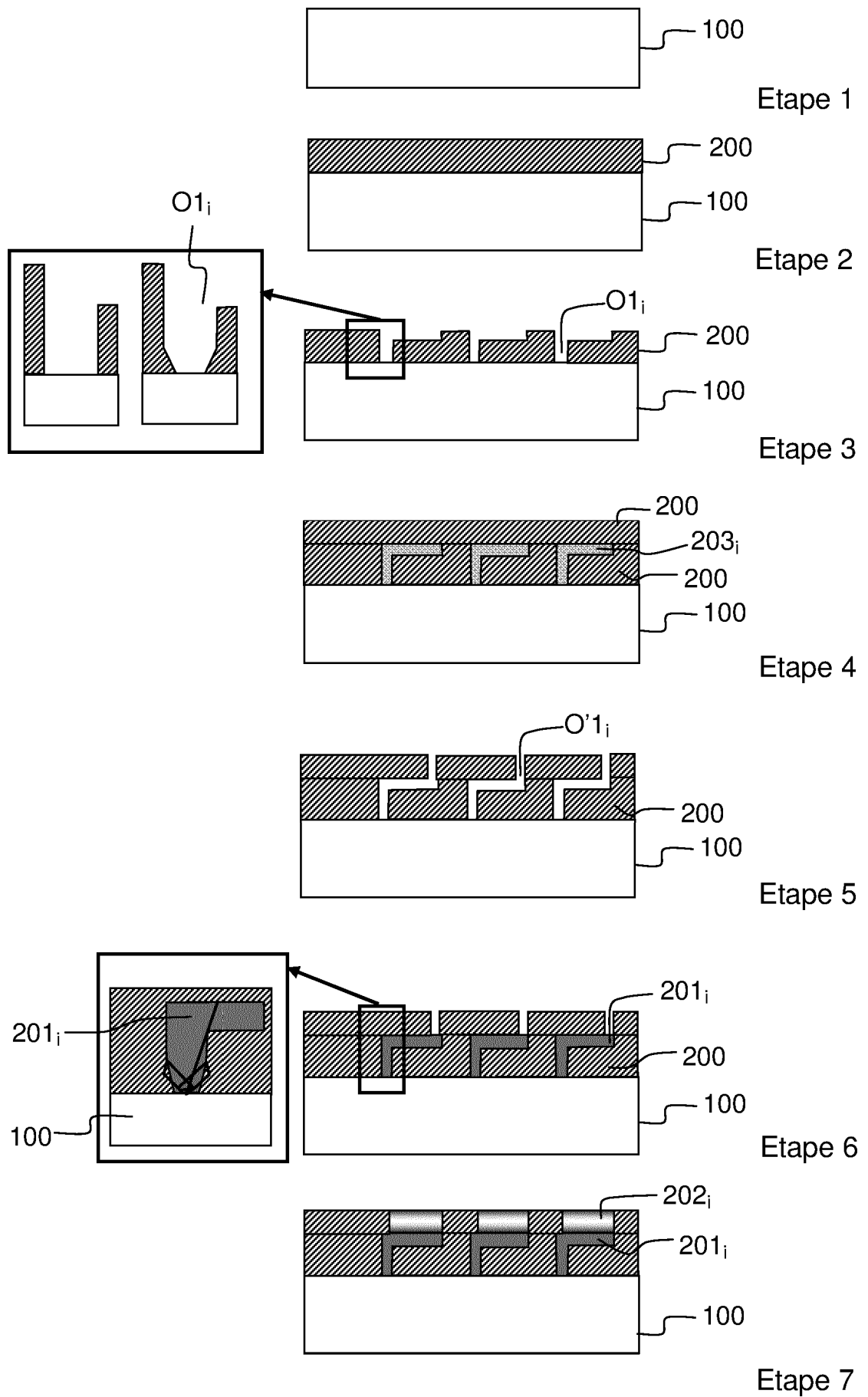
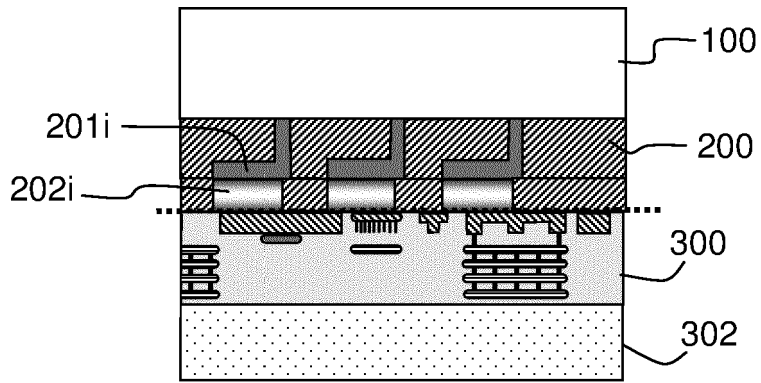
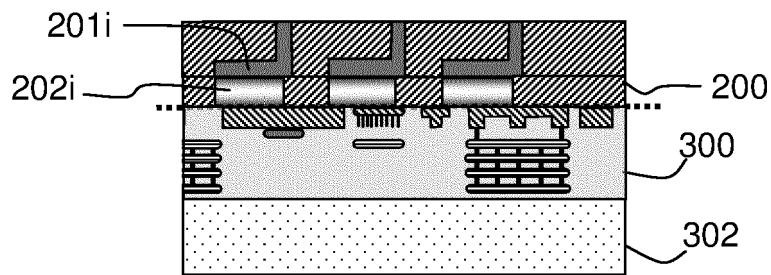


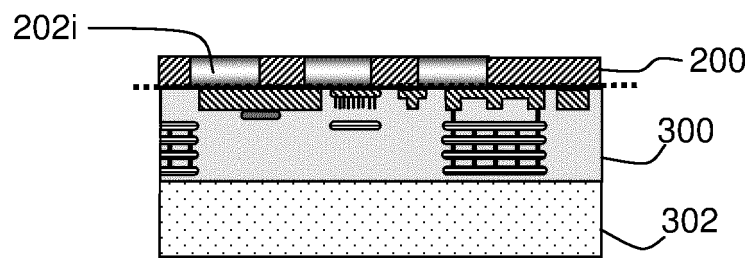
FIG.5



Etape 8



Etape 9



Etape 10

FIG.6

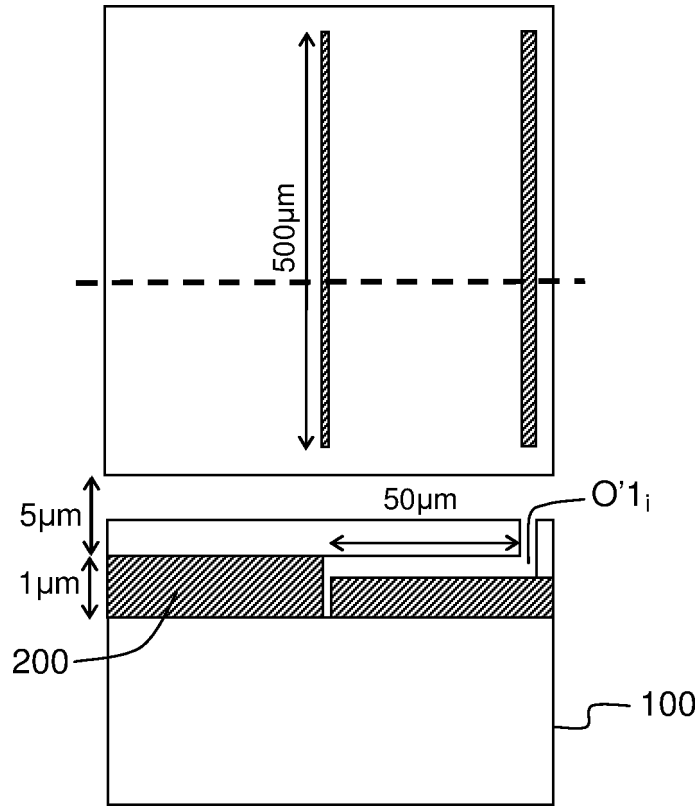


FIG.7a

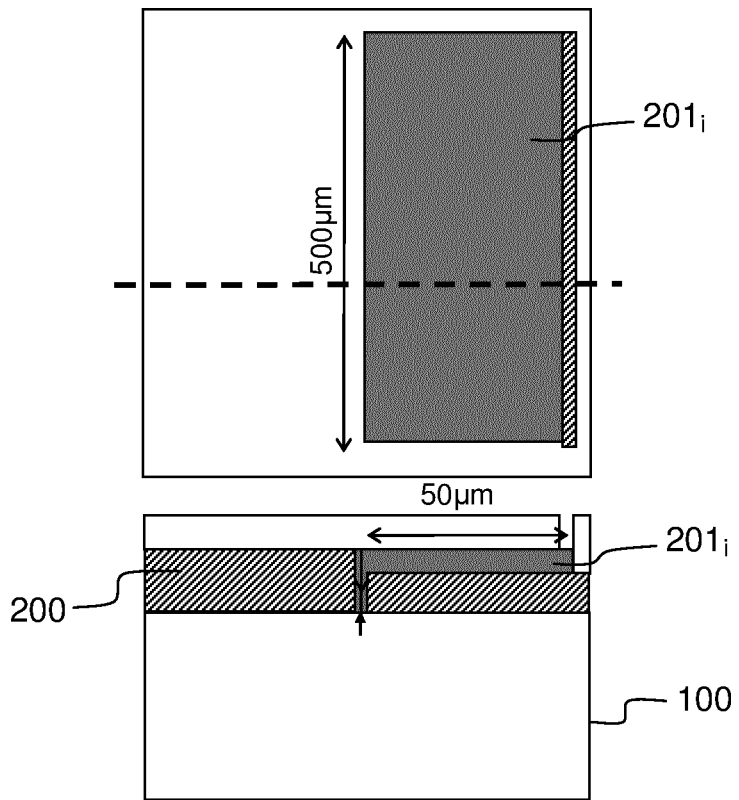


FIG.7b

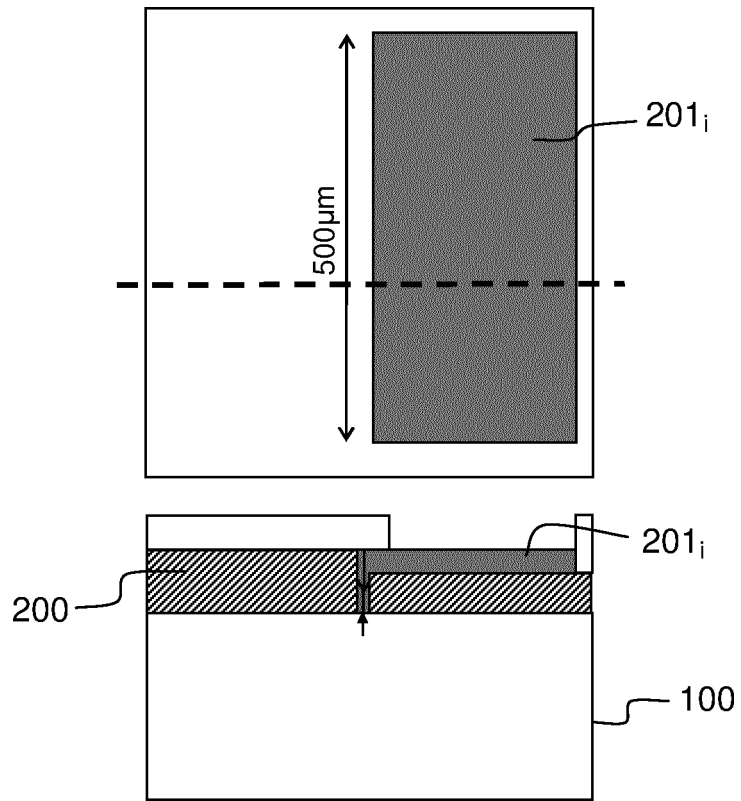


FIG.7c

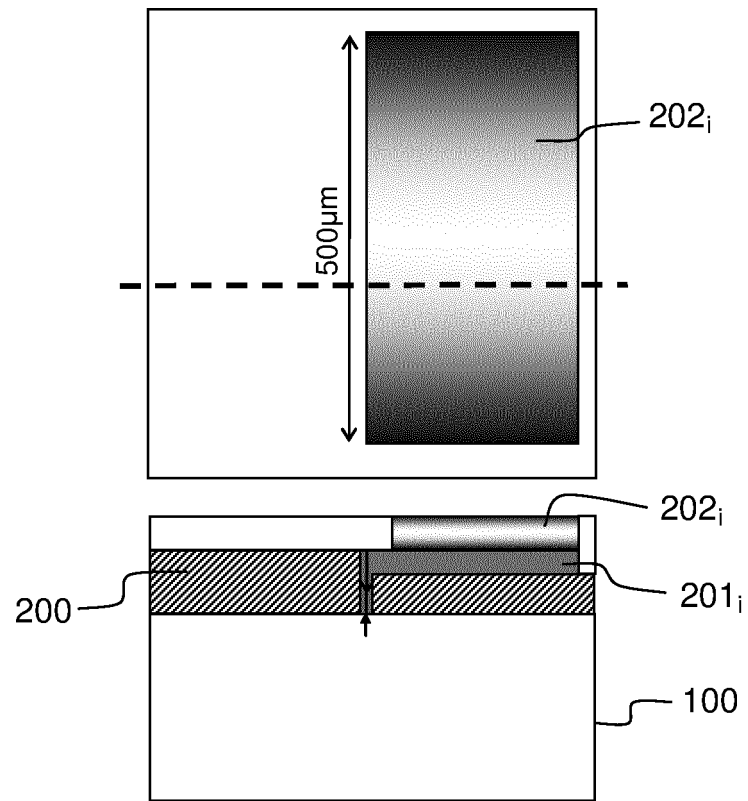


FIG.7d

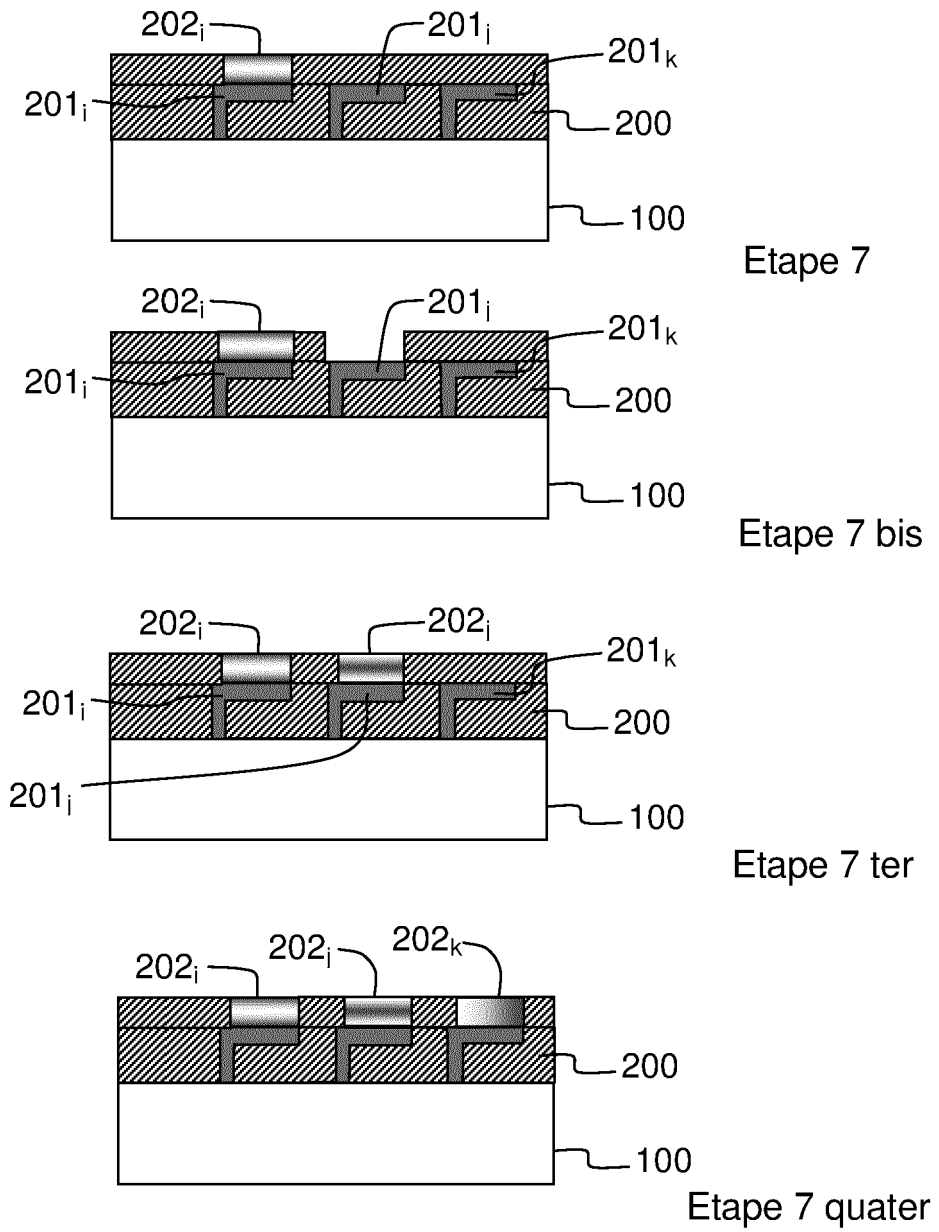


FIG.8

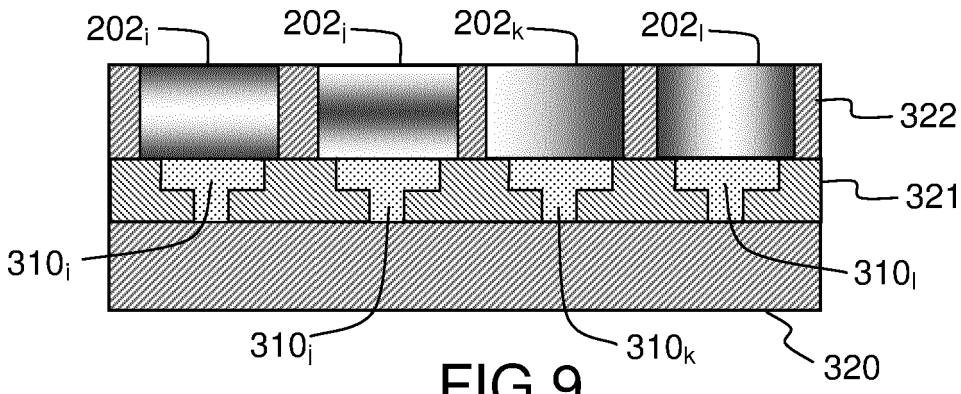


FIG.9

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**

US 2013/252361 A1 (LI JIZHONG [US] ET AL) 26 septembre 2013 (2013-09-26)

WO 2017/089676 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 1 juin 2017 (2017-06-01)

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

WO 2011/061296 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]; CLAVELIER LAURENT [FR];
CHARLET BA) 26 mai 2011 (2011-05-26)

US 9 401 583 B1 (CHENG CHENG-WEI [US] ET AL) 26 juillet 2016 (2016-07-26)

US 8 173 551 B2 (JIE BAI) 8 mai 2012 (2012-05-08)

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

NEANT