

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

①① N° de publication : **3 130 072**  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national : **21 13065**

⑤① Int Cl<sup>8</sup> : **H 01 L 31/18 (2022.01), H 01 L 27/14**

①②

## BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ Procédé de fabrication d'un dispositif optoélectronique.

②② Date de dépôt : 07.12.21.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public  
de la demande : 09.06.23 Bulletin 23/23.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du  
brevet d'invention : 23.08.24 Bulletin 24/34.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : **ALEDIA SAS — FR.**

⑦② Inventeur(s) : **PETITPREZ Emmanuel.**

⑦③ Titulaire(s) : **ALEDIA SAS.**

⑦④ Mandataire(s) : **CABINET HAUTIER.**

FR 3 130 072 - B1



## Description

### Titre de l'invention : Procédé de fabrication d'un dispositif optoélectronique

#### Domaine technique

[0001] L'invention concerne le domaine des technologies des semi-conducteurs. Elle trouve pour application particulièrement avantageuse la fabrication de dispositifs optoélectroniques comprenant des structures tridimensionnelles, par exemple des diodes électroluminescentes à base de fils ou de nanofils semi-conducteurs, des lasers, des photodétecteurs ou encore des cellules solaires.

#### ÉTAT DE LA TECHNIQUE

[0002] Les architectures dites 3D de dispositifs microélectroniques et optoélectroniques basées sur des réseaux de structures semi-conductrices tridimensionnelles, telles que des nanofils ou des microfils, sont considérées comme des alternatives prometteuses aux architectures classiques basées sur des structures semi-conductrices bidimensionnelles, telles que des couches planes.

[0003] De tels dispositifs à architecture 3D peuvent présenter une efficacité globale améliorée. Des réseaux ordonnés de nanofils à base d'un matériau semi-conducteur tel que le GaN, ou plus généralement à base d'un matériau à gap direct pour l'optoélectronique, présentent souvent une qualité cristalline supérieure à celle d'une couche plane à base du même matériau. Cela permet par exemple d'améliorer l'émission de lumière d'un dispositif optoélectronique tel qu'une diode électroluminescente à architecture 3D (LED 3D). Les propriétés optiques de tels réseaux permettent également d'améliorer l'extraction de la lumière.

[0004] La fabrication de dispositifs optoélectroniques à architecture 3D fonctionnels nécessite de structurer les réseaux ordonnés de structures 3D, par exemple pour définir des zones de contact du dispositif. D'autres zones de la plaque (ou wafer en anglais) sur lequel sont formés les nanofils nécessitent également d'être dépourvues desdits nanofils. C'est le cas par exemple des zones dédiées aux mesures ellipsométriques, qui doivent être planes. C'est également le cas des zones comprenant des marques d'alignement pour la lithographie, qui doivent rester repérables.

[0005] Plusieurs solutions connues permettent de former une zone dépourvue de structures 3D.

[0006] Une solution divulguée dans le document US 2010/116780 A1 consiste à prévoir, préalablement à la croissance des nanofils, des couches sacrificielles localisées au niveau des zones devant être exemptes de nanofils. La croissance est ensuite effectuée « pleine plaque », et les nanofils qui ont crû sur les couches sacrificielles sont retirés

par décollage ou « lift off » en anglais, en dissolvant les couches sacrificielles. En pratique cependant, les nanofils ne croissent pas de façon idéale sur les zones masquées telles que les couches sacrificielles. Des résidus de croissance, plus compacts, peuvent se former avec ou à la place des nanofils. Ces résidus et/ou croissances parasites génèrent une rugosité de surface présentant des inconvénients notables. Par exemple, cette rugosité de surface diffracte la lumière et rend difficile voire impossible la visualisation de structures sous-jacentes. De plus, la présence de cette rugosité de surface rend impossible la métrologie de couches minces par techniques optiques comme l'ellipsométrie, l'interférométrie ou encore la scattérométrie. Ces résidus sont plus difficiles à éliminer par lift off que les couches sacrificielles.

[0007] La présente invention vise à pallier au moins partiellement les inconvénients mentionnés ci-dessus.

[0008] En particulier, un objet de la présente invention est de proposer un procédé de fabrication d'un dispositif optoélectronique 3D permettant d'éliminer des croissances parasites au niveau de certaines zones déterminées.

[0009] Les autres objets, caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront à l'examen de la description suivante et des dessins d'accompagnement. Il est entendu que d'autres avantages peuvent être incorporés.

## **RÉSUMÉ**

[0010] Pour atteindre les objectifs mentionnés ci-dessus, un premier aspect concerne un procédé de fabrication d'un dispositif optoélectronique comprenant une première zone comprenant une pluralité de structures tridimensionnelles (3D), et une deuxième zone dépourvue desdites structures 3D.

[0011] Le procédé comprend au moins une fourniture d'un substrat comprenant une couche superficielle permettant la nucléation et la croissance des structures 3D, une formation d'une couche tampon couvrant le substrat au niveau de la deuxième zone, sans couvrir la première zone, une croissance des structures 3D dans la première zone à partir de la couche superficielle, ladite croissance formant des résidus au-dessus de la couche tampon, dans la deuxième zone, et une première gravure configurée pour éliminer les résidus et pour s'arrêter dans la couche tampon.

[0012] Lors de la croissance des structures 3D, les croissances parasites surviennent ainsi sur la couche tampon. Le transfert de topographie qui accompagne la première gravure, typiquement anisotrope, a ainsi lieu sur ou dans la couche tampon, qui peut ensuite être elle-même retirée sélectivement à la couche sous-jacente, par exemple lors d'une deuxième gravure isotrope.

[0013] La couche tampon permet donc d'éviter que la topographie des résidus ne soit transférée dans la couche sous-jacente lors de la première gravure des résidus. Ainsi, le

procédé permet d'obtenir avantageusement, après retrait de la couche tampon, une surface plane, sans croissance et sans rugosité. Une telle surface plane est notamment nécessaire lors de certaines étapes de fabrication et de métrologie, par exemple lors de mesures ellipsométriques. Cela permet également de rendre visibles les motifs présents sur le substrat (par exemple des marques d'alignement), ces motifs pouvant être nécessaires à la suite du procédé de fabrication.

[0014] Un autre aspect de l'invention concerne un dispositif comprenant un substrat, une première zone comprenant une pluralité de structures 3D et une deuxième zone comprenant une couche tampon surmontée par des résidus.

[0015] Avantageusement, la deuxième zone ne comprend pas de structures 3D et la couche tampon présente une épaisseur strictement supérieure à une épaisseur maximale des résidus, de façon à ce que ladite couche tampon puisse absorber un transfert de topographie des résidus lors d'une gravure des résidus.

### **BRÈVE DESCRIPTION DES FIGURES**

[0016] Les buts, objets, ainsi que les caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront mieux de la description détaillée de modes de réalisation de cette dernière qui sont illustrés par les dessins d'accompagnement suivants dans lesquels :

[0017] [Fig.1] La [Fig.1] illustre un substrat.

[0018] [Fig.2] La [Fig.2] illustre le dépôt d'une couche de nucléation sur le substrat.

[0019] [Fig.3] La [Fig.3] illustre le dépôt d'une couche de masquage sur la couche de nucléation.

[0020] [Fig.4] La [Fig.4] illustre le dépôt pleine plaque d'une couche tampon sur la couche de masquage.

[0021] [Fig.5] La [Fig.5] illustre la réduction de la couche tampon aux dimensions d'une zone d'intérêt.

[0022] [Fig.6] La [Fig.6] illustre la formation d'ouvertures dans la couche de masquage.

[0023] [Fig.7] La [Fig.7] illustre la croissance par épitaxie de structures 3D au travers de la couche de masquage ainsi que des croissances parasites ayant lieu sur la couche tampon.

[0024] [Fig.8] La [Fig.8] illustre la formation d'une encapsulation autour des structures 3D.

[0025] [Fig.9] La [Fig.9] illustre la gravure des croissances parasites présentes sur la couche tampon.

[0026] [Fig.10] La [Fig.10] illustre la gravure de la couche tampon et de l'encapsulation.

[0027] [Fig.11] La [Fig.11] illustre le dépôt pleine plaque d'une couche additionnelle de masquage, étape optionnelle pouvant avoir lieu après l'étape illustrée à la [Fig.5].

[0028] [Fig.12] La [Fig.12] illustre, dans le cas où l'étape décrite à la [Fig.11] a été mise en œuvre, la formation d'ouvertures dans la couche de masquage et la couche addi-

tionnelle de masquage, étape constituant donc une variante à l'étape illustrée à la [Fig.6].

[0029] [Fig.13] La [Fig.13] illustre un mode de réalisation dans lequel un espace est laissé entre le flanc de l'encapsulation et le flanc de la couche additionnelle de masquage entourant la couche tampon.

[0030] [Fig.14] La [Fig.14] illustre la gravure des croissances parasites présentes sur la couche tampon.

[0031] [Fig.15] La [Fig.15] illustre la gravure de la couche tampon.

[0032] Les dessins sont donnés à titre d'exemples et ne sont pas limitatifs de l'invention. Ils constituent des représentations schématiques de principe destinées à faciliter la compréhension de l'invention et ne sont pas nécessairement à l'échelle des applications pratiques. En particulier, les dimensions des différents éléments du dispositif optoélectronique ne sont pas forcément représentatives de la réalité.

### **DESCRIPTION DÉTAILLÉE**

[0033] Avant d'entamer une revue détaillée de modes de réalisation de l'invention, il est rappelé que l'invention comprend notamment les caractéristiques optionnelles ci-après pouvant être utilisées en association ou alternativement.

[0034] Selon un mode de réalisation, le procédé comprend en outre une deuxième gravure, configurée pour éliminer la couche tampon.

[0035] Selon un mode de réalisation, le procédé comprend en outre un dépôt d'une couche de masquage sur la couche superficielle et une formation d'ouvertures dans ladite couche de masquage au niveau de la première zone, de sorte à exposer la couche superficielle au travers desdites ouvertures. Dans cet exemple, la couche tampon est formée sur la couche de masquage et la croissance des structures 3D se fait au travers des ouvertures de la couche de masquage.

[0036] Selon un exemple, la deuxième gravure est configurée pour éliminer la couche tampon sélectivement à la couche de masquage.

[0037] Selon un exemple, le procédé comprend une formation d'une encapsulation des structures 3D, avant la première gravure.

[0038] Selon un exemple, l'encapsulation est formée de façon à laisser un espace entre ladite encapsulation et la couche tampon. Cet espace définit typiquement une troisième zone entre la première et la deuxième zone.

[0039] Selon un exemple, le procédé comprend un dépôt pleine plaque d'une couche additionnelle de masquage après la formation de la couche tampon, et une formation d'ouvertures au travers de ladite couche additionnelle de masquage et de la couche de masquage.

[0040] Selon un exemple, la couche additionnelle de masquage est à base du même matériau

que celui de la couche de masquage.

- [0041] Selon un mode de réalisation, la première gravure est configurée pour retirer une portion de la couche additionnelle de masquage recouvrant la couche tampon.
- [0042] Selon un exemple, la couche de masquage et la couche additionnelle de masquage présentent respectivement des épaisseurs  $e_3$  et  $e_9$  telles que  $e_3 + e_9 \leq 500$  nm.
- [0043] Selon un exemple, la couche additionnelle de masquage est déposée de telle sorte qu'un espace est préservé entre le flanc de l'encapsulation et une portion de la couche additionnelle de masquage disposée contre un flanc de la couche tampon.
- [0044] Selon un exemple, l'encapsulation est disposée de façon à laisser un espace entre ladite encapsulation et la couche additionnelle de masquage entourant la couche tampon.
- [0045] Selon un exemple, la première gravure est anisotrope.
- [0046] Selon un exemple, la deuxième gravure est anisotrope.
- [0047] Selon un exemple, la formation de la couche tampon est configurée de façon à ce que la couche tampon recouvre, en projection dans un plan de base (xy), intégralement une zone d'intérêt sous-jacente choisie parmi une zone de marques d'alignement, une zone de mesure ellipsométrique ou tout autre zone ou motif d'intérêt.
- [0048] Selon un exemple, la définition de la couche tampon se fait par photolithographie.
- [0049] Selon un exemple, les structures 3D sont à base d'un matériau III-V tel que le GaN, le GaAs, l'InP.
- [0050] Selon un exemple, la première gravure présente une sélectivité supérieure ou égale à 5:1, et de préférence supérieure ou égale à 10:1, entre le matériau de la couche tampon et le matériau de la couche de masquage.
- [0051] Selon un exemple, la formation des ouvertures de la couche de masquage se fait après le dépôt de la couche tampon.
- [0052] Selon un mode de réalisation du deuxième aspect de l'invention, relatif à un dispositif, l'épaisseur de la couche tampon est au moins deux fois supérieure à l'épaisseur des résidus.
- [0053] Selon un exemple, le dispositif comprend une encapsulation recouvrant les structures 3D.
- [0054] Selon un exemple, le dispositif comprend une couche de masquage sur le substrat et des ouvertures dans la couche de masquage au niveau de la première zone, les structures 3D s'étendant au travers desdites ouvertures.
- [0055] Selon un mode de réalisation, le dispositif comprend une couche additionnelle de masquage au contact de la couche tampon et sous les résidus, dans lequel la couche tampon présente une épaisseur strictement supérieure à la somme de l'épaisseur maximale des résidus et d'une épaisseur de ladite couche additionnelle de masquage.
- [0056] Dans la présente invention, le procédé est en particulier dédié à la fabrication de

diodes électroluminescentes à base de structures ou de nanostructures semiconductrices comme des fils ou nanofils semi-conducteurs, des structures pyramidales semiconductrices ou encore des murs nanométriques semiconducteurs (nano-walls).

- [0057] L'invention peut être mise en œuvre plus largement pour différents dispositifs opto-électroniques, voire pour des dispositifs ou microsystemes électromécaniques MEMS. L'invention peut par exemple être mise en œuvre dans le cadre de dispositifs laser ou photovoltaïque.
- [0058] Sauf mention explicite, il est précisé que, dans le cadre de la présente invention, la disposition relative d'une troisième couche intercalée entre une première couche et une deuxième couche, ne signifie pas obligatoirement que les couches sont directement au contact les unes des autres, mais signifie que la troisième couche est soit directement au contact des première et deuxième couches, soit séparée de celles-ci par au moins une autre couche ou au moins un autre élément.
- [0059] Ainsi, les termes et locutions « prendre appui » et « couvrir » ou « recouvrir » ne signifient pas nécessairement « au contact de ».
- [0060] Les étapes du procédé telles que revendiquées s'entendent au sens large et peuvent éventuellement être réalisées en plusieurs sous-étapes.
- [0061] Dans la présente demande de brevet, les termes « diode électroluminescente », « LED » ou simplement « diode » sont employés en synonymes. Une « LED » peut également s'entendre d'une « nano-LED », d'une « micro-LED ».
- [0062] Une portion ou un élément qualifié de « sacrificiel », signifie que cet élément est destiné à être « sacrifié », c'est-à-dire retiré lors d'une étape ultérieure de procédé.
- [0063] On entend par un substrat, une couche, un dispositif, « à base » d'un matériau M, un substrat, une couche, un dispositif comprenant ce matériau M uniquement ou ce matériau M et éventuellement d'autres matériaux, par exemple des éléments d'alliage, des impuretés ou des éléments dopants. Ainsi, une diode à base de GaN comprend typiquement du GaN et des alliages d'AlGa<sub>N</sub> ou d'InGa<sub>N</sub>.
- [0064] Une couche peut par ailleurs être composée de plusieurs sous-couches d'un même matériau ou de matériaux différents.
- [0065] On entend par « gravure sélective vis-à-vis de » ou « gravure présentant une sélectivité vis-à-vis de » une gravure configurée pour enlever un matériau A ou une couche A vis-à-vis d'un matériau B ou d'une couche B, et présentant une vitesse de gravure du matériau A supérieure à la vitesse de gravure du matériau B. La sélectivité est le rapport entre la vitesse de gravure du matériau A sur la vitesse de gravure du matériau B. La sélectivité entre A et B est notée  $S_{A,B}$ .
- [0066] Un repère, de préférence orthonormé, comprenant les axes x, y, z est représenté sur certaines figures annexées. Ce repère est applicable par extension aux autres figures d'une même planche de figures.

- [0067] Dans la présente demande de brevet, on parlera préférentiellement d'épaisseur pour une couche et de hauteur pour une structure ou un dispositif. L'épaisseur est prise selon une direction normale au plan d'extension principal de la couche, et la hauteur est prise perpendiculairement au plan de base xy. Ainsi, une couche présente typiquement une épaisseur selon z, lorsqu'elle s'étend principalement le long d'un plan xy, et un élément en saillie, par exemple une tranchée d'isolation, présente une hauteur selon z. Les termes relatifs « sur », « sous », « sous-jacent » se réfèrent préférentiellement à des positions prises selon la direction z.
- [0068] Les valeurs dimensionnelles s'entendent aux tolérances de fabrication et de mesure près.
- [0069] Les termes « sensiblement », « environ », « de l'ordre de » signifient, lorsqu'ils se rapportent à une valeur, « à 10% près » de cette valeur ou, lorsqu'ils se rapportent à une orientation angulaire, « à 10° près » de cette orientation. Ainsi, une direction sensiblement normale à un plan signifie une direction présentant un angle de  $90\pm 10^\circ$  par rapport au plan.
- [0070] Dans la présente demande de brevet, on entend par « une première zone » ou « une deuxième zone » une zone qui n'est pas forcément continue et qui ainsi peut être définie par une pluralité de sous-zones.
- [0071] Le terme « structure 3D » s'entend par opposition aux structures dites planaires ou 2D, qui présentent deux dimensions dans un plan très supérieures à la troisième dimension normale au plan. Ainsi, les structures 3D usuelles visées dans le domaine des LED 3D peuvent se présenter sous forme de fils, de nanofils ou de microfils, de pyramides ou nano-pyramides ou encore de nano-walls. Une structure 3D sous forme de fil, de microfil ou de nanofil, par exemple, présente une forme allongée selon la direction longitudinale. La dimension longitudinale du fil, selon z sur les figures, est supérieure, et de préférence très supérieure, aux dimensions transverses du fil, dans le plan xy sur les figures. La dimension longitudinale est par exemple au moins cinq fois, et de préférence au moins dix fois, supérieure aux dimensions transverses. Les structures 3D peuvent également se présenter sous forme de murs. Dans ce cas, seule une dimension transverse du mur est très inférieure aux autres dimensions, par exemple au moins cinq fois, et de préférence au moins dix fois, inférieure aux autres dimensions. Les structures 3D peuvent également se présenter sous forme de pyramides.
- [0072] La [Fig.10] illustre le résultat que le procédé selon l'invention permet d'obtenir : une plaque où certaines zones présentent à leur surface des structures 3D 6 régulièrement réparties et homogènes, et où d'autres zones sont dépourvues de ces mêmes structures 3D.
- [0073] Dans les exemples suivants, les structures 3D 6 sont des nanofils semiconducteurs. Il

est entendu que le procédé convient parfaitement à d'autres types de structures 3D, par exemple et de façon non limitative : des pyramides, des ailettes.

- [0074] Les nanofils s'étendent de préférence longitudinalement selon z. Ils peuvent présenter une hauteur comprise entre quelques dizaines de nanomètres et plusieurs micromètres, par exemple supérieure ou égale à 100 nm et inférieure ou égale à 20  $\mu\text{m}$ . Ils peuvent présenter différentes formes, en section dans le plan xy. Les nanofils à base de GaN présentent typiquement une section sensiblement hexagonale. La dimension maximale des nanofils dans le plan xy, par exemple le diamètre, peut être comprise entre quelques dizaines de nanomètres et plusieurs micromètres, par exemple entre 50 nm et 5  $\mu\text{m}$ . Ils présentent un sommet et une base. Leur base prend appui sur le substrat 1. Ils sont de préférence sensiblement parallèles entre eux et régulièrement distribués sur le substrat 1.
- [0075] Selon cet exemple, les nanofils 6 sont typiquement obtenus par croissance à partir d'une couche superficielle, ou couche de nucléation 2 déposée sur un substrat 1, au travers d'ouvertures 5 dans une couche de masquage 3.
- [0076] Le substrat 1 peut être notamment en saphir pour limiter le désaccord de paramètre de maille avec le GaN, ou en silicium pour réduire les coûts et pour des problématiques de compatibilité technologique. Dans ce dernier cas, il peut se présenter sous forme d'un wafer de diamètre 200 mm ou 300 mm. Il sert notamment de support aux structures 3D.
- [0077] Selon un exemple, le substrat 1 comprend une couche de nucléation 2, comprenant typiquement une ou plusieurs sous-couches d'un même matériau ou de matériaux différents. La couche de nucléation 2 est de préférence à base d'AlN. Elle peut être alternativement à base d'autres nitrures métalliques, par exemple GaN ou AlGaIn. Cette couche de nucléation 2 peut comprendre n'importe quelle couche connue de l'homme du métier permettant la nucléation et la croissance du matériau constituant les structures 3D 6, par exemple le GaN. Elle peut être formée sur le substrat 1 par épitaxie, de préférence par épitaxie en phase vapeur à précurseurs organométalliques MOVPE (acronyme de « MetalOrganic Vapour Phase Epitaxy ») par épitaxie par jets moléculaires MBE (acronyme anglais de « Molecular Beam Epitaxy ») ou par dépôt chimique en phase vapeur CVD (acronyme anglais de « Chemical Vapor Deposition »), typiquement par CVD halogénée. Elle présente avantageusement une épaisseur inférieure ou égale à 200 nm, de préférence inférieure ou égale à 100 nm, par exemple de l'ordre de 50 nm. Cela permet de limiter les contraintes mécaniques induites par cette couche 2 sur le substrat 1. Cela permet d'éviter une courbure du substrat 1 préjudiciable. Une telle épaisseur permet en outre de limiter l'apparition de défauts structuraux dans la couche de nucléation 2. En particulier, la croissance de cette couche de nucléation 2 peut être pseudomorphe, c'est-à-dire que les contraintes

d'épitaxie (liées notamment à la différence de paramètres de maille entre le Si et l'AlN, le GaN ou l'AlGaIn) peuvent être relâchées élastiquement pendant la croissance. La qualité cristalline de cette couche de nucléation 2 peut ainsi être optimisée.

[0078] La couche de masquage 3 est de préférence en un matériau diélectrique, par exemple en nitrure de silicium Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, ou en SiO<sub>2</sub>. Elle peut être déposée par dépôt chimique en phase vapeur CVD (acronyme de « Chemical Vapor Deposition ») sur la couche de nucléation 2. Elle masque en partie la couche de nucléation 2 et comprend des ouvertures 5 de préférence circulaires exposant des parties de la couche de nucléation 2. Ces ouvertures 5 présentent typiquement une dimension, par exemple un diamètre  $\Phi_0$  ou un diamètre moyen, comprise entre 30 nm et 2  $\mu\text{m}$ . Les ouvertures 5 peuvent être distribuées de façon régulière au sein de la couche de masquage 3, par exemple sous forme d'un réseau ordonné. Le pas, i.e. la distance séparant les centres de deux ouvertures 5 adjacentes, est inférieur ou égal à 10  $\mu\text{m}$ , et de préférence inférieur ou égal à 5  $\mu\text{m}$ . Il est avantageusement compris entre 100 nm et 5  $\mu\text{m}$ , et de façon encore plus avantageuse entre 100 nm et 2  $\mu\text{m}$ . Les ouvertures 5 présentent avantageusement une densité surfacique supérieure à 0,01  $\mu\text{m}^{-2}$ , et de façon plus avantageuse, supérieure à 0,04  $\mu\text{m}^{-2}$ . Cela permet d'obtenir *in fine* des structures 3D densément réparties sur le substrat 1. Si une couche additionnelle de masquage 9 a été déposée pleine plaque comme illustré sur la [Fig.11], les ouvertures 5 se font simultanément au travers de la couche de masquage 3 et de la couche additionnelle de masquage 9, et leur hauteur est de préférence égale à la somme des épaisseurs de la couche de masquage 3 et de la couche additionnelle de masquage 9. Ces ouvertures 5 peuvent être réalisées par exemple par gravure anisotrope sèche en chimie chlorée ou fluorocarbonée, par lithographie UV ou DUV (acronyme de Deep UV en anglais, soit UV lointain), par lithographie par faisceau électronique, ou par NIL (acronyme de Nanoimprint lithography). Une telle couche de masquage 3 permet une croissance localisée d'une structure 3D au niveau de chaque ouverture 5. En particulier, lors d'une étape de croissance préliminaire appelée germination, un germe à base de GaN se forme au niveau de l'ouverture 5 puis remplit ladite ouverture 5. La croissance ultérieure de la structure 3D 6 se fait alors à partir de ce germe, de façon localisée.

[0079] La couche tampon 4 peut être réalisée en SiO<sub>2</sub> ou SiN, en nitrures métalliques réfractaires comme le TiN, le WN ou le TaN, en un métal réfractaire comme W, Ti ou Ta ou encore être réalisée à base d'au moins l'un de ces matériaux. Ce matériau doit être choisi de telle sorte qu'il présente une bonne sélectivité de gravure par rapport au matériau de la couche de masquage 3 lors de la gravure de la couche tampon 4. Si la couche de masquage 3 est réalisée, comme donné en exemple, en Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, il est donc exclu de réaliser la couche tampon 4 en nitrure de silicium également.

[0080] La formation des nanofils 6 à base de GaN peut se faire par épitaxie, de préférence

par épitaxie en phase vapeur à précurseurs organométalliques MOVPE (acronyme de « MetalOrganic Vapour Phase Epitaxy. La source de gallium sous forme de précurseur organométallique peut typiquement être du triméthyl-gallium (TMGa) ou du triéthyl-gallium (TEGa). La source d'azote peut typiquement être de l'ammoniaque (NH<sub>3</sub>). Les flux des différents gaz pourront être adaptés de façon connue par l'homme du métier, en fonction notamment du volume du réacteur.

- [0081] La formation des nanofils 6 peut alternativement se faire par épitaxie par jets moléculaires MBE (acronyme anglais de « Molecular Beam Epitaxy »), par épitaxie en phase vapeur à précurseurs gazeux chlorés HVPE (acronyme de « Hydride Vapour Phase Epitaxy »), par dépôt chimique en phase vapeur CVD et MOCVD (acronyme de « MetalOrganic Chemical Vapor Deposition »).
- [0082] De façon optionnelle, des étapes classiques de préparation de surface du germe (nettoyage chimique, traitement thermique) peuvent être effectuées préalablement à la croissance épitaxiale des nanofils 6.
- [0083] Les nanofils peuvent comprendre une région à base de GaN dopée N. De façon connue, cette région dopée N peut résulter d'une croissance, d'une implantation et/ou d'un recuit d'activation. Le dopage N peut notamment s'obtenir directement lors de la croissance, à partir d'une source de silicium ou de germanium, par exemple par addition de vapeur silane ou disilane ou germane. Les conditions de croissance requises pour la formation de tels nanofils sont largement connues.
- [0084] L'encapsulation 8 peut être réalisée en résine photosensible ou être à base de matériaux inorganiques tels que le SiO<sub>2</sub>.
- [0085] Le retrait des résidus ou croissances parasites 7 à base de GaN déposés sur la couche tampon 4 lors de la formation des nanofils 6 se fait de préférence au moyen d'une gravure sèche par plasma chloré. Il peut s'agir d'une gravure ionique réactive RIE (acronyme anglais « Reactive-Ion Etching ») ou ICP-RIE (acronyme anglais « Inductively Coupled Plasma Reactive-Ion Etching »). Le précurseur chloré peut par exemple être à base de Cl<sub>2</sub>, de BCl<sub>3</sub> ou d'un mélange de ces deux composés. Le retrait des croissances parasites 7 peut également se faire par gravure ionique IBE (acronyme anglais de « Ion Beam Etching »).
- [0086] Si une couche additionnelle de masquage 9 a été déposée pleine plaque comme illustré sur la [Fig.11], il est possible de configurer la gravure des croissances parasites 7 pour graver simultanément la couche additionnelle de masquage 9 sous-jacente, comme illustré à la [Fig.14]. Pour ce faire, il est préférable que l'épaisseur  $e_9$  de la couche additionnelle de masquage 9 soit inférieure à 50 nm. Cela permet de faciliter la gravure simultanée des deux couches.
- [0087] La gravure des croissances parasites 7 présente l'inconvénient de transférer la topographie de ces mêmes croissances parasites 7 à la couche sous-jacente. Selon

l'invention, cette couche sous-jacente est formée de la couche additionnelle de masquage 9, si une telle couche a été déposée, et de la couche tampon 4. Dans le cas où une couche additionnelle de masquage 9 protège la couche tampon 4 de cette première gravure, il faut que cette même couche additionnelle de masquage 9 soit entièrement gravée au-dessus de la zone d'intérêt et que la couche tampon 4 soit elle aussi gravée. Ainsi, il est nécessaire de garantir que l'épaisseur  $e_4$  de la couche tampon 4 est suffisante pour absorber la première gravure et éviter que la couche de masquage 3 ne soit endommagée. Ainsi, de préférence, la couche tampon 4 présente une épaisseur minimale de 100nm. Avantageusement, l'épaisseur  $e_4$  de la couche tampon 4 est supérieure à l'épaisseur maximale  $e_{7max}$  des croissances parasites 7 de façon à ce que ladite couche tampon 4 puisse absorber un transfert de topographie des croissances parasites 7 lors d'une gravure de ces mêmes croissances parasites 7. Le rapport entre l'épaisseur  $e_4$  de la couche tampon 4 et l'épaisseur maximale  $e_{7max}$  des croissances parasites 7 est de préférence supérieur à 2, de préférence supérieur à 5. Le dimensionnement en épaisseur de la couche tampon 4 et/ou de la couche additionnelle de masquage 9 est effectué de manière à absorber le transfert de topographie lié à la gravure des croissances parasites 7.

[0088] Le retrait sélectif de la couche tampon 4 peut se faire par gravure isotrope humide. Il est possible d'utiliser une solution de HF pour une couche tampon 4 en SiO<sub>2</sub>, une solution de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> pour une couche tampon 4 en SiN, une solution présentant des rapports en volume variant entre 5:1:1 et 7:2:1 de H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, et NH<sub>4</sub>OH respectivement (par exemple la solution Standard Clean 1 ®) pour une couche tampon 4 en nitrure métallique, et une solution de HCl pour une couche tampon 4 en métal. Les gravures humides permettent des sélectivités de gravure très élevées, par exemple entre le SiO<sub>2</sub> et le Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ou entre le TiN et le SiO<sub>2</sub>. Une gravure sèche est également possible, à condition qu'elle soit suffisamment sélective par rapport à la couche sous-jacente.

[0089] Le retrait de l'encapsulation 8 se fait par des procédés bien connus dans le domaine de la microélectronique, tels qu'une gravure sèche ou humide. Ce retrait doit se faire sélectivement par rapport aux nanofils.

[0090] Par ailleurs, si une couche additionnelle de masquage 9 n'est pas déposée par la suite, il est envisageable de réaliser l'étape illustrée à la [Fig.6] avant celle illustrée à la [Fig.5]. Il est cependant préférable de réaliser les ouvertures 5 dans la couche de masquage 3 après la formation de la couche tampon 4. Cela permet d'éviter la détérioration desdites ouvertures 5 lors du dépôt et/ou de la structuration de ladite couche tampon 4, assurant ainsi de donner aux nanofils 6 la forme des ouvertures 5 telles que réalisées et de garantir une croissance homogène.

[0091] Avantageusement, une couche additionnelle de masquage 9 est déposée pleine

plaque après le dépôt de la couche tampon 4 et avant la création des ouvertures 5 dans la couche de masquage 3 et dans la couche additionnelle de masquage 9.

- [0092] En effet, la présence de la couche tampon 4, et donc d'oxyde, de nitrure métallique ou encore de métal réfractaire, peut perturber la croissance des structures 3D. La couche additionnelle de masquage 9, déposée après la couche tampon 4, permet ainsi d'isoler l'étape d'épitaxie de la couche tampon 4 et donc d'améliorer la croissance des nanofils 6 avoisinant la couche tampon 4.
- [0093] Préférentiellement, la couche additionnelle de masquage 9 est dans le même matériau que la couche de masquage 3. Cela permet d'obtenir un environnement homogène pour la croissance des nanofils 6 de GaN et donc d'obtenir une croissance homogène.
- [0094] La somme des épaisseurs de la couche de masquage 3 et de la couche additionnelle de masquage 9 est avantageusement inférieure à 500 nm, de préférence de l'ordre de 80 nm. Cela a pour effet de faciliter la croissance des nanofils 6 au travers des ouvertures 5.
- [0095] Préférentiellement, comme illustré sur la [Fig.13], l'encapsulation 8 est disposée de façon à laisser un espace entre ladite encapsulation 8 et la couche tampon 4. Cet espace définit typiquement une troisième zone 300 entre la première zone 100 et la deuxième zone 200. Laisser un tel espace entre l'encapsulation 8 et la couche tampon 4 permet de tolérer un éventuel désalignement entre la localisation de la couche tampon 4 et la formation de l'encapsulation 8, typiquement définie par un aligneur de masque. Cela permet également d'améliorer l'accès aux solutions de gravure isotropes. La gravure de la couche additionnelle de masquage 9 et/ou de la couche tampon 4 est ainsi améliorée.
- [0096] Dans un exemple où le procédé ne comprend pas le dépôt d'une couche additionnelle de masquage 9, il est également possible et avantageux de laisser un espace entre le flanc 80 de l'encapsulation 8 et le flanc 40 de la couche tampon 4.
- [0097] Avantageusement, la première gravure, ou la deuxième gravure, ou la première et la deuxième gravures sont anisotropes. Une attaque normale au plan du substrat 1 et non dans toutes les directions de l'espace a en effet l'avantage de limiter la détérioration du flanc 80 de l'encapsulation 8 protégeant les structures 3D 6, et donc d'anticiper toute altération des structures 3D 6.
- [0098] Préférentiellement, la surface de la couche tampon 4 projetée dans le plan du substrat 1 est configurée pour recouvrir intégralement une zone d'intérêt sous-jacente choisie parmi une zone de marques d'alignement ou une zone de mesure ellipsométrique ou tout autre zone ou motif d'intérêt dont on souhaite conserver la planéité et/ou la visibilité. Cela permet, une fois la couche tampon 4 retirée par gravure, d'avoir un accès visuel à cette zone d'intérêt sous-jacente.
- [0099] Les paramètres de la deuxième gravure sont choisis de façon à conserver une

épaisseur de couche de masquage 3 après la gravure totale de la couche tampon 4. Plus particulièrement, la vitesse de gravure du matériau de la couche tampon 4 est significativement supérieure à celle du matériau de la couche de masquage 3. De préférence, elle est cinq fois supérieure, et de façon encore plus avantageuse, elle est dix fois supérieure. Une bonne sélectivité de gravure entre ces deux matériaux permet lors de la deuxième gravure de retirer efficacement la couche tampon 4 sans retirer ou endommager la couche de masquage 3.

- [0100] Avantageusement, les structures 3D sont de préférence en GaN. Elles peuvent alternativement être en GaInN, GaAs, GaInAs, InP, InAsP, GaSb ou encore une combinaison de ces matériaux.
- [0101] Le procédé peut également comprendre le dépôt d'autres couches, comme par exemple une couche antireflet déposée sur la couche de nucléation. Dans cet exemple, des ouvertures sont réalisées dans la couche antireflet, préférentiellement de façon simultanée à la formation des ouvertures 5 dans la couche additionnelle de masquage 9 et dans la couche de masquage 3, de façon à exposer la couche de nucléation 2.
- [0102] Afin de pallier un potentiel désalignement entre la couche tampon 4, dont les dimensions sont déterminées par exemple par le placement d'un photorépétiteur sur des marques d'alignement, et la gravure de cette même couche tampon 4, dont la localisation dépend plutôt d'un aligneur de masque, il est préférable que les dimensions de la zone de gravure soient supérieures à celles de la couche tampon 4.
- [0103] De ce fait, la couche de masquage 3 avoisinant la couche tampon 4 subit elle aussi l'étape de gravure de la couche tampon 4.
- [0104] Dans le cas où une couche additionnelle de masquage 9 a été déposée, les zones de cette couche additionnelle 9 déposées contre les flancs de la couche tampon 4 subsistent au moins partiellement après gravure de la couche tampon 4, formant ainsi des excroissances dans la direction z, comme représenté sur la [Fig.15].
- [0105] A la fois la surgravure et les excroissances de la couche de masquage 3 sont détectables par une coupe transversale, ce qui constitue un indice de la mise en œuvre du présent procédé.
- [0106] Cette détection peut être effectuée à partir d'analyses de microscopie électronique, en particulier par Microscopie Electronique à Balayage (MEB) ou par Microscopie Electronique en Transmission (MET ou TEM).
- [0107] L'invention n'est cependant pas limitée aux modes de réalisations précédemment décrits.
- [0108] En particulier, le nombre, la forme et le matériau des structures 3D peuvent être adaptés en fonction des dispositifs optoélectroniques. Des matériaux autres que ceux mentionnés peuvent également être utilisés pour la confection de la couche de masquage 3, la couche tampon 4, la couche additionnelle de masquage 9 et

l'encapsulation 8.

## Revendications

- [Revendication 1] Procédé de fabrication d'un dispositif optoélectronique comprenant une première zone (100) comprenant une pluralité de structures tridimensionnelles (3D), et une deuxième zone (200) dépourvue desdites structures 3D, ledit procédé comprenant au moins :
- Une fourniture d'un substrat (1) comprenant une couche superficielle (2) permettant la nucléation et la croissance des structures 3D,
  - Une formation d'une couche tampon (4) couvrant le substrat (1) au niveau de la deuxième zone (200), sans couvrir la première zone (100),
  - Une croissance des structures 3D (6) dans la première zone (100) à partir de la couche superficielle (2), ladite croissance formant des résidus (7) au-dessus de la couche tampon (4), dans la deuxième zone (200),
  - Une formation d'une encapsulation (8) des structures 3D, avant
  - une première gravure configurée pour éliminer les résidus (7) et pour s'arrêter dans la couche tampon (4).
- [Revendication 2] Procédé selon la revendication précédente comprenant une deuxième gravure, configurée pour éliminer la couche tampon (4).
- [Revendication 3] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes comprenant un dépôt d'une couche de masquage (3) sur la couche superficielle (2), et une formation d'ouvertures (5) dans ladite couche de masquage (3), au niveau de la première zone (100), de sorte à exposer la couche superficielle (2) au travers desdites ouvertures (5), dans lequel la couche tampon (4) est formée sur la couche de masquage (3) et dans lequel la croissance des structures 3D se fait au travers des ouvertures (5) de la couche de masquage (3).
- [Revendication 4] Procédé selon la revendication précédente en combinaison avec la revendication 2, dans lequel la deuxième gravure est configurée pour éliminer la couche tampon (4) sélectivement à la couche de masquage (3).
- [Revendication 5] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'encapsulation (8) est formée de façon à laisser un espace entre

- ladite encapsulation (8) et la couche tampon (4).
- [Revendication 6] Procédé selon l'une quelconque des revendications 3 à 5, comprenant un dépôt pleine plaque d'une couche additionnelle de masquage (9) après la formation de la couche tampon (4), et une formation d'ouvertures (5) au travers de ladite couche additionnelle de masquage (9) et de la couche de masquage (3).
- [Revendication 7] Procédé selon la revendication précédente, dans lequel la couche additionnelle de masquage (9) est à base du même matériau que celui de la couche de masquage (3).
- [Revendication 8] Procédé selon l'une quelconque des deux revendications précédentes, dans lequel la première gravure est configurée pour retirer une portion de la couche additionnelle de masquage (9) recouvrant la couche tampon (4).
- [Revendication 9] Procédé selon l'une quelconque des trois revendications précédentes, dans lequel la couche de masquage (3) et la couche additionnelle de masquage (9) présentent respectivement des épaisseurs  $e_3$  et  $e_9$  telles que  $e_3 + e_9 \leq 500$  nm.
- [Revendication 10] Procédé selon la revendication 5 en combinaison avec l'une quelconque des revendications 6 à 9, dans lequel la couche additionnelle de masquage (9) est déposée de telle sorte qu'un espace est préservé entre un flanc (80) de l'encapsulation (8) et une portion de la couche additionnelle de masquage (9) disposée contre un flanc (40) de la couche tampon (4).
- [Revendication 11] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la première gravure est anisotrope.
- [Revendication 12] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes en combinaison avec la revendication 2, dans lequel la deuxième gravure est isotrope.
- [Revendication 13] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la formation de la couche tampon (4) est configurée de façon à ce que la couche tampon (4) recouvre, en projection dans un plan de base (xy), intégralement une zone d'intérêt sous-jacente choisie parmi une zone de marques d'alignement, une zone de mesure ellipsométrique.
- [Revendication 14] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la définition de la couche tampon (4) se fait par photolithographie.
- [Revendication 15] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les structures 3D sont à base d'un matériau III-V tel que le GaN,

le GaAs, l'InP.

- [Revendication 16] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes en combinaison avec la revendication 3, dans lequel la première gravure présente une sélectivité supérieure ou égale à 5:1, et de préférence supérieure ou égale à 10:1, entre le matériau de la couche tampon (4) et le matériau de la couche de masquage (3).
- [Revendication 17] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes en combinaison avec la revendication 3, dans lequel la formation des ouvertures (5) de la couche de masquage (3) se fait après le dépôt de la couche tampon (4).
- [Revendication 18] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel la couche tampon (4) présente une épaisseur ( $e_4$ ) strictement supérieure à une épaisseur maximale ( $e_{7max}$ ) des résidus (7), de façon à ce que ladite couche tampon (4) puisse absorber un transfert de topographie des résidus (7) lors d'une gravure des résidus (7).
- [Revendication 19] Procédé selon la revendication précédente, dans lequel l'épaisseur ( $e_4$ ) de la couche tampon (4) est au moins deux fois supérieure à l'épaisseur maximale ( $e_{7max}$ ) des résidus (7), et de préférence au moins cinq fois supérieure.

[Fig. 1]

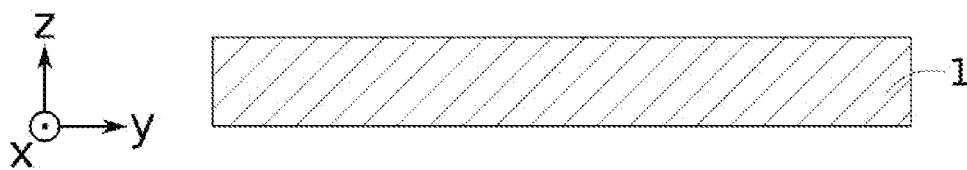


FIG. 1

[Fig. 2]

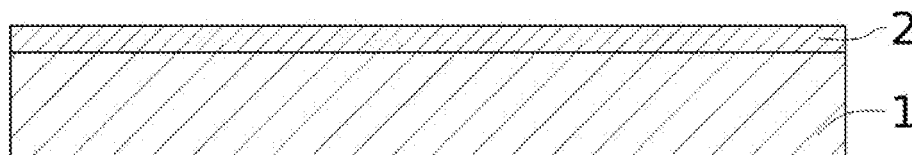


FIG. 2

[Fig. 3]

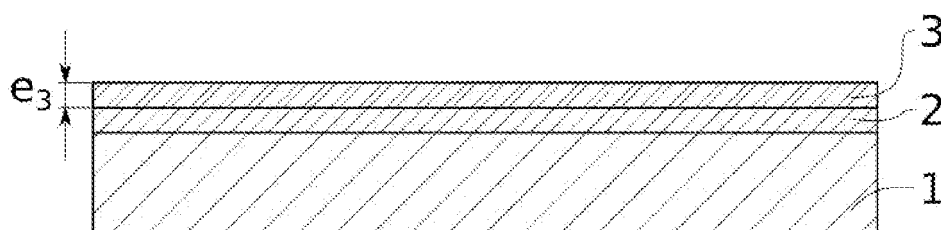


FIG. 3

[Fig. 4]

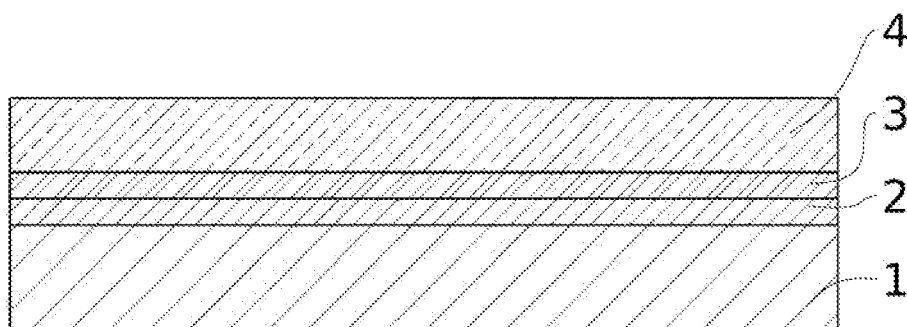


FIG. 4

[Fig. 5]

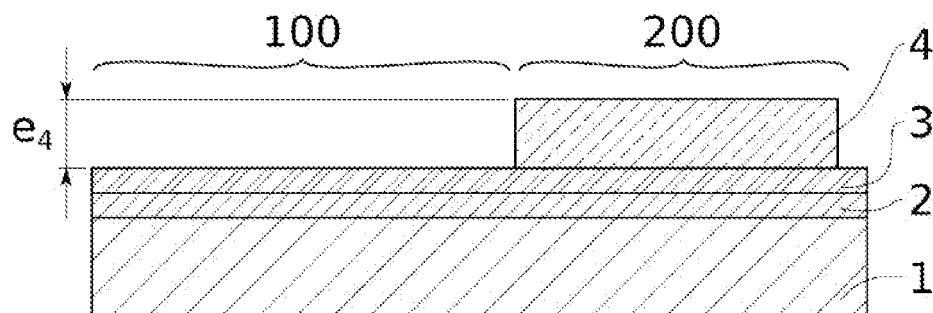


FIG. 5

[Fig. 6]

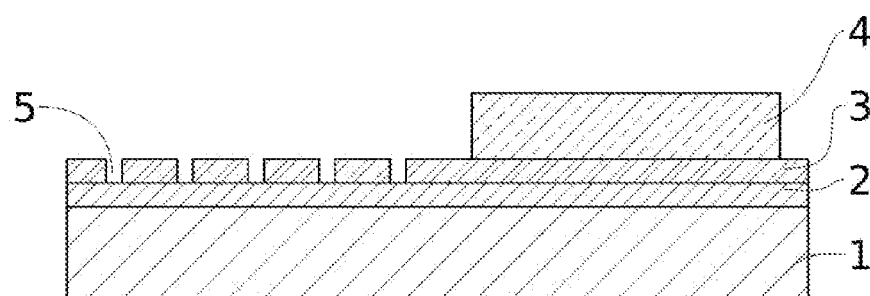


FIG. 6

[Fig. 7]

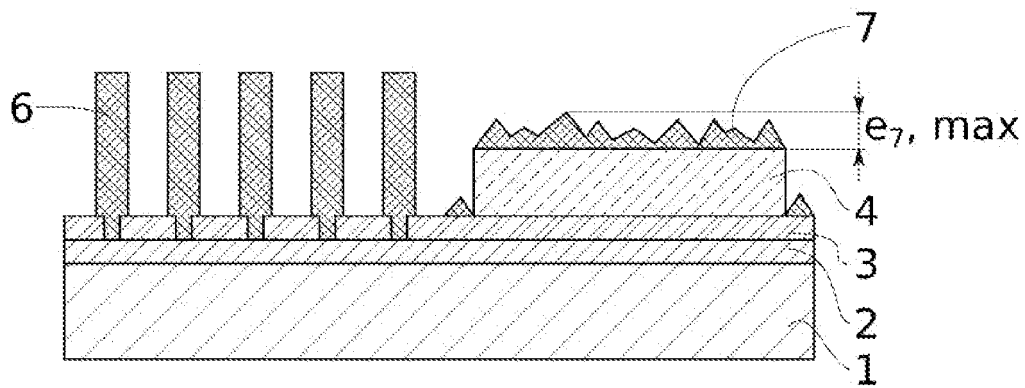


FIG. 7

[Fig. 8]

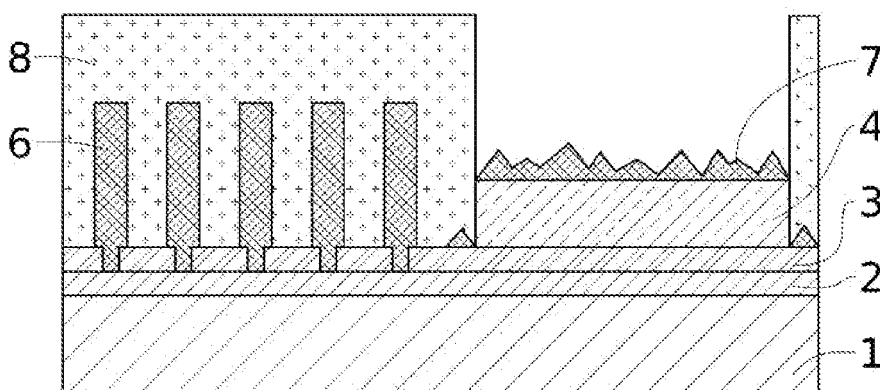


FIG. 8

[Fig. 9]

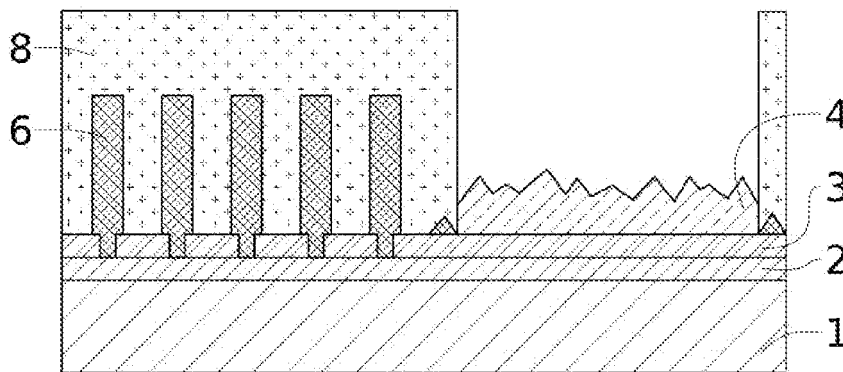


FIG. 9

[Fig. 10]

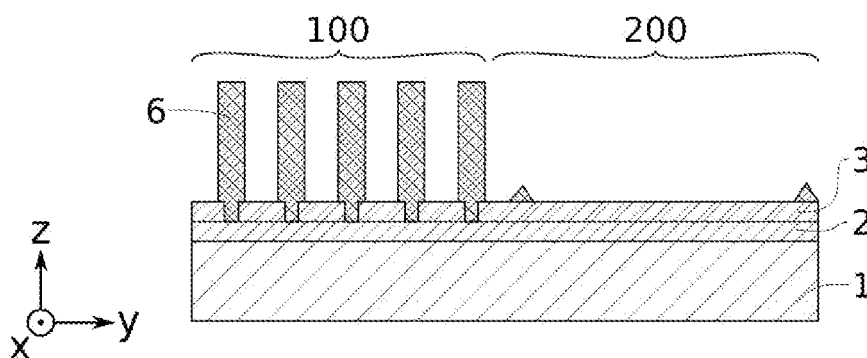


FIG. 10

[Fig. 11]

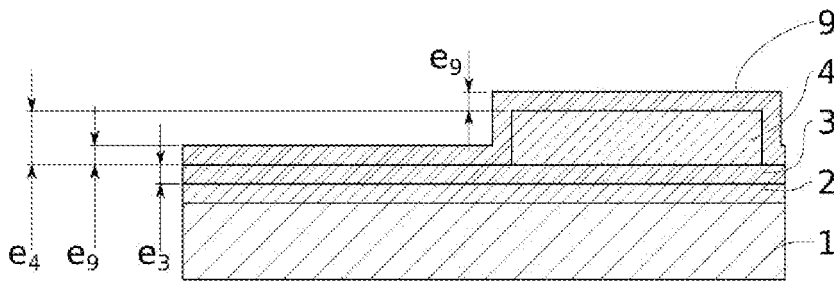


FIG. 11

[Fig. 12]

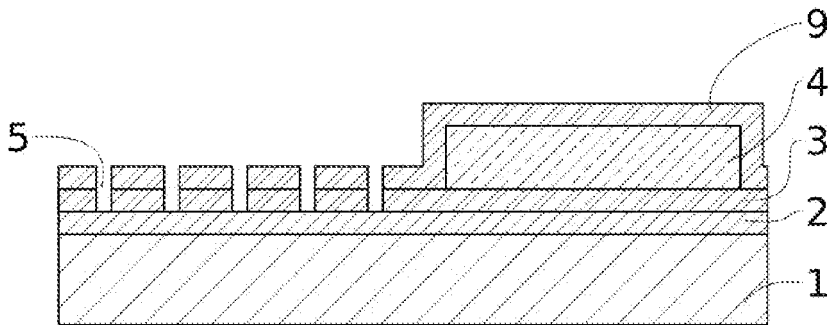


FIG. 12

[Fig. 13]

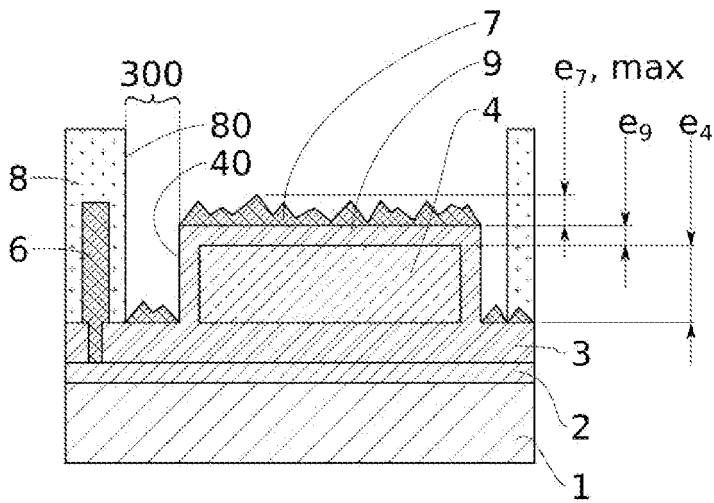


FIG. 13

[Fig. 14]

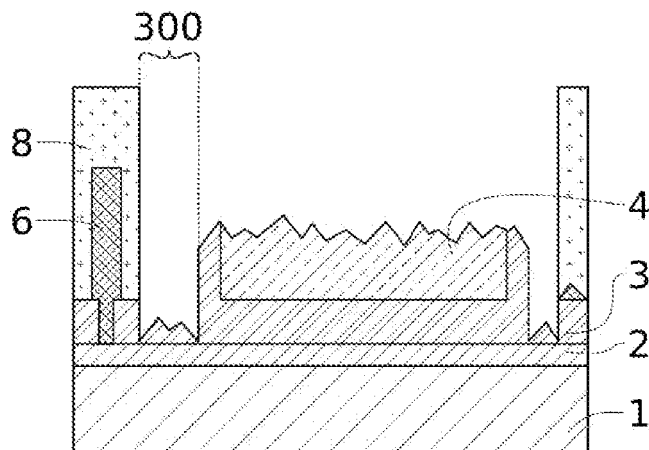


FIG. 14

[Fig. 15]

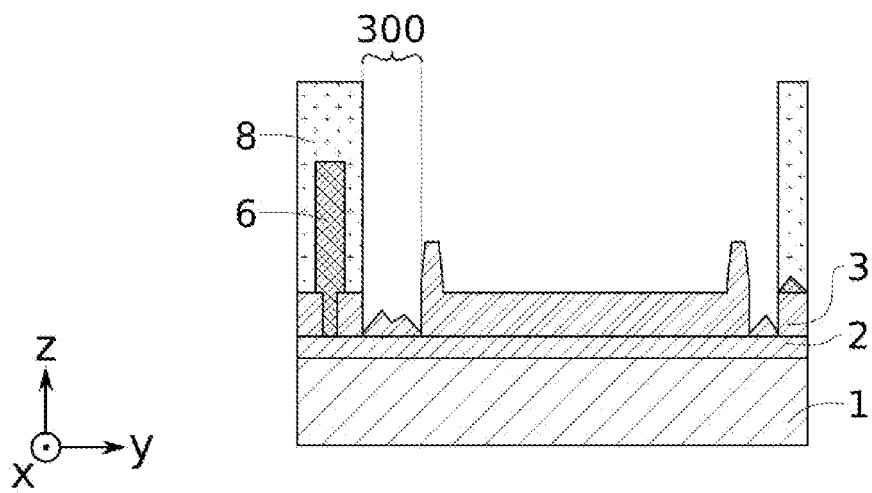


FIG. 15

# 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 2016/276433 A1 (HOLLAND MARTIN  
CHRISTOPHER [BE] ET AL)  
22 septembre 2016 (2016-09-22)

US 2019/153619 A1 (AMSTATT BENOIT [FR] ET  
AL) 23 mai 2019 (2019-05-23)

US 2013/328126 A1 (TSAI CHUN HSIUNG [TW]  
ET AL) 12 décembre 2013 (2013-12-12)

US 2017/221988 A1 (BAUMGARTL JOHANNES [AT]  
ET AL) 3 août 2017 (2017-08-03)

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

NEANT

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

NEANT