

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
COURBEVOIE

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

**3 105 591**

②1 N° d'enregistrement national : **19 15272**

⑤1 Int Cl<sup>8</sup> : **H 01 L 41/314 (2019.12), H 01 L 41/18**

⑫

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

**A1**

⑫② Date de dépôt : 20.12.19.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public de la demande : 25.06.21 Bulletin 21/25.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥③ 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) : CADOT Stéphane, MARTIN François et GASSILOU Rémy.

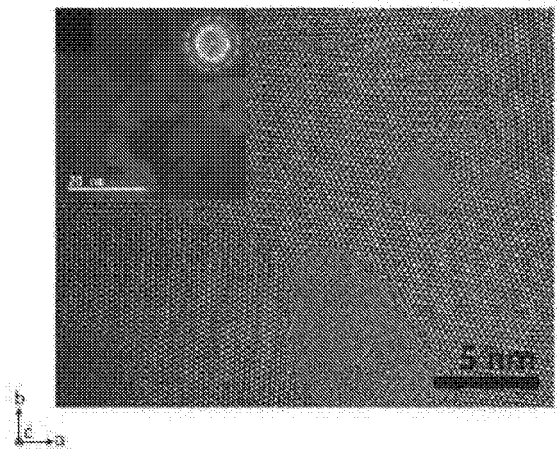
⑦③ Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement Public.

⑦④ Mandataire(s) : BREVALEX.

⑤④ PROCÉDE DE FABRICATION D'UNE COUCHE DE NITRURE D'ALUMINIUM TEXTURE.

⑤⑦ Procédé pour fabriquer une couche mince (30) d'AIN texturé comprenant les étapes successives suivantes :a) fourniture d'un substrat (10), ayant une surface amorphe,b) formation d'une couche de nucléation polycristalline (20) de MS2 avec M=Mo, W ou un de leurs alliages, sur la surface amorphe du substrat (10), la couche de nucléation (20) polycristalline étant constituée de domaines cristallins dont les plans de base (002) sont parallèles à la surface amorphe du substrat (10), les domaines cristallins étant orientés aléatoirement dans un plan (a, b) formé par la surface amorphe du substrat (10),c) dépôt de nitrure d'aluminium sur la couche de nucléation (20), conduisant à la formation d'une couche mince (30) d'AIN texturé.

Figure pour l'abrégé : 3



FR 3 105 591 - A1



## Description

### **Titre de l'invention : PROCÉDE DE FABRICATION D'UNE COUCHE DE NITRURE D'ALUMINIUM TEXTURE**

#### **Domaine technique**

- [0001] La présente invention se rapporte au domaine général des couches minces d'AlN texturé.
- [0002] L'invention concerne un procédé pour fabriquer une telle couche.
- [0003] L'invention concerne également un empilement susceptible d'être obtenu par le procédé.
- [0004] L'invention est particulièrement intéressante puisqu'elle permet de fabriquer une couche d'AlN hautement texturé sans avoir besoin d'utiliser un substrat monocristallin.
- [0005] L'invention trouve des applications dans de nombreux domaines industriels, et notamment dans le domaine de la microélectronique et de l'électronique.

#### **ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE**

- [0006] Les matériaux à base d'un nitrure de la colonne 13 du tableau périodique (notamment AlN, GaN, InN ainsi que leurs composés ternaires) présentent des propriétés particulièrement intéressantes (notamment de bonnes propriétés piézoélectriques). Depuis quelques années, ils font l'objet de nombreuses recherches et trouvent des applications dans divers domaines tels que l'électronique de puissance, les dispositifs radiofréquences (RF) ou encore les diodes électroluminescentes.
- [0007] Dans le domaine des dispositifs RF, c'est une couche mince piézoélectrique de nitrure d'aluminium (AlN) qui est utilisée pour convertir les ondes acoustiques en signal électrique. Afin d'obtenir des performances élevées, cette couche d'AlN doit être cristallisée sous sa forme wurtzite (maille hexagonale), orientée (002) et hautement texturée (c'est-à-dire constituée de cristaux rigoureusement orientés dans la même direction). Elle doit donc être déposée à haute température en utilisant des substrats d'épitaxie tel que le saphir monocristallin ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ou le carbure de silicium hexagonal (6H-SiC).
- [0008] Or, la mise en œuvre de tels procédés et/ou l'utilisation de tels substrats posent des problèmes de compatibilité avec les procédés et standards actuels de l'industrie du silicium.
- [0009] De plus, l'utilisation de substrats monocristallins conduit à des étapes d'intégration compliquées et coûteuses, pouvant nécessiter une étape de décollage (« lift off ») et de transfert de la couche mince d'AlN, ou encore une étape de gravure du substrat monocristallin puis l'intégration des électrodes par la face arrière.
- [0010] Une autre méthode consiste à déposer directement la couche mince d'AlN sur une

électrode pouvant induire une orientation préférentielle dans le plan 002 des cristaux d'AlN. De telles électrodes peuvent être, par exemple, en molybdène polycristallin orienté (110) ou en platine orienté (111).

- [0011] Cependant, la taille des cristaux et leur orientation doivent être maîtrisées de manière à être reproductibles, et la texture des couches minces obtenues sur ces électrodes polycristallines n'est pas aussi bonne que celle obtenue sur des substrats de saphir ou de SiC monocristallins. De plus, la texture de la couche mince d'AlN à proximité de l'électrode est dégradée, et il est nécessaire de former une couche d'AlN de forte épaisseur (typiquement supérieure à 500 nm) de manière à obtenir une texture satisfaisante pour des applications RF. Or, certaines applications, comme la 5G exigent des fréquences plus élevées, nécessitant une réduction de l'épaisseur des couches d'AlN.
- [0012] Récemment, l'attention s'est tournée vers des matériaux 2D, comme par exemple le graphène, le nitrure de bore hexagonal h-BN et les dichalcogénures de métaux de transition (TMD), en tant que couche de nucléation pour la croissance des nitrures. En particulier, des TMD tels que MoS<sub>2</sub> ou WS<sub>2</sub> sont des matériaux particulièrement prometteurs pour la croissance de GaN et d'AlN puisqu'ils présentent un paramètre de maille proche de ces matériaux (1 à 3%).
- [0013] Cependant, il est admis que, pour former du GaN ou du AlN hautement cristallin sur des dichalcogénures de métaux de transition, la couche de nucléation de MoS<sub>2</sub> ou WS<sub>2</sub> doit également être hautement cristalline.
- [0014] Par exemple dans l'article de Gupta et al. (« *Layered transition metal dichalcogenides: promising nearlattice-matched substrates for GaN growth* », Scientific Reports | 6:23708 | DOI: 10.1038/srep23708), la couche de nucléation est obtenue par exfoliation micromécanique à partir de monocristaux de WS<sub>2</sub> ou de MoS<sub>2</sub> suivi d'une étape de transfert de la couche exfoliée sur le substrat de croissance.
- [0015] Dans l'article de Hsu et al. (« *Monolayer MoS<sub>2</sub> Enabled Single-Crystalline Growth of AlN on Si(100) Using Low-Temperature Helicon Sputtering* », ACS Appl. Nano Mater. 2019, 2, 1964–1969), la croissance de la couche de MoS<sub>2</sub> est réalisée dans un premier temps sur du saphir, par CVD, puis cette couche est transférée sur un substrat de silicium, par l'intermédiaire de poly(méthacrylate de méthyle) (PMMA). Il est indiqué que, après report, le réseau hexagonal hautement orienté de la couche MoS<sub>2</sub> est préservé, ce qui est essentiel pour la croissance ultérieure du film de nitrure.
- [0016] Dans le document de Ohunchi (« *Fabrication of self-supporting AlN Film Substrates by Van Der Waals Lift-Off* », Final Report to Air Force office of Scientific Research 1998), la couche de WS<sub>2</sub> est fabriquée par épitaxie en phase vapeur à l'aide de précurseurs organométalliques (MOCVD) sur substrat monocristallin de silicium. Juste avant le dépôt de la couche de WS<sub>2</sub>, le substrat est gravé à l'acide fluorhydrique afin de retirer la couche d'oxyde natif et permettre la croissance épitaxiale du WS<sub>2</sub> sur le

silicium (cette stratégie limitant par ailleurs le budget thermique applicable au procédé en raison de la formation de siliciure de tungstène au-delà de 500°C).

[0017] Cependant, de tels procédés ne peuvent pas être directement utilisés dans un processus d'intégration de dispositifs sans devoir passer par des étapes coûteuses de transfert ou d'intégration d'électrodes par la face arrière du substrat, voire ne sont pas compatibles avec une production à grande échelle.

### **Exposé de l'invention**

[0018] Un des buts de la présente invention est de remédier aux inconvénients de l'art antérieur et, en particulier, de proposer un procédé de fabrication d'une couche mince d'AlN texturé, de bonne qualité, même pour de faibles épaisseurs, le procédé devant être simple à mettre en œuvre et peu coûteux.

[0019] Pour cela, la présente invention propose un procédé de fabrication d'une couche mince d'AlN texturé comprenant les étapes successives suivantes :

- a) fourniture d'un substrat ayant une surface amorphe,
- b) formation d'une couche de nucléation polycristalline de  $MS_2$  avec  $M=Mo, W$  ou un de leurs alliages, sur la surface amorphe du substrat, la couche de nucléation polycristalline étant constituée de domaines cristallins de  $MS_2$  dont les plans de base (002) sont parallèles à la surface amorphe du substrat, les domaines cristallins étant orientés aléatoirement dans un plan (a, b) formé par la surface amorphe du substrat,
- c) dépôt de nitrure d'aluminium sur la couche de nucléation de  $MS_2$ , conduisant à la formation d'une couche mince d'AlN texturé.

[0020] Par aléatoirement, on entend que les domaines cristallins ne sont pas orientés de la même manière dans le plan (a, b). Les domaines cristallins ne présentent pas d'orientation préférentielle.

[0021] La couche d'AlN ainsi obtenue présente une structure hexagonale de type wurtzite et croit en suivant l'orientation cristalline de la couche de nucléation pour former des cristaux d'AlN dont les plans 002 sont rigoureusement parallèles à ceux de la couche de nucléation.

[0022] Par texturé (ou orienté cristallographiquement), on entend que la couche mince d'AlN est formée d'une multitude de cristaux, tous orientés dans la même direction, au moins à l'échelle de la zone active pour le dispositif visé, et possiblement sur toute la surface du substrat.

[0023] La texturation est typiquement évaluée par diffraction des rayons X à l'aide d'une mesure de courbe d'oscillation (« rocking curve ») obtenue en faisant varier la position angulaire  $\omega$  autour de la position de Bragg du plan 002 de l'AlN. La largeur à mi-hauteur (FWHM) du pic obtenu permet de quantifier la texturation de la couche d'AlN.

[0024] Plus la valeur de cette largeur à mi-hauteur est faible, plus la distribution de

l'orientation des grains est étroite et plus la qualité cristalline est améliorée : le film est dit texturé.

- [0025] Par hautement texturé, on entend que la largeur à mi-hauteur de la courbe d'oscillation (« rocking curve ») du plan 002 de l'AlN est inférieure à  $2^\circ$ , de préférence inférieure à  $1^\circ$  et encore plus préférentiellement inférieure à  $0,5^\circ$  pour des couches dont l'épaisseur est supérieure à 50 nm.
- [0026] L'invention se distingue fondamentalement de l'art antérieur par la croissance de la couche de nitrure d'aluminium sur une couche de  $MS_2$  nanocristalline dont les domaines cristallins sont orientés aléatoirement dans le plan (a, b) formé par la surface du substrat.
- [0027] Contre toute attente, la présence de cette couche de nucléation nanocristalline et orientée aléatoirement dans le plan (a, b) formé par la surface du substrat permet la croissance d'une couche d'AlN mieux texturée que celle obtenue sur électrode de molybdène 110, et aussi bien texturée que celle obtenue sur des cristaux de  $MoS_2$  de taille micrométrique idéalement formés sur saphir monocristallin et tous orientés dans la même direction.
- [0028] De manière contre-intuitive, il semble donc que la taille des domaines cristallins constituant la couche de  $MS_2$  ne joue pas un rôle essentiel dans la texture du film d'AlN, et par conséquent que la nucléation de l'AlN n'ait pas lieu au niveau des joints de grains de la couche de  $MS_2$ , le caractère aléatoire de la configuration des joints de grains ne permettant pas a priori d'induire une orientation préférentielle des cristaux d'AlN nécessaire à l'obtention d'un film d'AlN texturé.
- [0029] De plus, une telle couche de  $MS_2$  peut être directement formée sur un substrat amorphe et servir à la fois de couche de nucléation pour l'AlN et de barrière à la gravure, offrant ainsi d'avantage de possibilités dans la stratégie d'intégration.
- [0030] Avantagement, l'alliage M de la couche de nucléation de  $MS_2$  contient jusqu'à 50% atomique d'un ou plusieurs éléments additionnels choisis parmi les métaux de transition. Le ou les éléments additionnels sont ajoutés en quantité suffisamment faible pour ne pas impacter de manière critique le paramètre de maille de la couche de nucléation  $MS_2$ . Par de manière critique, on entend, ici et par la suite, que le paramètre du réseau cristallin ne variera pas de plus de 0,05 nm selon les axes a et b de manière à ne pas altérer le paramètre de maille de la couche.
- [0031] Avantagement, la couche de nucléation de  $MS_2$  a une épaisseur allant de 0,6 nm à 50 nm, et de préférence de 0,6 nm à 8 nm.
- [0032] Selon une première variante de réalisation avantageuse, l'étape b) est réalisée à une température autorisant la formation d'une couche de nucléation polycristalline de  $MS_2$  en une seule étape.
- [0033] Selon une deuxième variante de réalisation avantageuse, l'étape b) est réalisée selon

les étapes suivantes :

- dépôt d'une couche de  $MS_x$  avec  $x$  supérieur ou égal à 2,
- recuit de la couche de  $MS_x$  sous atmosphère inerte à une température allant de  $450^\circ\text{C}$  à  $1200^\circ\text{C}$  et de préférence de  $750^\circ\text{C}$  à  $950^\circ\text{C}$ , de manière à former une couche polycristalline de  $MS_2$ .

- [0034] Selon une troisième variante de réalisation avantageuse, l'étape b), pour former une couche de  $MS_2$ , est réalisée selon les étapes successives suivantes :
- dépôt d'une couche mince contenant le métal ou l'alliage M sous forme élémentaire (pur), ou associé à un ou plusieurs hétéroatomes (par exemple sous la forme d'un oxyde, d'un nitrure, d'un séléniure ou d'un oxysulfure),
  - recuit thermique réactif en présence d'un composé volatil contenant du soufre à une température allant de  $150^\circ\text{C}$  à  $1200^\circ\text{C}$  et, de préférence, de  $350^\circ\text{C}$  à  $750^\circ\text{C}$ ,
  - éventuellement, recuit sous atmosphère inerte à une température allant de  $450^\circ\text{C}$  à  $1200^\circ\text{C}$  et, de préférence, de  $750^\circ\text{C}$  à  $950^\circ\text{C}$ , de manière à former une couche de nucléation polycristalline de  $MS_2$ .
- [0035] Selon ces trois variantes de réalisation avantageuses, les couches minces de  $MS_2$ , de  $MS_x$  ou celle contenant le métal ou l'alliage M peuvent être déposées, de préférence, par dépôt chimique en phase vapeur (« Chemical Vapor Deposition » ou CVD), par dépôt chimique en phase vapeur par couches atomiques (« Atomic Layer Deposition » ou ALD), par dépôt physique en phase vapeur (PVD pour « Physical Vapor Deposition ») ou par pulvérisation cathodique (« RF sputtering »).
- [0036] Avantageusement, la couche de nucléation polycristalline de  $MS_2$  contient un élément dopant tel que l'azote, le phosphore, l'arsenic ou l'antimoine. L'élément dopant est ajouté dans des proportions n'induisant pas une altération des paramètres de maille du composé  $MS_2$  supérieure à  $\pm 0,05$  nm selon les axes a et b.
- [0037] Avantageusement, l'étape c) de dépôt de la couche mince d'AIN texturé est réalisée par dépôt physique en phase vapeur ou pulvérisation cathodique.
- [0038] Avantageusement, la couche mince d'AIN texturé a une épaisseur allant de 1 nm à 1  $\mu\text{m}$ .
- [0039] Avantageusement, la couche mince d'AIN texturé contient des éléments dopants tels que le chrome, le molybdène, le tungstène, le scandium, l'yttrium ou un élément des lanthanides. Les éléments dopants sont introduits dans des proportions n'induisant pas une altération des paramètres de maille de l'AIN supérieure à  $\pm 0,05$  nm selon les axes a et b.
- [0040] Avantageusement, la surface amorphe du substrat est faiblement rugueuse. Par faiblement, il est entendu une rugosité inférieure à 5nm, de préférence inférieure à 1 nm, et encore plus préférentiellement inférieure à 0,3 nm.
- [0041] Selon un mode de réalisation particulier, les étapes b) et c) peuvent être répétées cy-

cliquement de manière à obtenir un empilement comprenant une alternance de couches de nucléation de  $MS_2$  et de couches minces d'AIN texturé.

- [0042] Selon une première variante de réalisation, le procédé comporte une étape additionnelle, ultérieure à l'étape c), au cours de laquelle on retire un empilement comprenant la couche de nucléation polycristalline  $MS_2$  et la couche mince d'AIN texturé du substrat. Cette étape peut être réalisée, par exemple, en séparant l'empilement du substrat par décollement mécanique (« lift off ») à l'aide d'une couche de transfert.
- [0043] Selon une autre variante de réalisation, le procédé comporte une étape additionnelle, ultérieure à l'étape c), au cours de laquelle on sépare la couche mince d'AIN texturé du substrat et de la couche de nucléation  $MS_2$ .
- [0044] Ces deux variantes de réalisation peuvent être réalisées par clivage soit à l'interface substrat/couche de nucléation soit à l'interface couche de nucléation/couche mince d'AIN texturé si la couche de nucléation adhère bien au substrat.
- [0045] Le procédé présente de nombreux avantages :
- être simple à mettre en œuvre,
  - ne pas nécessiter l'utilisation de substrats monocristallins,
  - permettre la formation d'AIN à structure colonnaire hautement texturé sur substrat amorphe, n'importe quel type de substrat pouvant aisément être rendu amorphe en surface ou recouvert d'une couche mince d'un matériau amorphe,
  - permettre une texturation de l'AIN dès les premiers nanomètres déposés et donc l'obtention de couches d'AIN hautement texturé ayant de faibles épaisseurs (typiquement ayant une épaisseur inférieure à 100 nm, voire inférieure à 50 nm),
  - pouvoir fonctionner avec des couches de nucléation de  $MS_2$  extrêmement minces qui n'auront que très peu d'incidence sur le fonctionnement du dispositif final,
  - être basé sur l'utilisation d'une couche de nucléation stable à l'air et à l'humidité pendant plusieurs mois, et ne nécessitant aucun traitement de surface avant la croissance de la couche d'AIN. Il n'est donc pas nécessaire d'enchaîner sous vide le dépôt de la couche de nucléation et celui de la couche d'AIN.
- [0046] L'invention concerne également un empilement susceptible d'être obtenu par le procédé tel que défini précédemment comprenant, et de préférence constitué successivement par :
- une couche mince d'AIN texturé,
  - une couche de nucléation polycristalline de  $MS_2$  avec  $M=Mo, W$  ou un de leurs alliages, la couche de nucléation polycristalline étant constituée de domaines cristallins dont les plans de base (002) sont parallèles à l'empilement, l'orientation des domaines cristallins dans un plan (a, b) formé par l'empilement étant aléatoire,
  - éventuellement, un substrat possédant une surface amorphe, la couche de nucléation

polycristalline de  $MS_2$  étant disposée entre le substrat et la couche mince d'AlN texturé.

[0047] La couche mince d'AlN texturé est en contact direct avec la couche de nucléation de  $MS_2$ . Autrement dit, il n'y a pas de couche intermédiaire entre les deux couches.

[0048] Les caractéristiques liées au procédé se retrouvent également dans l'empilement formé à l'issue du procédé.

[0049] L'invention concerne également un dispositif microélectronique, par exemple un dispositif radiofréquence (RF), une LED, un dispositif de puissance ou une membrane piézoélectrique, par exemple une membrane acoustique piézoélectrique, comprenant un empilement tel que défini précédemment.

[0050] L'invention concerne également un dispositif microélectronique, par exemple un dispositif radiofréquence (RF), une LED, un dispositif de puissance ou une membrane piézoélectrique comprenant une couche mince d'AlN texturé.

[0051] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront du complément de description qui suit.

[0052] Il va de soi que ce complément de description n'est donné qu'à titre d'illustration de l'objet de l'invention et ne doit en aucun cas être interprété comme une limitation de cet objet.

### **Brève description des dessins**

[0053] La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description d'exemples de réalisation donnés à titre purement indicatif et nullement limitatif en faisant référence aux dessins annexés sur lesquels :

[0054] [fig.1A]

[0055] [fig.1B]

[0056] [fig.1C] représentent, de manière schématique, différentes étapes de différents procédés de fabrication d'une couche mince d'AlN texturé selon différents modes de réalisation particuliers de l'invention.

[0057] [fig.2] représente, de manière schématique, et en coupe transversale, un empilement formé d'une couche de nucléation polycristalline de  $MS_2$  et d'une couche mince d'AlN texturé, selon un mode de réalisation particulier de l'invention.

[0058] [fig.3] est une vue dans le plan obtenue par microscopie électronique en transmission (TEM) d'une couche mince de  $MoS_2$  de 0,6 nm d'épaisseur (une monocouche), obtenue selon un mode de réalisation particulier du procédé selon l'invention, et transférée sur une grille TEM. L'insert est un cliché obtenu par diffraction des électrons avec une cartographie de l'orientation des domaines cristallins,

[0059] [fig.4A]

[0060] [fig.4B] sont des clichés obtenus par microscopie électronique en transmission sur

une coupe transversale d'un empilement comprenant un substrat amorphe de SiO<sub>2</sub>, une couche de nucléation polycristalline de MoS<sub>2</sub> de 2 nm d'épaisseur et une couche d'AlN de 100 nm, à différents facteurs de grossissement.

- [0061] [fig.4C] représente de manière schématique, l'empilement, obtenu selon un mode de réalisation particulier de l'invention, observé sur les figures 4A et 4B.
- [0062] [fig.5] est un graphique représentant les courbes d'oscillation (« rocking curves ») du plan 002 de l'AlN, pour une couche mince d'AlN de 100 nm d'épaisseur déposée sur une couche de nucléation de MoS<sub>2</sub> de 2 nm d'épaisseur selon un mode de réalisation particulier du procédé de l'invention (noté S1a), et pour une couche mince d'AlN de 100 nm d'épaisseur déposée sur un échantillon de référence comprenant une électrode texturée en molybdène orienté 110 (noté Ref1).
- [0063] [fig.6] est un graphique représentant l'évolution de la largeur à mi-hauteur (FWHM) de la courbe d'oscillation (« rocking curve ») du plan 002 de l'AlN mesuré par diffraction des rayons X pour des échantillons d'AlN de différentes épaisseurs (5 nm à 100 nm) obtenus sur une couche de nucléation de MoS<sub>2</sub> selon un mode de réalisation particulier du procédé de l'invention.
- [0064] Afin de permettre une meilleure lisibilité, les différentes parties représentées sur les figures ne le sont pas nécessairement à la même échelle.
- [0065] **EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS**
- [0066] On se réfère tout d'abord aux figures 1A, 1B, et 1C.
- [0067] Le procédé de fabrication d'une couche d'AlN texturé comporte au moins les étapes successives suivantes :
- a) fourniture d'un substrat 10 ayant une surface amorphe,
  - b) formation d'une couche de nucléation 20 polycristalline de MS<sub>2</sub> avec M=Mo, W ou un de leurs alliages, sur la surface amorphe du substrat 10, la couche de nucléation polycristalline 20 comprenant des domaines cristallins dont les plans de base (002) sont parallèles à la surface du substrat 10, les domaines cristallins étant orientés aléatoirement dans le plan (a, b) formé par la surface amorphe du substrat 10,
  - c) dépôt d'AlN sur la couche de nucléation 20, permettant l'obtention d'une couche d'AlN texturée 30.
- [0068] De préférence, le substrat 10 répond à un ou plusieurs des critères suivants, pris seuls ou en combinaison :
- être amorphe, au moins en surface,
  - être thermiquement stable jusqu'à la température la plus élevée du procédé, sans altération de sa rugosité de surface,
  - être plan,
  - être faiblement rugueux, avec une rugosité moyenne (Rq) avantageusement inférieure à 5nm, de préférence inférieure à 1 nm, et encore plus préférentiellement in-

férieure à 0,3 nm,

- avoir des propriétés barrière vis-à-vis de la diffusion des éléments constituant la couche de nucléation 20 jusqu'à la température la plus élevée utilisée lors des différentes étapes du procédé.

- [0069] Selon une première variante de réalisation, le substrat 10 est un matériau amorphe (figures 1A et 1B).
- [0070] Selon une deuxième variante de réalisation, le substrat 10 comporte un support 11 pouvant être un matériau polycristallin recouvert par une couche mince amorphe 12 (figure 1C).
- [0071] C'est par exemple le cas lorsque le support 11 est un matériau cristallin s'oxydant spontanément sous air, et à la surface duquel une couche d'oxyde se forme naturellement.
- [0072] Par exemple, pour un support 11 d'AlN, il se forme spontanément sous air, une couche superficielle d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  amorphe. Dans le cas du silicium, il se forme spontanément une couche de  $\text{SiO}_2$  amorphe.
- [0073] À titre illustratif, on pourra choisir comme substrat 10 une plaque ou plaquette (« wafer ») de silicium comportant une couche mince superficielle 12 de  $\text{SiO}_2$ .
- [0074] Alternativement, il est possible de déposer une couche mince amorphe 12 sur le support 11, de préférence, une couche d'oxyde ou de nitrure restant amorphe à haute température, tel que  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{SiN}_x$ . Ce mode de réalisation est avantageux, dans le cas où le support 11 ne s'oxyde pas spontanément sous atmosphère oxydante (comme l'air) et/ou dans le cas où le support 11 ne présente pas de propriétés barrières satisfaisantes vis-à-vis de la diffusion des éléments constituant la couche de nucléation 20. Une telle couche amorphe peut par exemple être déposée par PVD ou par CVD ou ALD assisté ou non par plasma, ou encore formée par recuit thermique réactif du substrat (i.e. sous atmosphère oxydante ou nitrurante).
- [0075] Alternativement, la surface du support polycristallin 11 peut être rendue amorphe par un traitement plasma.
- [0076] Si le substrat 10 n'est pas thermiquement stable jusqu'à la température la plus élevée du procédé (par exemple, si le substrat risque de cristalliser à haute température ou qu'il est déjà polycristallin mais présente un risque de modification de la densité et/ou de la morphologie d'au moins une partie des domaines cristallins dont il est constitué au cours du procédé), une étape de recuit thermique peut être appliquée afin de stabiliser le substrat 10. De préférence, la température choisie sera idéalement supérieure à la température la plus élevée utilisée lors des étapes suivantes du procédé.
- [0077] Si la surface du substrat 10 a une rugosité trop élevée, cette dernière pourra être diminuée par un polissage, par exemple mécano-chimique (CMP).
- [0078] Le substrat 10 peut être gravé localement.

- [0079] Lors de l'étape b), on forme une couche mince de nucléation 20. La couche de nucléation 20 peut être également appelée couche d'ensemencement, couche de germination ou encore couche de texturation.
- [0080] La couche de nucléation 20 est à base d'un ou plusieurs dichalcogénures de métaux de transition (aussi connus sous l'acronyme TMD ou TMDC pour « transition metal dichalcogenide ») ou à base d'un de leurs alliages.
- [0081] De préférence, la couche de nucléation 20 a pour formule générale :
- [0082]  $MS_x$
- [0083] avec M le tungstène, le molybdène, ou un de leurs alliages,
- [0084] x allant de 1,4 à 2,2 et, de préférence, de 1,8 à 2,1 et, encore plus préférentiellement, x étant égal à 2.
- [0085] Il est à noter que ces variations de x ne remettent pas en cause la nature cristallo-graphique de la couche de nucléation  $MS_2$ , et peuvent être simplement liées à des défauts structuraux localisés, à la composition des bordures de domaines cristallins ou des joints de grains, ou encore à la manière dont la couche de nucléation est liée avec la surface du substrat.
- [0086] Encore plus préférentiellement, la couche de nucléation 20 est en  $MoS_x$  ou en  $WS_x$ .
- [0087] L'alliage peut comprendre, par exemple, jusqu'à 50% atomique d'un ou plusieurs éléments additionnels. On choisira le ou les éléments additionnels de sorte que le paramètre de maille ne soit pas altéré de manière critique selon les axes a et b. Ces éléments additionnels peuvent inclure, de manière non limitative, des métaux de transition (tels que ceux des colonnes 4, 5 et 6 du tableau périodique), comme par exemple le vanadium, le niobium, le tantale, le titane ou le chrome. Par exemple, M peut être un alliage de molybdène et de tungstène pouvant contenir l'inclusion de métaux comme le vanadium ou le niobium.
- [0088] Des impuretés peuvent également être présentes dans la couche de nucléation 20. Les impuretés peuvent provenir, par exemple, de la diffusion de métaux ou d'hétéroatomes du substrat 10. Les impuretés sont, en particulier, présentes en profondeur dans la couche de nucléation, notamment à l'interface du substrat 10 et de la couche de nucléation 20. Par exemple, une couche de  $MoS_2$  de 2 nm formée sur du  $SiN_x$  amorphe peut être nitrurée à l'interface  $SiN_x/MoS_2$ . La surface de la couche de nucléation 20 sur laquelle va croître la couche d'AlN 30 est préservée.
- [0089] Des dopants tels que l'azote, le phosphore, l'arsenic ou l'antimoine peuvent être introduits par implantation ou recuit réactif de la couche de nucléation 20. De la même manière que pour les éléments additionnels pouvant être associés au métal M, la quantité de ces éléments dopants ne devra pas altérer de manière critique le paramètre de maille de la couche de nucléation 20 de  $MS_2$  selon les axes a et b.
- [0090] La couche de nucléation 20 est formée de domaines cristallins dont les plans de base

(002) sont parallèles à la surface du substrat 10, i.e. au plan (a, b). Les domaines cristallins ont une orientation aléatoire dans le plan (a, b) formé par la surface du substrat (figure 3).

[0091] L'épaisseur de la couche de nucléation 20 va de 0,6 nm (soit l'équivalent d'une monocouche, i.e. un feuillet unique de  $MS_2$ ) à 50 nm, et de préférence de 0,6 à 12 nm, et encore plus préférentiellement de 0,6 nm à 8 nm.

[0092] Au-delà de quelques dizaines de nanomètres, par exemple au-delà de 20nm ou de 50nm, voire au-delà de 80nm pour certains substrats, les plans de base (002) des cristaux formant la couche de nucléation 20 de  $MS_2$  ont tendance à ne plus être strictement parallèles à la surface du substrat et ne conviennent donc pas à la croissance d'une couche 30 d'AlN hautement texturé. La désorientation augmente avec l'épaisseur et dépend du substrat. D'une manière générale, plus la couche de nucléation 20 de  $MS_2$  est fine, meilleure sera la texturation de la couche 30 d'AlN. On choisira l'épaisseur de la couche 20 de  $MS_2$  en fonction de la nature du substrat 10 et de l'application visée.

[0093] La couche de nucléation peut être déposée par dépôt chimique en phase vapeur (CVD pour « Chemical Vapor Deposition »), par dépôt chimique en phase vapeur par couches atomiques (ALD pour « Atomic Layer Deposition »), par dépôt physique en phase vapeur (PVD pour « Physical Vapor Deposition ») ou par pulvérisation cathodique (« RF sputtering »).

[0094] La croissance de la couche de nucléation 20 peut être directe ou indirecte.

[0095] Selon une première variante de réalisation, la croissance de la couche de nucléation 20 est directe, c'est-à-dire qu'une seule étape suffit pour obtenir une couche de  $MS_x$  avec x égal à 2 (figure 1A).

[0096] Par exemple, une telle croissance peut être réalisée en mettant en œuvre ces méthodes de dépôt à des températures suffisamment élevées pour permettre la cristallisation du composé  $MS_2$  permettant la formation de la couche de nucléation 20 (typiquement supérieure à 500 °C).

[0097] Selon une deuxième variante de réalisation, représentée sur les figures 1B et 1C, la croissance de la couche de nucléation 20 est indirecte, c'est-à-dire que l'étape de croissance est réalisée en plusieurs étapes (au moins deux).

[0098] Typiquement, ces différentes étapes consistent successivement à :

- déposer une couche mince 21 contenant au moins le métal ou les métaux de transition de la couche de nucléation 20 finale,
- réaliser un ou plusieurs post-traitements conduisant à la formation d'une couche de nucléation 20 de formule  $MS_2$  possédant des propriétés cristallines satisfaisantes.

[0099] Selon une première alternative de croissance indirecte, la couche mince 21 déposée contient à la fois le métal ou les métaux de transition et le soufre, avec un rapport

atomique soufre/métal (noté S/M) supérieur ou égal à 2 (i.e.  $x$  est supérieur ou égal à 2). Une telle couche est, par exemple, obtenue lorsque la température lors du dépôt n'est pas suffisamment élevée pour permettre la cristallisation du composé  $MS_2$  permettant la formation de la couche de nucléation 20 (typiquement inférieure à  $450^\circ\text{C}$ ), et en présence de composés riches en soufre (par exemple le soufre élémentaire, les polysulfures, ou le 1,2-éthanedithiol).

- [0100] Le post-traitement consiste à réaliser un recuit thermique dans des conditions inertes (sous ultravide ou gaz inerte par exemple) pour simultanément provoquer la cristallisation du composé  $MS_2$ , et évaporer le soufre en excès.
- [0101] Les températures de recuit vont, avantageusement, de  $450^\circ\text{C}$  à  $1200^\circ\text{C}$ , préférentiellement de  $750^\circ\text{C}$  à  $1000^\circ\text{C}$ , et encore plus préférentiellement de  $750^\circ\text{C}$  à  $950^\circ\text{C}$ . La durée d'un recuit à une température supérieure à  $950^\circ\text{C}$  sera suffisamment courte pour ne pas endommager la couche de nucléation 20. La durée du recuit sera choisie en fonction, non seulement, de la température mais aussi de la nature du recuit (recuit thermique standard, traitement thermique rapide (RTP) ou recuit sous faisceau laser).
- [0102] Selon une deuxième alternative de croissance indirecte, la couche mince 21 déposée :
- ne contient pas de soufre (par exemple la couche mince déposée 21 est un oxyde, un nitrure, un séléniure ou un oxysulfure du métal ou des métaux M), ou
  - contient une quantité insuffisante de soufre : le rapport atomique S/M étant strictement inférieur à 2.
- [0103] Selon cette deuxième alternative de croissance indirecte, le post-traitement est un recuit thermique réalisé en présence d'un élément contenant du soufre pour pouvoir former une couche de nucléation 20 présentant des propriétés cristallines satisfaisantes. Par exemple, cette étape est réalisée sous un flux d'hydrogène sulfuré ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ou d'un composé organosoufré, avantageusement dilués dans un gaz inerte, ou en présence de soufre élémentaire.
- [0104] Selon un mode de réalisation particulier, de l'hydrogène peut être ajouté afin de limiter la formation de carbone (issu de la décomposition thermique des composés organosoufrés) ou de soufre élémentaire (issu de la polymérisation de l'hydrogène sulfuré).
- [0105] Le composé organosoufré peut être choisi parmi les thiols, les polysulfures ou les dérivés de type silathianes (tels que l'hexaméthylsilathiane).
- [0106] On choisira, selon une première variante avantageuse, des composés organosoufrés ayant des chaînes aliphatiques courtes (typiquement possédant de 1 à 4 atomes de carbone).
- [0107] Selon un mode de réalisation particulier, le composé soufré peut être dépourvu de carbone. On choisira, avantageusement, un composé volatil comme  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{S}_2$  ou  $\text{S}_2\text{Cl}_2$ . L'utilisation de ce type de composés soufrés permet notamment d'éviter la conta-

mination de la couche de nucléation par du carbone.

- [0108] Les températures lors de la sulfuration vont, par exemple, de 150°C à 1200°C, préférentiellement de 350°C à 750°C. Cette étape de sulfuration peut être suivie d'une étape de recuit thermique sous atmosphère inerte. Les conditions du recuit thermique sont, par exemple, celles décrites pour la première alternative de la croissance indirecte.
- [0109] Une légère variation de la stœchiométrie de la couche de nucléation 20 ou de la couche 21 après sulfuration (i.e.  $MS_x$  avec  $x < 2$ ) peut être liée aux états d'interface avec le substrat ou à la présence de défauts structuraux, comme évoqué précédemment, mais également à la formation d'une couche superficielle d'oxyde, par exemple lors de son exposition à l'air ambiant si elle n'a pas été déposée, sulfurée, ou recuite à une température suffisamment élevée pour être stable à l'air (i.e.  $T^\circ < 650^\circ\text{C}$ ). Dans le cas où cette couche  $MS_x$  ne contient pas d'autres métaux que le molybdène et le tungstène, ce problème d'oxydation superficielle peut être éliminé par un simple recuit thermique sous atmosphère inerte à une température supérieure à 650°C, ce qui permet l'élimination des oxydes de molybdène et/ou de tungstène par évaporation et l'obtention d'une couche mince de nucléation 20 de  $MS_2$  dépourvue d'oxygène et possédant des propriétés cristallines satisfaisantes.
- [0110] Selon un mode de réalisation particulier, non représenté, une couche mince d'encapsulation peut être déposée sur la couche mince 20 ou 21, pour préserver son intégrité lorsque le recuit thermique final est réalisé à des températures particulièrement élevées (supérieures à 950°C). Avant le dépôt de cette couche d'encapsulation il est nécessaire de s'assurer que le ratio S/M au sein de la couche mince 20 ou 21 est le plus proche possible de 2 par l'application d'une séquence de sulfuration et/ou de recuit adaptée, une quantité de soufre trop élevée pouvant conduire à la délamination de la couche d'encapsulation, et une quantité trop faible à la formation d'une couche  $MS_x$  ne présentant pas la structure attendue.
- [0111] La couche d'encapsulation est constituée d'un matériau chimiquement inerte vis-à-vis de la couche de nucléation 20 à la température utilisée pour le recuit. À titre illustratif et non limitatif, la couche d'encapsulation peut être un oxyde de métal ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $HfO_2$ ,  $VO_2$ ,  $Ta_2O_5$ ) ou un nitrure de métal ( $AlN$ ,  $SiN_x$ ,  $TiN_x$ ,  $ZrN_x$ ,  $HfN_x$ ,  $VN_x$ ,  $TaN_x$ ).
- [0112] Cette couche d'encapsulation est ensuite éliminée sélectivement avant le dépôt de la couche d' $AlN$ , par exemple par un procédé de gravure humide non oxydant. La solution de gravure comprend, par exemple, de l'acide fluorhydrique, de la soude, de la potasse ou de l'ammoniaque.
- [0113] Lors de l'étape c), on forme la couche 30 de nitrure d'aluminium texturé.
- [0114] La couche 30 d' $AlN$  présente une structure hexagonale de type wurtzite et possède une structure colonnaire composée de cristaux rigoureusement orientés dans la même

direction selon l'axe c orthogonal au plan (a, b) formé par la surface du substrat. Les plans cristallins 002 des cristaux d'AlN constituant la couche 30 sont rigoureusement parallèles au plan (a, b), ainsi qu'aux plans 002 des domaines cristallins constituant la couche de nucléation 20 de MS<sub>2</sub>.

- [0115] Le degré de texturation peut être estimée, par exemple, par diffraction des rayons X à l'aide d'une mesure de courbe d'oscillation (« rocking curve ») obtenue en faisant varier la position angulaire omega autour de la position de Bragg du plan 002 de l'AlN. La largeur à mi-hauteur (FWHM) du pic obtenu permet de quantifier la texturation (autrement dit le degré de désorientation des cristaux) de la couche d'AlN.
- [0116] Par hautement texturé (c'est-à-dire présentant une faible désorientation des cristaux), on entend que la largeur à mi-hauteur de la courbe d'oscillation (« rocking curve ») du plan 002 de l'AlN est inférieure à 2°, de préférence inférieure à 1° et encore plus préférentiellement inférieure à 0,5° pour des couches d'AlN dont l'épaisseur est supérieure à 50 nm.
- [0117] Le dépôt de la couche texturée 30 d'AlN sur la couche de nucléation 20 de MS<sub>2</sub> peut être mis en œuvre en utilisant diverses techniques comme la PVD, la pulvérisation cathodique, le dépôt par laser pulsé (PLD), la CVD ou l'ALD. Les paramètres de dépôt et la température seront choisis de manière à former une couche 30 d'AlN cristallin sous sa forme hexagonale (wurtzite).
- [0118] De préférence, la couche 30 d'AlN est déposée par PVD. Ce mode de réalisation est particulièrement avantageux pour des applications RF, car cette technique de dépôt permet de former des couches épaisses (généralement d'épaisseur supérieure à 100 nm) en peu de temps.
- [0119] De préférence, l'épaisseur de la couche 30 d'AlN va de 1 nm à quelques microns et encore plus préférentiellement de 1 nm à 1 µm. Selon les applications visées, on pourra choisir une faible épaisseur, par exemple, de 1 nm à 100 nm ou une forte épaisseur, par exemple de 100 nm à 1 µm.
- [0120] Le stress intrinsèque dans la couche 30 d'AlN joue un rôle critique dans sa tenue mécanique. Des valeurs de contrainte élevées peuvent, non seulement, provoquer la délamination de la couche 30 d'AlN en raison de l'absence de liaisons covalentes entre chaque feuillet constituant la couche de nucléation 20 en MS<sub>2</sub>, ainsi qu'aux interfaces entre la couche de nucléation 20 et les matériaux situés de part et d'autre de cette couche (i.e. les interfaces substrat/MS<sub>2</sub> d'une part et MS<sub>2</sub>/AlN d'autre part), mais peuvent également avoir un impact négatif sur la texture de la couche 30 d'AlN en raison de la formation de dislocations.
- [0121] Selon un mode de réalisation particulier, une polarisation (bias) peut être appliquée sur le substrat 10 pendant le dépôt de la couche 30 d'AlN, notamment dans le cas d'un dépôt par PVD, afin de diminuer le stress mécanique au sein de la couche 30 d'AlN et

par conséquent pouvoir augmenter l'épaisseur critique à laquelle la couche 30 d'AlN va commencer à délaminer. Cette polarisation peut être appliquée, avantageusement, après le dépôt de quelques nanomètres d'AlN afin d'éviter d'endommager la surface de la couche de nucléation 20.

- [0122] Selon une autre variante de réalisation, on effectue, préalablement au dépôt de la couche 30 d'AlN, une gravure localisée de la couche 20 de MS<sub>2</sub>, de manière à rendre localement accessibles certaines zones du substrat 10. Ces zones du substrat 10 non recouvertes par la couche 20 de MS<sub>2</sub> servent de point d'ancrage à la couche 30 d'AlN. La délamination de la couche 30 d'AlN peut être ainsi évitée en améliorant l'adhésion entre l'empilement AlN/MS<sub>2</sub> et le substrat 10. La gravure localisée peut, par exemple, être réalisée par des techniques standard de lithographie.
- [0123] La couche 30 d'AlN peut contenir des agents dopants tels que des métaux de transition ou des terres rares, afin d'ajuster les propriétés piézoélectriques de l'AlN et/ou modifier ses paramètres de maille, par exemple pour permettre de diminuer le désaccord de maille entre l'AlN et le MS<sub>2</sub> constituant la couche de nucléation. De tels agents dopants peuvent être, par exemple, choisis seuls ou en combinaison, parmi le groupe comprenant le chrome, le molybdène, le tungstène, le scandium, l'yttrium et les autres lanthanides, dans des proportions n'induisant pas une altération des paramètres de maille de l'AlN supérieure à ±0,05 nm selon les axes a et b.
- [0124] Selon un mode de réalisation particulier, on répète cycliquement les étapes b) et c) pour obtenir une alternance de couches de nucléation 20 de MS<sub>2</sub> et de couches 30 d'AlN texturé. Ce mode de réalisation particulier peut, par exemple, permettre de relaxer les contraintes au sein de chaque couche 30 d'AlN et ainsi limiter la formation de dislocations et/ou la délamination des couches 30 d'AlN.
- [0125] L'invention concerne également un empilement susceptible d'être obtenu par le procédé tel que défini précédemment comprenant, et de préférence constitué successivement par (figure 2):
- une couche mince (30) d'AlN texturé,
  - une couche de nucléation polycristalline (20) de MS<sub>2</sub>.
- [0126] L'empilement peut comprendre, en outre, le substrat 10 tel que décrit précédemment.
- [0127] L'orientation des domaines cristallins est aléatoire dans un plan (a, b) parallèle à l'empilement.
- [0128] La couche mince 30 d'AlN texturée seule ou avec la couche de nucléation polycristalline 20, sous la forme d'un empilement, est particulièrement intéressante pour la fabrication de dispositifs microélectroniques et/ou électroniques.
- [0129] Bien que cela ne soit aucunement limitatif, l'invention trouve des applications dans de nombreux domaines, et en particulier, elle peut être utilisée dans le domaine des dispositifs RF et plus particulièrement des filtres RF, des diodes électroluminescentes

(LEDs), des résonateurs acoustiques ou de tout autre dispositif nécessitant l'utilisation d'une membrane piézoélectrique, ayant notamment une épaisseur inférieure à 100 nm. Elle peut être également utilisée de manière indirecte, telle que déposée ou après transfert sur un autre substrat. Dans le cas d'un transfert impliquant un retournement de l'empilement AlN/MS<sub>2</sub>, la couche de nucléation 20 de MS<sub>2</sub> peut être éliminée ou conservée. Elle peut alors servir de couche de passivation pour l'AlN, ou de couche de nucléation pour la croissance d'un autre matériau.

[0130] Exemples illustratifs et non limitatifs de modes particuliers de réalisation :

[0131] Dans cet exemple, le substrat 10 est une plaque (« wafer ») de silicium 11 recouverte d'une couche amorphe 12 de SiO<sub>2</sub> de 500 nm d'épaisseur obtenue par oxydation thermique. Une couche mince 20 de MoS<sub>2</sub> de 2 nm d'épaisseur (soit environ 3 monocouches) est obtenue par ALD à 100°C en injectant alternativement deux pré-curseurs : Mo(NMe<sub>2</sub>)<sub>4</sub> et le 1,2-éthanedithiol. Les paramètres utilisés sont, par exemple, ceux décrits dans le document EP 2 899 295 A1. Le dépôt obtenu est ensuite sulfuré à 450°C pendant 5 min sous un flux d'azote de 200 NmL/min contenant 4% d'hydrogène et 0,5 torr de vapeur de disulfure de di-tert-butyle, suivi d'un traitement thermique rapide à 950°C sous flux d'argon pendant 5 min.

[0132] Une couche 30 d'AlN de 100 nm d'épaisseur est finalement déposée sur la couche 20 de MoS<sub>2</sub> par pulvérisation cathodique (puissance RF: 2 KW, température du substrat: 350°C).

[0133] Une observation STEM de l'échantillon en coupe transversale confirme la présence des trois couches SiO<sub>2</sub>/MoS<sub>2</sub>/AlN et la croissance colonnaire de la couche 30 d'AlN (figures 4A, 4B + schéma de la figure 4C). L'observation des interfaces SiO<sub>2</sub>/MoS<sub>2</sub> / AlN à très haute résolution confirme la croissance épitaxiale des cristaux d'AlN sur les domaines cristallins de MoS<sub>2</sub> de la couche de nucléation 20, ainsi que l'absence de diffusion à l'interface AlN/MoS<sub>2</sub>. Une légère diffusion du molybdène est observée dans le substrat de SiO<sub>2</sub>, mais n'affecte pas la qualité de la monocouche de surface du MoS<sub>2</sub> qui est celle induisant la texturation de l'AlN.

[0134] La texture de la couche 30 d'AlN est évaluée par diffraction des rayons X à l'aide d'une mesure de courbe d'oscillation (« rocking curve ») obtenue en faisant varier la position angulaire omega autour de la position de Bragg du plan 002 de l'AlN. La courbe (omega scan) obtenue est représentée sur la figure 5.

[0135] La valeur de la largeur à mi-hauteur (FWHM) de la courbe d'oscillation pour cette couche de 100 nm d'AlN sur MoS<sub>2</sub> est de 0,43°, ce qui est proche des meilleures valeurs habituellement obtenues avec des couches d'AlN dont la croissance a été réalisée à très haute température sur des substrats de saphir monocristallin.

[0136] À titre de comparaison, une couche d'AlN d'épaisseur similaire (100 nm) a été déposée, avec les mêmes paramètres :

- directement sur du  $\text{SiO}_2$ , ce qui conduit à une largeur à mi-hauteur de la courbe d'oscillation de  $4,18^\circ$ ,
- sur une électrode de molybdène très texturée et orientée 110 (qui est une référence pour la fabrication de filtres RF), ce qui conduit à une largeur à mi-hauteur de la courbe d'oscillation de  $2,57^\circ$  (Fig. 5).

[0137] L'influence de l'épaisseur de la couche 30 d'AlN sur sa texturation a été évaluée pour des épaisseurs comprises entre 5 nm et 100 nm, tous les autres paramètres (substrat et nature de la couche 20 de  $\text{MoS}_2$ ) étant conservés identiques (figure 6). Les résultats obtenus indiquent des valeurs de largeur à mi-hauteur de la courbe d'oscillation inférieures à  $1^\circ$  pour des couches d'AlN de seulement 25 nm d'épaisseur, et inférieures à  $0,5^\circ$  pour des couches d'AlN d'épaisseurs supérieures à 50 nm, révélant une capacité du procédé objet de l'invention à texturer des couches d'AlN extrêmement minces (typiquement inférieures à 100 nm) bien supérieure à ce qui a été reporté jusqu'à présent dans la littérature.

## Revendications

- [Revendication 1] Procédé pour fabriquer une couche mince (30) d'AlN texturé comprenant les étapes successives suivantes :
- fourniture d'un substrat (10), ayant une surface amorphe,
  - formation d'une couche de nucléation polycristalline (20) de  $MS_2$  avec  $M=Mo, W$  ou un de leurs alliages, sur la surface amorphe du substrat (10), la couche de nucléation (20) polycristalline étant constituée de domaines cristallins dont les plans de base (002) sont parallèles à la surface amorphe du substrat (10), les domaines cristallins étant orientés aléatoirement dans un plan (a, b) formé par la surface amorphe du substrat (10),
  - dépôt de nitrure d'aluminium sur la couche de nucléation (20), conduisant à la formation d'une couche mince (30) d'AlN texturé.
- [Revendication 2] Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'alliage M de la couche de nucléation (20) de  $MS_2$  contient jusqu'à 50% atomique d'un ou plusieurs éléments additionnels choisis parmi les métaux de transition.
- [Revendication 3] Procédé selon l'une des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que la couche de nucléation (20) a une épaisseur allant de 0,6 nm à 50 nm, et de préférence de 0,6 nm à 8 nm.
- [Revendication 4] Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que l'étape b) est réalisée à une température autorisant la formation d'une couche de nucléation polycristalline (20) de  $MS_2$  en une seule étape.
- [Revendication 5] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que l'étape b) est réalisée selon les étapes successives suivantes :
- dépôt d'une couche de  $MS_x$  avec x supérieur ou égal à 2,
  - recuit de la couche de  $MS_x$  sous atmosphère inerte à une température allant de 450°C à 1200°C et de préférence de 750°C à 950°C, de manière à former une couche de nucléation polycristalline (20) de  $MS_2$ .
- [Revendication 6] Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que l'étape b) est réalisée selon les étapes successives suivantes :
- dépôt d'une couche mince contenant M sous forme élémentaire ou associé à un ou plusieurs hétéroatomes,
  - recuit thermique réactif en présence d'un composé volatil contenant du soufre à une température allant de 150°C à 1200°C et, de préférence, allant de 350°C à 750°C,
  - éventuellement, recuit sous atmosphère inerte à une température allant

- de 450°C à 1200°C et, de préférence, de 750°C à 950°C, de manière à former une couche de nucléation polycristalline (20) de MS<sub>2</sub>.
- [Revendication 7] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la couche de nucléation polycristalline (20) de MS<sub>2</sub> contient un élément dopant tel que l'azote, le phosphore, l'arsenic ou l'antimoine.
- [Revendication 8] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'étape c) de dépôt de la couche mince (30) d'AlN texturé est réalisée par dépôt physique en phase vapeur ou pulvérisation cathodique.
- [Revendication 9] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la couche mince (30) d'AlN texturé a une épaisseur allant de 1 nm à 1 µm.
- [Revendication 10] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la couche mince (30) d'AlN texturé contient des éléments dopants tels que le chrome, le molybdène, le tungstène, le scandium, l'yttrium ou un élément des lanthanides.
- [Revendication 11] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la surface amorphe du substrat (10) a une rugosité inférieure à 5nm, de préférence inférieure à 1nm et encore plus préférentiellement inférieure à 0,3nm.
- [Revendication 12] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisé en ce qu'il comporte une étape additionnelle, ultérieure à l'étape c), au cours de laquelle on retire un empilement comprenant la couche de nucléation polycristalline (20) MS<sub>2</sub> et la couche mince (30) d'AlN texturé du substrat (10).
- [Revendication 13] Empilement comprenant :
- une couche mince (30) d'AlN texturé, obtenue par le procédé selon l'une des revendications 1 à 12,
  - une couche de nucléation polycristalline (20) de MS<sub>2</sub> avec M=Mo, W ou un de leurs alliages, la couche de nucléation polycristalline (20) étant constituée de domaines cristallins dont les plans de base (002) sont parallèles à l'empilement, l'orientation des domaines cristallins dans un plan (a, b) formé par l'empilement étant aléatoire .
- [Revendication 14] Empilement tel que défini dans la revendication 13, comprenant, en outre, un substrat (10) ayant une surface amorphe, la couche de nucléation polycristalline (20) de MS<sub>2</sub> étant disposée entre le substrat (10) et la couche mince (30) d'AlN texturé.

[Revendication 15] Dispositif microélectronique, par exemple un dispositif radiofréquence, une LED, un dispositif de puissance ou une membrane piézo-électrique comprenant une couche mince (30) d'AlN texturé obtenue par le procédé selon l'une des revendications 1 à 12 ou un empilement tel que défini dans l'une des revendications 13 et 14.

[Fig. 1A]

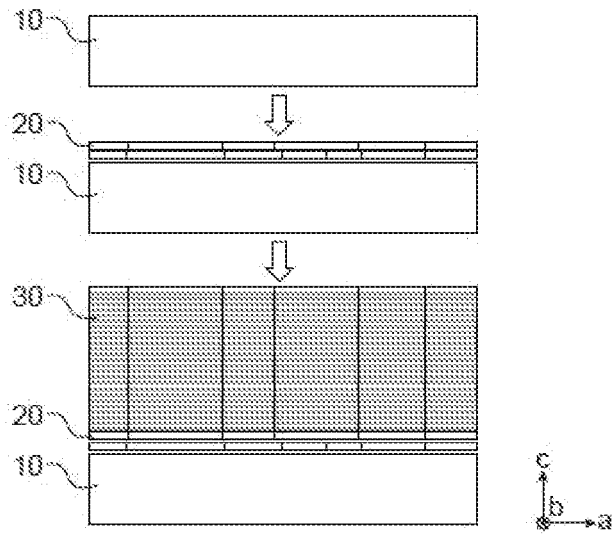


FIG.1A

[Fig. 1B]

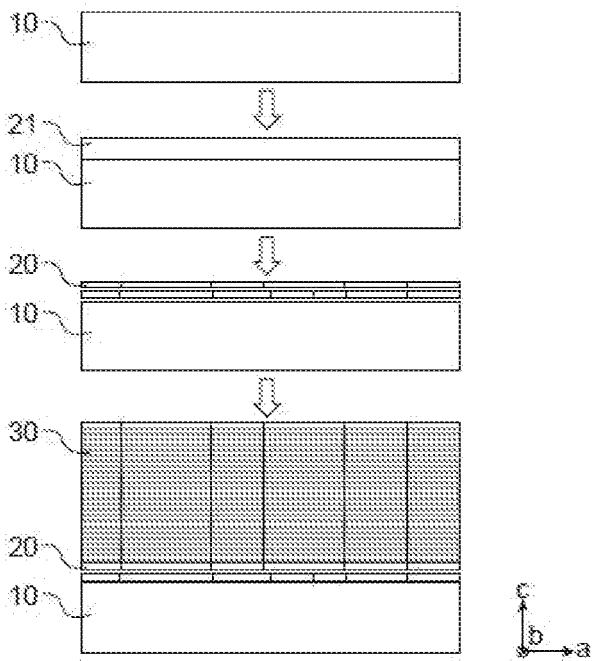


FIG.1B

[Fig. 1C]

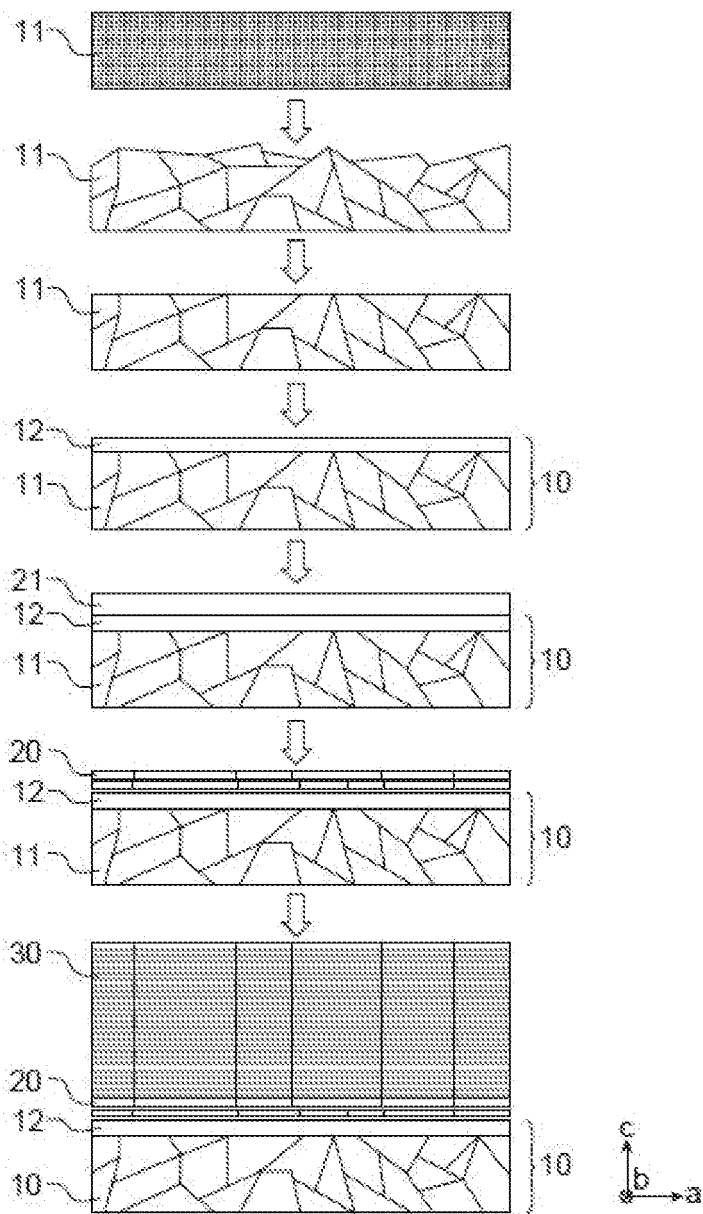


FIG.1C

[Fig. 2]

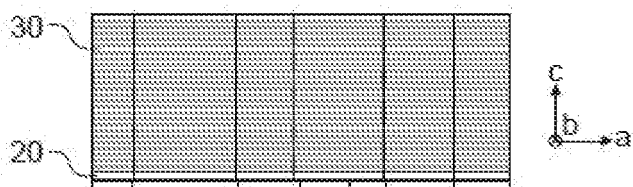


FIG.2

[Fig. 3]

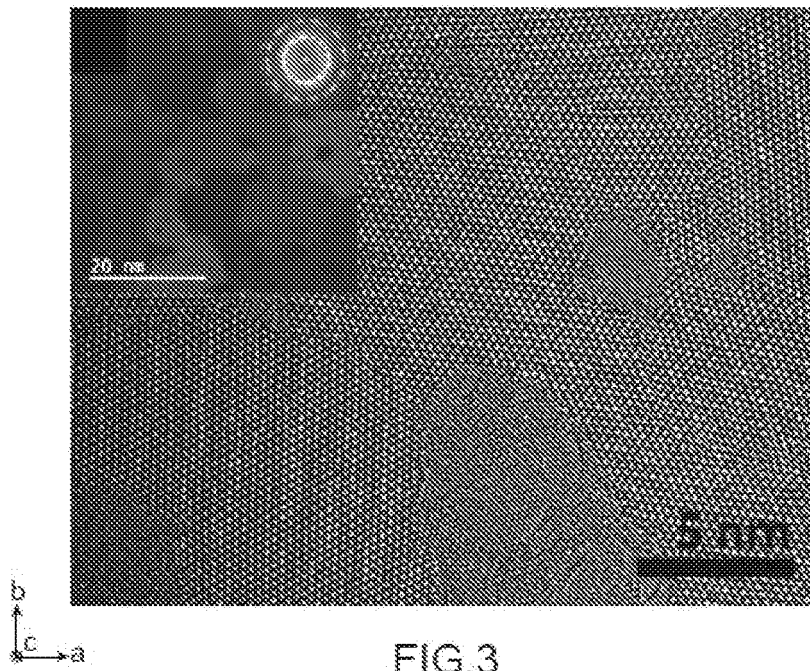


FIG.3

[Fig. 4A]

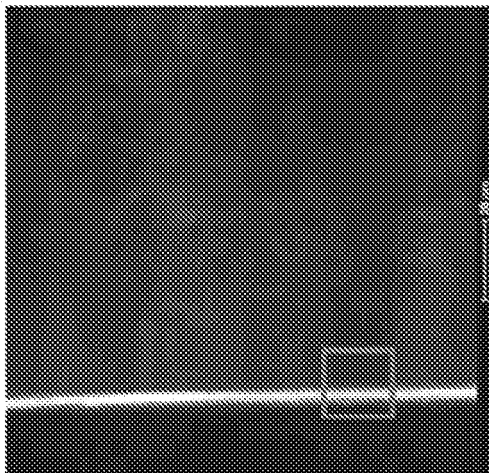


FIG.4A

[Fig. 4B]

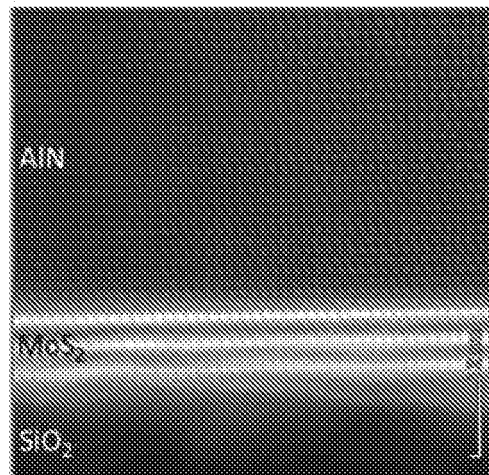


FIG.4B

[Fig. 4C]

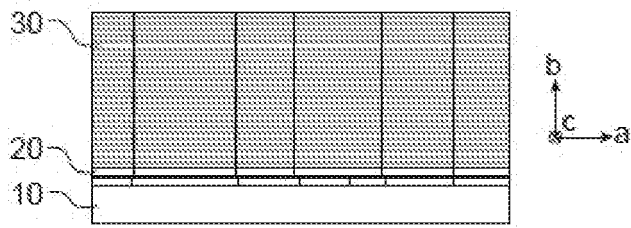


FIG.4C

[Fig. 5]

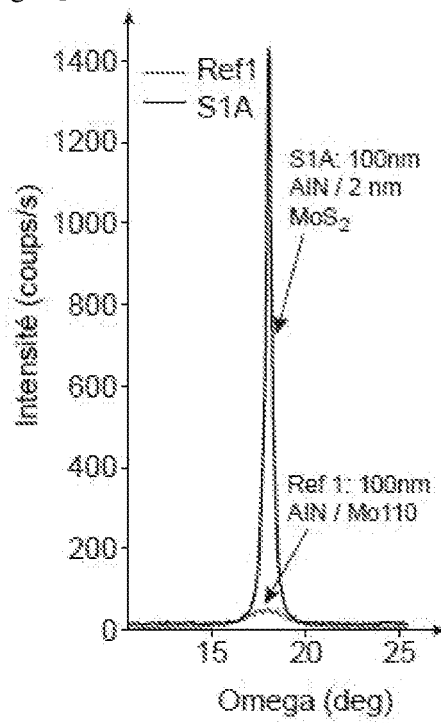


FIG.5

[Fig. 6]

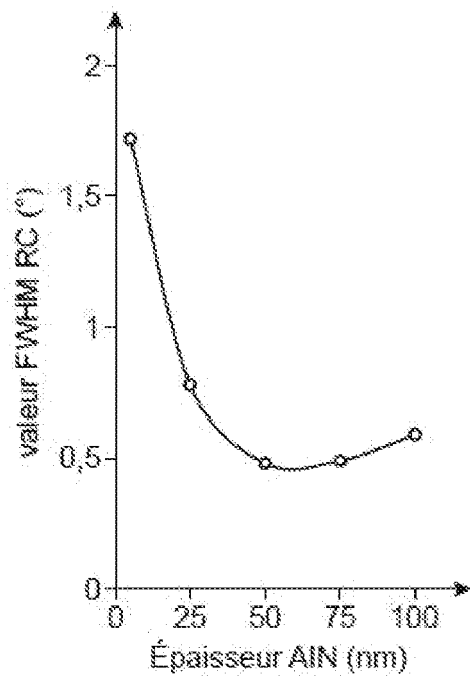


FIG.6

**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

FA 879535  
FR 1915272

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	CN 107 086 175 A (UNIV DALIAN TECH) 22 août 2017 (2017-08-22) * alinéa [0001] - alinéa [0073]; figures 1-3 *	1-4,7, 9-15	H01L41/314 H01L41/18
X	WO 2019/168187 A1 (TOSHIBA KK [JP]) 6 septembre 2019 (2019-09-06) * alinéa [0253] - alinéa [0255] * * alinéa [0119] *	1-3,5-15	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H01L C23C
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
15 juillet 2020		Gröger, Andreas	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1915272 FA 879535**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.  
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **15-07-2020**  
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
CN 107086175	A	22-08-2017	AUCUN	
-----				
WO 2019168187	A1	06-09-2019	TW 201947758 A	16-12-2019
			WO 2019168187 A1	06-09-2019
-----				