

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

①① N° de publication : **3 047 841**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)
②① N° d'enregistrement national : **16 51291**

⑤① Int Cl⁸ : **H 01 L 41/04** (2017.01), H 01 L 29/778

①②

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ TRANSDUCTEUR ELECTROMECHANIQUE A BASE DE NITRURE DE GALLIUM DOPE.

②② Date de dépôt : 17.02.16.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 18.08.17 Bulletin 17/33.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 25.05.18 Bulletin 18/21.

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) : *CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE* et *UNIVERSITE DES
SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE*
Etablissement public — FR.

⑦② Inventeur(s) : FAUCHER MARC et CORDIER
YVON.

⑦③ Titulaire(s) : *CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE, UNIVERSITE DES
SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE*
Etablissement public.

⑦④ Mandataire(s) : CABINET PONTET ALLANO &
ASSOCIES SELARL.

FR 3 047 841 - B1



Transducteur électromécanique à base de nitrure de gallium dopé.

La présente invention concerne un empilement de couches semi-conductrices, destiné à la réalisation d'un dispositif microélectromécanique, par exemple un transducteur, comportant au moins trois couches semi-conductrices supportées par un même substrat, l'une de ces couches étant constituée d'un matériau III-N semi-conducteur piézoélectrique dopé.

Les transducteurs microélectromécaniques, ou MEMS (pour *Micro-Electro-Mechanical Systems* en anglais), permettent de convertir une grandeur mécanique en un signal électrique, et réciproquement. Ces dispositifs ont connu un développement important dans les dernières décennies. Fabriqués à l'aide de techniques empruntées à la microélectronique, ces dispositifs comportent typiquement des éléments mécaniques de dimensions submillimétriques (poutres encastrées, membranes...), ainsi que des actionneurs pour mettre en mouvement des éléments mécaniques et/ou des capteurs pour détecter le mouvement d'éléments mécaniques. Lorsque les dimensions caractéristiques de ces dispositifs sont inférieures au micromètre, on parle parfois de systèmes nanoélectromécaniques, ou NEMS (pour *Nano-Electro-Mechanical Systems* en anglais). Dans la suite, les expressions « MEMS » et « dispositif micromécaniques » seront utilisées dans un sens large, incluant les dispositifs et systèmes nanoélectromécaniques (NEMS).

La détection du mouvement à l'échelle micromécanique se heurte encore à des difficultés importantes, qui limitent les potentialités des systèmes microélectromécaniques. Les difficultés sont essentiellement dues au fait que le signal de sortie d'un capteur miniaturisé est généralement de très faible amplitude, et est donc fortement affecté soit par le bruit thermique, soit par l'impédance des câbles ou du circuit de mesure qui peut être déporté. Ce problème est particulièrement aigu dans le cas des MEMS de dimensions réduites et qui doivent fonctionner à des températures supérieures à 150 °C.

Actuellement, de nombreux transducteurs sont réalisés sur des substrats semi-conducteurs. En particulier, les transducteurs piézorésistifs à base de silicium comptent parmi les dispositifs les plus utilisés dans l'industrie électronique. Ces capteurs peuvent comporter des zones dopées, par exemple
5 par du phosphore, du bore, ou de l'arsenic. Ce dopage permet de définir des contacts ohmiques ou de réaliser l'intégration de transducteurs piézorésistifs, soit par la disposition de transistors co-intégrés.

Cependant, il est bien connu de l'homme de métier que la performance des MEMS à base de tels matériaux est limitée par plusieurs facteurs. A haute
10 température, la diffusion de ces dopants pose un problème de dégradation de ces composants. De plus les propriétés électriques des matériaux utilisés, notamment le silicium, deviennent difficiles à maîtriser à haute température, notamment leur conductivité.

L'emploi de nitrures d'éléments du groupe III, tels que le nitrure de gallium Ga, d'aluminium Al, d'indium In, de bore B ou encore des alliages de ces éléments, permet de résoudre de nombreuses limitations techniques. Ces matériaux semi-conducteurs sont en effet particulièrement intéressants pour des raisons de stabilité mécanique, et de conductivité thermique. Le document
15 WO2012/107888 divulgue par exemple un MEMS comprenant une première couche en GaN déposée sur un substrat de silicium, une deuxième couche en AlGaIn déposée sur cette première couche, et une structure d'actionnement. La combinaison de ces différents matériaux à la fois semi-conducteurs et piézoélectriques forme une hétérostructure, et permet de confiner un gaz
20 bidimensionnel de porteurs de charge entre les deux couches, produisant un canal de conduction à haute mobilité électronique. Une caractéristique intrinsèque d'un tel canal de conduction est définie par la résistance de feuille R_s , mesurée en ohms.

Les gaz bidimensionnels de porteurs peuvent être exploités pour la
30 conception de transistors à effet de champ à haute mobilité électronique HEMT (pour *High-electron-mobility transistor* en anglais), permettant la réalisation de capteurs de contraintes mécaniques hautement performants. Typiquement, ces

gaz bidimensionnels peuvent être présents au repos, soit obtenus par l'application d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif. Le document US2007/0176211 divulgue ainsi des MEMS de type à micro-poutre, réalisés en hétérostructure AlGaN/GaN, et dans lesquels les mouvements de la micro-poutre sont détectés à l'aide d'un transistor de type HEMT intégré à l'hétérostructure.

Toutefois, il est connu de l'état de l'art pour l'épitaxie de GaN sur silicium que les hétérostructures les plus aisément obtenues, telles que $Al_xGa_{1-x}N$ (avec x un nombre compris entre 0,2 et 0,3), permettent de disposer d'un gaz bidimensionnel de porteurs dont la résistance de feuille est comprise entre 300 et 500 Ohms pour des HEMTs. Pour abaisser cette résistance de feuille en dessous de 250 Ohms, on fait intervenir des valeurs de x élevées, ce qui crée des contraintes mécaniques et/ou d'autres difficultés lors de la croissance épitaxiale. De façon générale, la concentration de porteurs est également limitée dans ce type d'hétérostructure par les propriétés physiques des matériaux tels que la polarisation spontanée et l'épaisseur de la couche barrière. De plus la mobilité est limitée. En outre, le fonctionnement de tels dispositifs en présence de températures supérieures à 150 °C reste difficile à mettre en œuvre avec ces technologies car celles-ci sont limitées par les métallurgies mises en œuvre, qui conduisent à l'apparition de défaillances électriques.

La présente invention vise donc à résoudre les inconvénients précités en modifiant l'architecture des dispositifs microélectromécaniques connus de l'état de l'art.

A cet effet, l'invention propose un empilement de couches semi-conductrices comportant : un substrat ; une première couche d'un matériau semi-conducteur, déposée sur ledit substrat ; une deuxième couche d'un matériau semi-conducteur, déposée sur ladite première couche ; une troisième couche d'un matériau semi-conducteur, déposée sur ladite deuxième couche ; et caractérisé en ce qu'au moins l'une des première, deuxième et troisième couche est

constituée d'un matériau semi-conducteur piézoélectrique dopé de manière à produire un très grand nombre de porteurs de charge électrique.

5 Avantageusement, ledit empilement comporte en outre au moins un élément suspendu formé par des prolongements d'une ou de plusieurs desdites couches s'étendant au-delà d'un bord dudit substrat, ledit élément suspendu étant encastré sur une partie de son périmètre au niveau dudit bord, et présente de préférence une forme choisie entre : une poutre ; une membrane ; un disque ; ou une plaque.

10

Avantageusement, la troisième couche comporte une épaisseur comprise entre 0,05 et 20 microns (μm), préférentiellement 0,1 à 2 microns (μm).

15

Avantageusement, la première couche et la deuxième couche sont confondues.

Avantageusement, au moins une desdites première, deuxième et/ou troisième couche est réalisée en un matériau de type III-N, l'élément du groupe III étant choisi parmi Al, Ga, In, B ou tout alliage de ces éléments.

20

Avantageusement, les éléments utilisés pour le dopage du matériau de au moins l'une des première, deuxième et troisième couche sont choisis parmi Si, Ge, O et Mg.

25

Avantageusement, ladite troisième couche est réalisée en GaN dopé.

Avantageusement, la troisième couche est caractérisée par une concentration en éléments dopants comprise entre 10^{18} et 10^{21} par cm^3 .

30

Avantageusement, ladite troisième couche est connectée électriquement à au moins un canal de conduction électrique, ledit canal de conduction électrique s'étendant dans ladite deuxième couche.

5 Avantageusement, ladite deuxième couche comporte une hétérostructure confinant un gaz bidimensionnel de porteurs de charge (2DEG), ledit gaz bidimensionnel formant canal de conduction électrique.

10 La présente invention se rapporte également à un dispositif microélectromécanique comportant un tel empilement de couches semi-conductrices, et et comprenant en outre au moins deux électrodes, au moins deux desdites électrodes étant connectées à ladite deuxième couche, et/ou à ladite troisième couche, et/ou à un gaz bidimensionnel de porteurs de charge.

15 Avantageusement, au moins une des électrodes est réalisée en GaN dopé.

20 Avantageusement, lesdites électrodes s'étendent au moins partiellement sur une surface de ladite troisième couche et/ou de ladite deuxième couche.

 Avantageusement, chacune desdites électrodes comporte au moins un prolongement qui s'étend à la surface dudit élément suspendu, et est connecté électriquement à la troisième couche.

25 Avantageusement, au moins une desdites électrodes est un contact ohmique, le matériau composant ledit contact ohmique étant de préférence choisi parmi du titane, du nickel, de l'aluminium ou de l'or.

30 Avantageusement, lesdites électrodes forment les contacts d'un transistor à effet de champ.

Dans ce contexte, les inventeurs ont découvert que le dopage de nitrures d'éléments III constitue une approche particulièrement innovante. Les propriétés électriques d'un empilement de couches semi-conductrices incluant une couche de nitrure de gallium GaN, notamment, peuvent être modifiées grâce à un dopage approprié, ce qui permet d'ajuster la résistivité électrique du dispositif sur une large gamme de valeurs.

Les transducteurs MEMS selon l'invention sont caractérisés en ce qu'au moins l'une des première, deuxième et troisième couche est réalisée en un matériau semi-conducteur piézoélectrique dopé. La présente invention porte sur un dispositif microélectromécanique dont le fonctionnement combine à la fois la réalisation d'une hétérostructure d'éléments III-N et le dopage d'un matériau semi-conducteur et piézoélectrique au sein du même transducteur.

Ces caractéristiques permettent à l'invention de s'affranchir totalement ou partiellement de la présence d'un gaz bidimensionnel de porteurs de charge. Ces caractéristiques permettent également de concevoir des transducteurs microélectromécaniques pouvant fonctionner de façon prolongée à des températures supérieures à 150 °C. En outre, la possibilité d'abaisser la résistivité électrique des transducteurs MEMS permet d'augmenter leurs performances en tant que capteurs et/ou actionneurs notamment en abaissant le seuil de bruit thermique. Ceci constitue une avancée importante pour le développement de MEMS compatibles avec des environnements hostiles et pouvant être interfacés électroniquement avec d'autres étages de mesure.

D'autres caractéristiques, détails et avantages de l'invention ressortiront à la lecture de la description faite en référence aux dessins annexés donnés à titre d'exemple et qui représentent, respectivement :

- la figure 1, une vue en coupe d'un empilement de couches semi-conductrices selon l'état de la technique.
- la figure 2, une vue en coupe d'un exemple de dispositif microélectromécanique selon l'état de la technique.
- la figure 3, une vue en coupe d'un empilement de couches semi-conductrices selon l'invention.

- la figure 4, une vue en coupe d'un dispositif microélectromécanique selon un premier mode de réalisation de l'invention.
- les figures 5a et 5b, respectivement, une vue en plan et une vue en coupe d'un dispositif microélectromécanique selon un deuxième mode de réalisation de l'invention.
- la figures 6, une vue en plan d'un dispositif microélectromécanique selon un troisième mode de réalisation de l'invention.
- la figure 7, une vue en plan d'un dispositif microélectromécanique selon un quatrième mode de réalisation de l'invention.
- la figure 8, une vue en plan d'un dispositif microélectromécanique selon un cinquième mode de réalisation de l'invention.

On remarquera ici que les figures ne sont pas à l'échelle, et que la présente invention ne se limite pas aux modes de réalisation précités.

La conception des MEMS repose généralement sur l'empilement de différentes couches semi-conductrices piézoélectriques. Cet empilement de couches permet de réaliser un canal de conduction favorisant le passage d'un courant électrique, avec une résistance électrique déterminée. Cette résistance est susceptible de varier par effet piézoélectrique lorsque le dispositif est soumis à une contrainte mécanique. Sur la base de cet effet, un MEMS peut convertir une grandeur mécanique en un signal électrique de telle sorte par exemple qu'il peut être utilisé en tant que capteur d'accélération. De manière similaire, un MEMS peut servir d'actionneur pour produire un déplacement mécanique en cas d'application d'un courant électrique et/ou d'une différence de potentiel.

La figure 1 montre un empilement de couches semi-conductrices et piézoélectriques selon l'état de la technique. Tel que représenté, ce dispositif comprend une hétérostructure pour confiner un gaz bidimensionnel de porteurs de charge. L'empilement des couches est réalisé à partir d'un substrat **Sub**,

composé par exemple de silicium Si. Ce substrat est gravé de manière chimique, de manière lithographique ou par tout autre moyen. De préférence, la couche **Sub** est gravée de sorte à pouvoir libérer une structure de couches de nitrures d'éléments III. Ces couches sont par exemple constituées de GaN, d'AlN, d'InN ou de tout alliage d'éléments de type III-N. Ces éléments possèdent la propriété d'être à la fois des matériaux semi-conducteurs et piézoélectriques.

Une première couche **Nuc**, dite de nucléation, s'étend sur le substrat **Sub**. Cette couche peut être composée de GaN ou d'AlN, réalisée par dépôt chimique en phase vapeur (ou CVD, pour Chemical Vapor Deposition), ou encore par épitaxie sous jets moléculaires (ou MBE, pour Molecular Beam Epitaxy) à haute température. Une couche **Nit**, appelée couche « tampon », s'étend au-dessus de la couche **Nuc**. Cette couche **Nit** est composée d'un alliage de nitrures d'éléments Ga, Al, In et/ou B, par exemple de GaN. Cette couche assure une transition douce entre plusieurs matériaux présentant une structure cristalline différente. A cet égard, l'empilement peut également inclure une ou plusieurs autres couches supplémentaires pour favoriser la croissance orientée des couches supérieures par épitaxie.

Une couche **Nit2** appelée couche « barrière » et composée d'un alliage contenant de l'aluminium tel AlInGaN ou AlGaN s'étend sur la couche **Nit** et comporte une épaisseur comprise typiquement entre 15 et 30 nanomètres. L'empilement de plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs de nature différente, par exemple Si pour le substrat, GaN pour la couche de nucléation et/ou la couche **Nit**, et AlGaN pour la couche barrière **Nit2**, permet de constituer une hétérostructure. Cette hétérostructure confine un gaz bidimensionnel de porteurs de charge, plus précisément un gaz bidimensionnel d'électrons **2DEG** (2DEG, pour *2-Dimensional Electron Gas* en anglais), dans la partie supérieure de la couche **Nit**. Ce gaz bidimensionnel est représenté symboliquement par une région délimitée par une ligne en pointillés sur la figure 1, et sert de canal de conduction au dispositif. Les porteurs de charge se déplacent dans la couche **2DEG**, et bénéficient d'une mobilité électronique significativement

supérieure à celle des autres couches du dispositif. Un tel gaz bidimensionnel de porteurs peut être exploité pour réaliser, par exemple, un transistor à effet de champ de type HEMT qui constitue un excellent capteur de contraintes mécaniques.

5 Les matériaux utilisés pour constituer les différentes couches de ce dispositif sont semi-conductrices et piézoélectriques. Lorsqu'une déformation apparaît dans le matériau composant la couche incluant la couche **2DEG**, par exemple sous l'effet d'une sollicitation mécanique extérieure, il en résulte une modification du nombre de porteurs de charge. De cette modification résulte
10 une modulation de la conductivité électrique de la couche, proportionnellement à la contrainte correspondante. Cet effet dit piézorésistif permet la réalisation d'un transducteur électromécanique de type MEMS.

La figure 2 est une vue en coupe d'un transducteur
15 microélectromécanique selon l'état de la technique, en particulier un capteur ou une structure d'actionnement piézoélectrique comprenant un transistor à effet de champ. Les couches **Nuc** et **Nit** reposent sur le substrat **Sub**. La couche **Sub** sert de support mécanique au transducteur. Au-dessus de la couche **Nit** s'étend une couche **Nit2**. La couche **Nit2** est composée d'un matériau semi-conducteur piézoélectrique différent du matériau semi-conducteur composant la
20 couche **Nit**, et est d'épaisseur plus faible que la couche **Nit**. L'hétérostructure formée par la jonction de la couche **Nit** et de la couche **Nit2** permet éventuellement de confiner un gaz bidimensionnel de porteurs **2DEG**, pouvant former un canal de conduction sous la face supérieure du transducteur.

25 Afin de réaliser un capteur piézorésistif, par exemple un accéléromètre, le transducteur représenté à la figure 2 intègre un élément suspendu **P**, typiquement une structure mobile de forme quelconque. Typiquement, **P** est formée par le prolongement d'une ou de plusieurs des couches **Nuc**, **Nit** et **Nit2** telles que précédemment décrites, et s'étend au-delà de l'un des bords **E** du
30 substrat **Sub**. Les dimensions de ces différentes couches sont déterminées lors de la fabrication du transducteur. L'élément suspendu **P** peut être formé d'une poutre encastrée à l'une ou deux de ses extrémités, d'une membrane, d'un

disque, d'une plaque, ou de toute autre type de structure encastrée sur une partie de son périmètre au niveau de l'un des bords **E**. Cet élément suspendu **P** peut être soit rigide, soit déformable sous la contrainte.

5 Pour la réalisation d'un MEMS tel qu'un capteur ou un actionneur piézoélectrique, plusieurs électrodes peuvent être intégrées à cette structure. Ces électrodes peuvent former un ou plusieurs transistors avec les couches **Nit** et **Nit2**. L'intégration de ces électrodes peut se faire au moyen de différentes étapes de fabrication, incluant une ou plusieurs phases de dépôt, d'étuvage, de
10 cuisson, de polymérisation et/ou de phases d'élimination d'éventuelles couches sacrificielles.

Comme illustré à la figure 2, ce transistor est par exemple un transistor à effet de champ. Les électrodes de ce transistor à effet de champ, appelées drain **D**, source **S** et grille **G**, sont intégrées aux couches supérieures du
15 transducteur, par exemple la couche **Nit2** et/ou le gaz bidimensionnel **2DEG**. Typiquement, les électrodes **S** et **D** sont disposées de sorte à être en contact avec le gaz bidimensionnel de porteurs confiné dans l'empilement des couches **Nit** et **Nit2**, tandis que l'électrode **G** s'étend uniquement sur la couche **Nit2**.
20 Lorsqu'une contrainte mécanique est appliquée à l'une ou plusieurs des couches semi-conductrices formant l'empilement, en particulier lorsque la couche **Nit** subit une contrainte mécanique perpendiculaire au plan de la couche, la variation du nombre de porteurs dans le canal de conduction **2DEG** génère une variation de la conductivité électrique de celui-ci. Cette variation de conductivité génère un signal électrique mesurable au niveau des électrodes du
25 transistor. Ce dispositif est équivalent à une résistance électrique variable R. Dans le cas d'un MEMS fonctionnant en tant que capteur, il est ainsi possible d'enregistrer les variations de tension aux bornes de cette résistance R lorsque le MEMS subit une contrainte mécanique. Dans le cas d'un MEMS incluant une structure d'actionnement piézoélectrique, l'injection d'un courant électrique
30 et/ou l'application d'une différence de potentiel à ses bornes permet de générer un déplacement mécanique à l'intérieur de la couche, ce qui permet à son tour

de provoquer un actionnement de la partie mobile du MEMS, par exemple une flexion de la poutre **P**.

Pour un dispositif comportant une hétérojonction de deux couches semi-conductrices, par exemple **Nit** et **Nit2** sur la figure 2, la résistivité électrique du gaz bidimensionnel **2DEG** peut se caractériser par une résistance de feuille R_s . Le canal de conduction formé par la région **2DEG** peut ainsi être caractérisé en fonction de R_s , avec $R_s = \rho/w$, ρ et w correspondant, respectivement, à la résistivité électrique et à l'épaisseur dudit canal de conduction. Cette résistance est définie en Ohms par carré car elle correspond à la valeur de la résistance électrique de la couche mesurée entre deux contacts espacés d'une distance égale à leur largeur. Il est connu de l'état de la technique que dans le cas d'une hétérojonction du type GaN/AlGa_N, la valeur de R_s dépend directement du pourcentage d'aluminium présent dans l'alliage d'AlGa_N formant la couche barrière **Nit2**, ainsi que de son épaisseur. Il est également connu qu'il est difficile de poursuivre la réduction de la résistance du canal en augmentant la fraction molaire d'Al au-delà de 30%. Ce facteur limite donc considérablement la réalisation d'un transducteur comprenant une hétérojonction du type GaN/AlGa_N.

Il est connu de l'état de l'art que la mobilité électronique d'une couche semi-conductrice dopée est généralement inférieure à la mobilité électronique d'un gaz bidimensionnel de porteurs. Le but de la présente invention est ainsi de proposer un dispositif électromécanique présentant des performances améliorées par rapport aux MEMS connus de l'état de l'art. De manière surprenante, les inventeurs ont découvert que l'utilisation de matériaux piézoélectriques dopés constituait une solution avantageuse pour réaliser un transducteur piézorésistif. Notamment, l'utilisation de propriétés particulières du nitrure de gallium GaN dopé permet de fixer la densité de porteurs dans le canal bidimensionnel. Les propriétés de la présente invention permettent d'assurer un effet de transduction par écrantage de la charge piézoélectrique, similairement à l'effet de transduction pouvant être généré par une hétérostructure de type GaN/AlGa_N. Cette utilisation permet également la

réalisation d'un dispositif caractérisé par une faible résistance électrique. En outre, la réalisation d'une hétérostructure s'affranchissant de la couche **2DEG** pour la réalisation de dispositifs microélectroniques plus performants que les MEMS actuels, constitue un avantage de la présente invention.

5 En particulier, les inventeurs ont constaté que le dépôt d'une couche semi-conductrice de GaN dopé sur une couche de GaN non dopé permet de réaliser un MEMS surmontant les difficultés techniques précédemment mentionnées. L'amélioration du transport des porteurs de charge au sein d'un milieu dopé permet de s'affranchir de plusieurs limites techniques connues des
10 MEMS actuels en termes de performances électroniques, notamment de réduire la résistivité électrique du dispositif et de faciliter la fabrication des contacts permettant de connecter électriquement le transducteur au monde extérieur. Ceci permet d'augmenter la sensibilité des MEMS en tant que capteur et/ou actionneur. Parmi d'autres avantages techniques mis en
15 évidence, on peut citer la diminution du nombre d'étapes de fabrication, ainsi que le fonctionnement avantageux du capteur en présence de températures supérieures à 150 °C, ce que ne permettent pas facilement les technologies de transducteurs MEMS réalisées jusqu'alors sur les couches minces de nitrures.

20 La figure 3 illustre une vue en coupe d'un empilement de couches semi-conductrices selon l'invention. Comme précédemment, un empilement de couches **Nuc** et **Nit** est formé sur un substrat **Sub** pour réaliser un élément suspendu **P**. Cet élément suspendu est encastré sur une partie de son périmètre et peut être une poutre, une membrane, un disque ou une plaque. La
25 couche **Sub**, constituée par exemple de silicium, sert à la fois de support mécanique et d'isolant électrique pour les couches supérieures de l'empilement. La couche **Nuc** s'étend au moins partiellement sur la couche **Sub** et forme une couche dite de nucléation. Cette couche **Nuc** peut être soit une couche de silicium, par exemple la couche active d'un substrat SOI (silicium sur isolant), soit une couche de nitrures d'éléments (Ga, Al, In, B), ou un autre
30 matériau à même d'améliorer la croissance cristalline sur la couche **Sub** (SiC cubique, oxyde de terre rare etc...). **Nuc** peut être configurée pour favoriser la

nucléation. De manière non limitative, **Nuc** est caractérisée par une épaisseur comprise entre 0,01 et 1 microns (μm), et préférentiellement entre 0,05 et 0,1 microns (μm).

La couche tampon **Nit** qui s'étend sur la couche **Nuc** est composée d'un
5 alliage de nitrures d'éléments (Ga, Al, In, B). Cet alliage est de préférence
constitué de GaN non dopé. La première couche **Nuc** et la deuxième couche
Nit peuvent être confondues en une seule couche, par exemple une couche
Nit. Une couche **SD** s'étend sur la couche **Nit**. En particulier, un substrat SOI
peut servir de support à la couche **Nit** et/ou à la couche **SD**. La couche **SD** est
10 une couche semi-conductrice ayant la particularité d'être dopée. Le dopage de
la couche **SD** peut être de type n ou de type p, de préférence de type n. Ce
dopage peut être obtenu en incorporant les dopants (impuretés) pendant la
croissance de la couche (dopage dit « in situ »), en modifiant les conditions de
croissance pour incorporer des défauts électriquement actifs (lacunes,
15 complexes) ou par implantation. Les impuretés utilisées pour le dopage peuvent
être choisies parmi les éléments suivants: Si, Ge, O et Mg. La couche **SD** peut
être gravée partiellement pour favoriser la conduction de courants électriques
sur la structure suspendue **P**. La couche **SD** est une couche semi-conductrice
de nitrure de gallium GaN ayant la particularité d'être dopée. La concentration
20 en dopants de la couche **SD** est préférentiellement comprise entre 10^{18} et 10^{21}
par cm^3 . La couche **SD** peut être connectée électriquement à un ou plusieurs
canaux de conduction électrique, ce ou ces canaux pouvant s'étendre dans la
couche **Nit**. Le dopage de l'une ou de plusieurs couches semi-conductrices
comme la couche **SD**, ou encore l'augmentation de leur épaisseur, permet
25 d'augmenter la conduction électrique d'un ou de plusieurs canaux en réduisant
la résistance de feuille R_s . De plus, la possibilité de concevoir un dispositif avec
une résistance par carré pouvant être choisie inférieure à 400 ohms par carré,
constitue un avantage technique important de l'invention.

La couche **SD** joue ici un rôle essentiel pour le fonctionnement du
30 dispositif microélectromécanique en tant que transducteur. Lorsqu'une
contrainte est appliquée perpendiculairement au plan de la couche, cette

contrainte produit une variation de conductivité électrique dans **SD**, qui peut être mesurée.

5 Considérant une couche **SD** constituée de GaN dopé, la possibilité de moduler la concentration de dopage et l'épaisseur de la couche permet de fixer cette conductivité électrique, et donc la résistance électrique du dispositif. On remarquera que la réalisation de cet empilement n'impose pas de contraintes sur les longueurs relatives des couches **Nuc**, **Nit** et **SD**, et que différents types d'architectures sont envisageables. En particulier, le dépôt d'une couche dopée de GaN est possible sur tout ou une partie de l'empilement des couches
10 constituant l'élément suspendu **P**. De même, la partie mobile de **P** peut être obtenue par gravure d'une couche isolante.

 Différentes architectures et différents types de composants électriques peuvent être intégrés à cet empilement de couches pour réaliser un MEMS. En
15 particulier, une pluralité d'électrodes peut être intégrée aux couches de l'empilement pour réaliser un transducteur à partir de l'empilement de couches semi-conductrices représenté à la figure 3.

 La figure 4 illustre une vue en coupe d'un dispositif électromécanique
20 selon un premier mode de réalisation de l'invention. Comme représenté, l'invention intègre la présence d'une couche dopée **SD** superposant l'empilement de couches **Sub**, **Nuc** et **Nit**. Cette couche **SD** est discontinue et présente plusieurs éléments de couche **SD** disjoints. Notamment, l'un de ces éléments de couche peut être formé dans l'empilement des couches constituant
25 la poutre **P** et un autre de ces éléments de couche peut être formé dans l'empilement des couches superposant le substrat **Sub**. La disposition et l'étendue de ces éléments de couche **SD** pourra varier selon les architectures de l'invention.

 De préférence, la couche **SD** est constituée de GaN dopé. La couche **SD**
30 peut servir de couche de contact pour l'intégration d'une pluralité d'électrodes. En outre, toute partie de la couche **SD** se situant sur la partie mobile du transducteur, c'est-à-dire sur des prolongements d'une ou de plusieurs couches

s'étendant au-delà du bord **E**, peut servir de piézorésistance pour ledit transducteur.

En particulier, l'intégration d'un transistor à effet de champ peut être réalisée à l'aide d'électrodes de source **S**, de grille **G** et de drain **D** intégrées au transducteur. Typiquement, les électrodes **S** et **D** sont connectées sur la couche **SD** afin de réaliser un contact électrique avec le matériau composant cette couche. Par exemple, les électrodes **S** et **D** peuvent être intégrées, séparément, à deux desdits éléments de couche disjoints de la couche **SD**. Un canal de conduction électrique est présent entre ces éléments de couche disjoints. En particulier, un gaz bidimensionnel **2DEG** peut être présent dans la couche **Nit**, et peut former un canal de conduction électrique entre lesdits éléments de couche. L'électrode de grille **G**, éventuellement constituée d'un matériau différent de celui constituant les contacts **S** et **D**, s'étend sur une surface de la couche **Nit** et permet de moduler le passage du courant dans ledit canal de conduction.

L'électrode **G** est connectée électriquement à la couche **Nit**. Le transistor à effet de champ constitué des électrodes **S**, **G** et **D** permet le fonctionnement du dispositif en tant que transducteur microélectromécanique. Ces électrodes permettent d'injecter un courant électrique dans le transducteur, de détecter et/ou d'actionner d'éventuels déplacements de la partie mobile **P**. Nous décrivons ces fonctions dans le cadre de la figure 5.

Les contacts **S** et **D** de ce transistor peuvent être réalisés par dépôt d'un métal comme du titane, de l'aluminium, , sur la surface supérieure du dispositif. Ce dépôt peut être suivi d'une étape de recuit pour permettre la diffusion des dopants dans le matériau semi-conducteur. De préférence, ces étapes sont réalisées de sorte à ce que le ou les contacts formés soient caractérisés par une très faible résistivité. La minimisation de la résistivité électrique de ces contacts dits ohmiques permet de faciliter l'injection et/ou l'extraction d'un courant électrique dans le dispositif.

Pour un mode de réalisation comprenant au moins un transistor et un élément suspendu, la couche **SD** peut présenter une ou plusieurs fonctions : former un canal de conduction électrique sur l'élément suspendu **P**, servant de

transducteur, et/ou constituer une couche formant un contact électrique avec le canal dudit transistor.

Les figures 5a et 5b illustrent respectivement une vue en coupe et une
5 vue en plan d'un dispositif MEMS selon un deuxième mode de réalisation de l'invention. Comme représenté en coupe sur la figure 5a, la partie fonctionnelle d'un transducteur selon l'invention est intégrée à une structure suspendue **P**, par exemple une poutre semi-encastree, obtenue par epitaxie de couches semi-conductrices sur un substrat **Sub** en silicium. Le substrat et la structure
10 suspendue comprennent un empilement de couches semi-conductrices **Nuc**, **Nit** et **SD** semblable à celui décrit pour le premier mode de réalisation de la présente invention. La couche **SD** peut être gravée partiellement et située au moins partiellement sur l'élément suspendu **P**. Les deux couches **Nit** et **SD**
15 sont, par exemple, constituées de GaN non dopé et de GaN dopé respectivement, et s'étendent sur le substrat **Sub**. Ces couches se prolongent au-delà du bord **E** délimitant le support de **P** sur **S** et/ou l'une ou plusieurs des couches de l'empilement, pour former la structure mécanique mobile du dispositif.

La partie fonctionnelle du transducteur comprend également au moins
20 deux électrodes **CO1** et **CO2**. Ces électrodes s'étendent au moins partiellement sur une surface de la couche **SD** et/ou de la couche **Nit**. Typiquement, **CO1** et **CO2** peuvent former des zones métalliques élargies à la surface de la couche de contact, et permettent de poser une pointe ou de réaliser une microsoudure. Les électrodes **CO1** et **CO2** peuvent également comporter des prolongements
25 **PL1** et **PL2**, par exemple deux pistes de métal s'étendant à la surface de l'élément suspendu **P**.

Sur la figure 5b en coupe, les éléments **CO2** et **PL2** ne sont pas représentés. De préférence, mais de manière non limitative, les prolongements
30 **PL1** et **PL2** sont au moins partiellement connectés électriquement à la couche **SD**. Pour permettre le fonctionnement du transducteur, les contacts électriques sont soumis à une différence de potentiel ΔV , par exemple à l'aide d'un générateur de tension. L'électrode **CO1** est connectée à une référence de

masse. L'électrode **CO2** peut être connectée à un circuit électronique, par exemple un ensemble d'éléments de polarisation, pour fixer le point de fonctionnement du transducteur. Ces éléments de polarisation comprennent typiquement une ou plusieurs sources de tension ou de courant, un ensemble
5 d'une ou plusieurs résistances électriques, une ou plusieurs capacités et/ou une ou plusieurs inductances.

Le fonctionnement d'un MEMS combinant une couche de GaN dopé apparaît plus clairement sur la base de la description de la circulation d'un courant électrique dans le dispositif. Pour permettre le fonctionnement d'un
10 transducteur en tant que capteur ou en tant qu'actionneur selon l'invention, un courant électrique peut être injecté dans l'un des deux contacts électriques, par exemple **CO2**. Sous l'effet d'une différence de potentiel appliquée, ce courant traverse la piste de métal **PL2** en direction de la poutre **P**. Il circule ensuite dans l'empilement vers la partie inférieure de **P**, et traverse la couche **SD**
15 perpendiculairement au plan de la couche. Lorsqu'il atteint la partie inférieure de la couche **SD**, le courant électrique remonte ensuite vers la partie supérieure de l'empilement pour rejoindre la piste de métal **PL1**, et circule dans le plan pour rejoindre le contact **CO1**.

Les contacts électriques forment les électrodes d'actionnement du
20 dispositif et sont, de préférence, des contacts ohmiques. Typiquement, ces contacts ohmiques sont des contacts métal-semi-conducteur favorisant le passage d'un courant électrique dans le dispositif avec une résistance de contact aussi faible que possible. Ces contacts ohmiques peuvent être obtenus par dépôt de métal, par exemple du titane, du nickel, de l'aluminium ou de l'or,
25 sur la surface supérieure de la couche **SD**. Après ce dépôt, les contacts sont recuits pour faciliter la diffusion du métal, ce qui permet de diminuer la résistance spécifique de contact.

On remarquera que différentes configurations d'architecture possibles sont permises par l'invention. Outre les dimensions du substrat **Sub**, des
30 couches **Nuc**, **Nit**, **SD**, le positionnement relatif de ces différentes couches, l'architecture des pistes conductrices ou encore les délimitations des parties dopées, le montage électrique connecté au transducteur peut également être

adapté en fonction des applications requises. Pour mesurer une variation de tension ou de courant dans le transducteur, le dispositif peut être relié à différents types de montages électriques, comme un système de mesure comprenant un ampèremètre, un ohmmètre et/ou un voltmètre. Si l'on impose par exemple le passage d'un courant électrique d'une certaine intensité au moyen d'éléments de polarisation, on utilisera un voltmètre comme appareil de mesure pour mesurer les variations de tension produites aux bornes du transducteur lorsque la poutre fléchit. D'autres montages électriques du MEMS sont envisageables selon les applications recherchées, par exemple en tant que pont de Wheatstone.

Les architectures permises pour ces modes de réalisation permettent de produire des dispositifs où l'encombrement en surface de l'élément suspendu **P** n'est pas limité par les dimensions du substrat **Sub**. Dans le cas de MEMS comprenant des éléments suspendus encastrés, l'encombrement latéral est souvent limité en raison de la faible surface disponible sur les faces supérieures de la partie mobile. Les dimensions de la bande conductrice doivent aussi être suffisamment petites pour éviter de produire un court-circuit électrique, ce qui constitue une limitation technique bien connue des transducteurs réalisées dans les MEMS actuels.

La figure 6 illustre une vue en plan d'un troisième mode de réalisation de l'invention. Selon l'invention, la couche **SD** est gravée selon un motif de boucle, une partie significative de la boucle s'étendant sur la partie suspendue **P**. Sur la partie non suspendue, la boucle se termine par deux portions de surface plus importante dans le matériau **SD**, portions sur lesquelles des contact ohmiques **CO1** et **CO2** sont formés.

La figure 7 illustre une vue en plan d'un quatrième mode de réalisation d'un transducteur selon l'invention, où la couche **SD** est discontinue et présente deux parties disjointes qui s'étendent sur la poutre **P**. Le gaz bidimensionnel **2DEG**, dont le contour est représenté en pointillés sur la figure 7, se situe dans la couche **Nit** située sous le plan visible de la couche **SD**. Lorsque le dispositif

est soumis à une différence de potentiel, un courant électrique injecté dans l'électrode **CO1** traverse successivement le prolongement **PL1**, la partie de la couche **SD** sur laquelle s'étend **PL1**, et descend dans le gaz bidimensionnel **2DEG**. Le courant électrique remonte ensuite dans la partie de la couche **SD** sur laquelle s'étend **PL2**, puis traverse **PL2** avant d'atteindre le contact **CO2**. Le courant circule dans ces couches en suivant la géométrie du composant et peut être extrait par les électrodes **CO1** ou **CO2**.

La figure 8 illustre un dispositif microélectromécanique selon un cinquième mode de réalisation de l'invention pour la réalisation d'un transducteur. Selon cet exemple de réalisation, une couche **Nit**, réalisée par exemple en GaN non dopé, superpose un empilement de couches tel que décrit précédemment. L'intégration d'un transducteur qui s'étend sur une poutre mobile **P** et l'intégration d'un transistor à effet de champ sont réalisées à partir d'une même couche semi-conductrice dopée **SD**.

Une couche semi-conductrice dopée **SD1** s'étend en partie sur la poutre **P**. Deux plots **Bias+** et **Bias-** s'étendent sur une surface de ladite couche **SD1**. Lesdits plots **Bias+** et **Bias-** forment des électrodes dudit transducteur, et sont de préférence réalisés sur la partie non libérée du transducteur sur la poutre **P**. Lesdites électrodes permettent le fonctionnement du transducteur à l'aide d'une différence de potentiel qui leur est appliquée.

Selon ce même mode de réalisation, des éléments de couche **SD2** et **SD3** d'un matériau semi-conducteur dopé, en particulier du GaN dopé, s'étendent sur la surface de la couche **Nit**. Un gaz bidimensionnel **2DEG**, se situe dans la couche **Nit** située sous le plan visible des couches **SD2** et **SD3**, et entre **SD2** et **SD3**. Un transistor à effet de champ constitué d'électrodes **S**, **G** et **D** est ainsi réalisé. Lesdites électrodes ne s'étendent pas au-delà du bord **E** sur la poutre **P**. Les électrodes de source **S** et de drain **D** s'étendent sur les éléments de couche disjoints **SD2** et **SD3**. L'électrode de grille **G** du transistor s'étend suivant un ou plusieurs prolongements d'interconnexion **IC**. Cette interconnexion **IC** est une électrode formée d'un métal ou du même matériau

que la couche **SD**, et connecte la grille **G** du transistor au plot **Bias-** métallique du transducteur.

Les couches dopées **SD1**, **SD2** et **SD3** permettent ici à la fois le fonctionnement du transducteur sur la poutre **P** et la formation d'une couche
5 intermédiaire de contact entre le canal de conduction électrique du transistor et les électrodes de source **S** et de drain **D**.

Les modes de réalisation décrits dans la présente invention permettent de concevoir des MEMS caractérisés par des résistances électriques
10 inférieures à 100 ohms par carré. Pour faciliter l'interfaçage du dispositif, il est notamment avantageux de disposer de transistors dont le canal de conduction présente une faible résistance électrique, aussi proche que possible de 50 ohms. Ces gammes de résistances sont particulièrement intéressantes pour le développement de composants capables de fournir une bande passante de
15 mesure électrique élevée, ou encore pour le fonctionnement de transducteurs dans des conditions extrêmes de températures. Cet avantage technique est également d'un intérêt considérable pour l'interfaçage de transducteurs avec d'autres composants électroniques, et ce dans des architectures et des configurations variées de fonctionnement. Finalement, la possibilité de réduire
20 la résistance électrique de tels transducteurs en fonction du taux de dopage des couches présentes de GaN, indépendamment des autres paramètres, réduit avantageusement le bruit thermique généré par ces dispositifs.

REVENDEICATIONS

1. Empilement de couches semi-conductrices comportant :

- 5
- un substrat (Sub);
 - une première couche (Nuc) d'un matériau semi-conducteur, déposée sur ledit substrat ;
 - une deuxième couche (Nit) d'un matériau semi-conducteur, déposée sur ladite première couche ;
- 10
- une troisième couche (SD) d'un matériau semi-conducteur, déposée sur ladite deuxième couche ;
- au moins l'une des première, deuxième et troisième couche étant constituée d'un matériau semi-conducteur piézoélectrique dopé ;
- et ledit empilement étant caractérisé en ce que la première couche et
- 15
- la deuxième couche sont confondues et en ce que la troisième couche est réalisée en GaN dopé.

2. Empilement selon la revendication 1, comportant en outre au

20

moins un élément suspendu (P) formé par des prolongements d'une ou de plusieurs desdites couches s'étendant au-delà d'un bord (E) dudit substrat,

dans lequel ledit élément suspendu est encastré sur une partie de son périmètre au niveau dudit bord, et présente une forme choisie

25

entre :

- une poutre ;
- une membrane ;
- un disque ; ou
- une plaque.

30

3. Empilement selon la revendication 1 ou 2, dans lequel la troisième couche comporte une épaisseur comprise entre 0,05 et 20 microns (μm), préférentiellement 0,1 à 2 microns (μm).

5

4. Empilement selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel au moins une desdites première et/ou deuxième couche est réalisée en un matériau de type III-N, l'élément du groupe III étant choisi parmi Al, Ga, In, B ou tout alliage de ces éléments.

10

5. Empilement selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les éléments utilisés pour le dopage du matériau de au moins l'une des première, deuxième et troisième couche sont choisis parmi Si, Ge, O et Mg.

15

20

6. Empilement selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la troisième couche est caractérisée par une concentration en éléments dopants comprise entre 10^{18} et 10^{21} par cm^3 .

25

7. Empilement selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ladite troisième couche est connectée électriquement à au moins un canal de conduction électrique, ledit canal de conduction électrique s'étendant dans ladite deuxième couche.

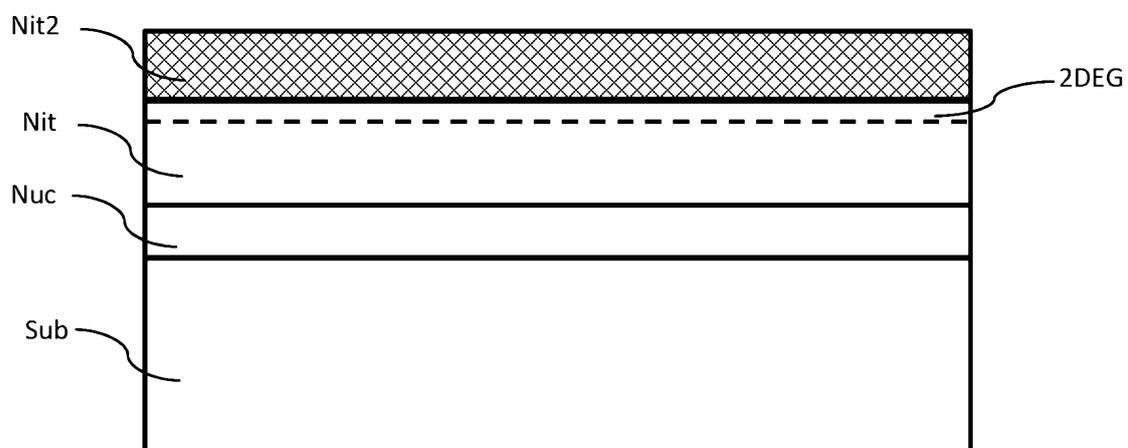
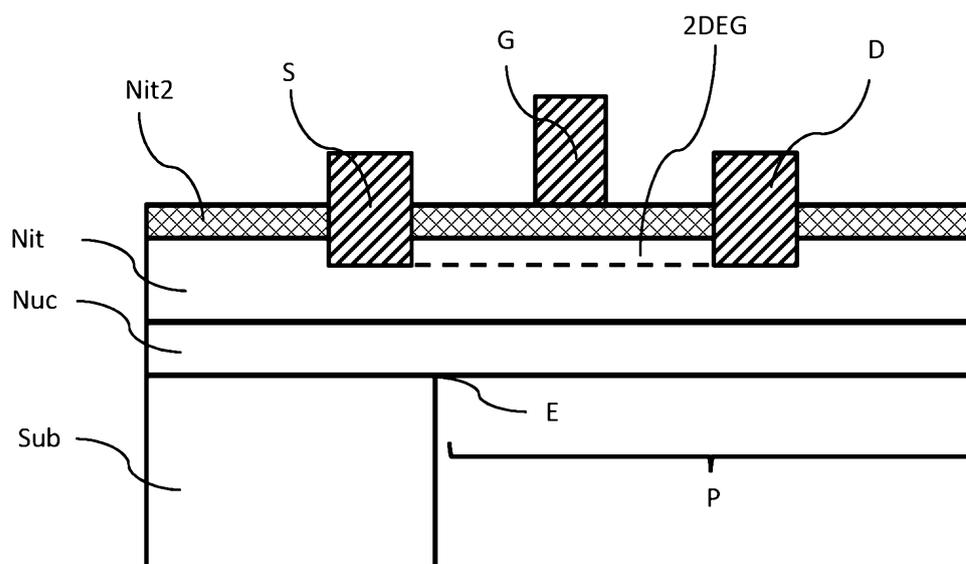
30

- 5 8. Empilement selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ladite deuxième couche comporte une hétérostructure confinant un gaz bidimensionnel de porteurs de charge (2DEG), ledit gaz bidimensionnel formant canal de conduction électrique.
- 10 9. Dispositif microélectromécanique, comportant un empilement de couches semi-conductrices selon l'une quelconque des revendications précédentes, et comprenant en outre au moins deux électrodes, au moins deux desdites électrodes étant connectées à ladite deuxième couche, et/ou à ladite troisième
- 15 couche, et/ou à un gaz bidimensionnel de porteurs de charge.
- 20 10. Dispositif microélectromécanique selon la revendication 8, dans lequel au moins une des électrodes est réalisée en GaN dopé.
- 25 11. Dispositif microélectromécanique selon la revendication 9 ou 10, dans lequel lesdites électrodes (CO1, CO2) s'étendent au moins partiellement sur une surface de ladite troisième couche et/ou de ladite deuxième couche.
- 30 12. Dispositif microélectromécanique selon les revendications 9 à 11, dans lequel chacune desdites électrodes comportent au moins un prolongement qui s'étend à la surface dudit élément suspendu, et est connecté électriquement à la troisième couche.

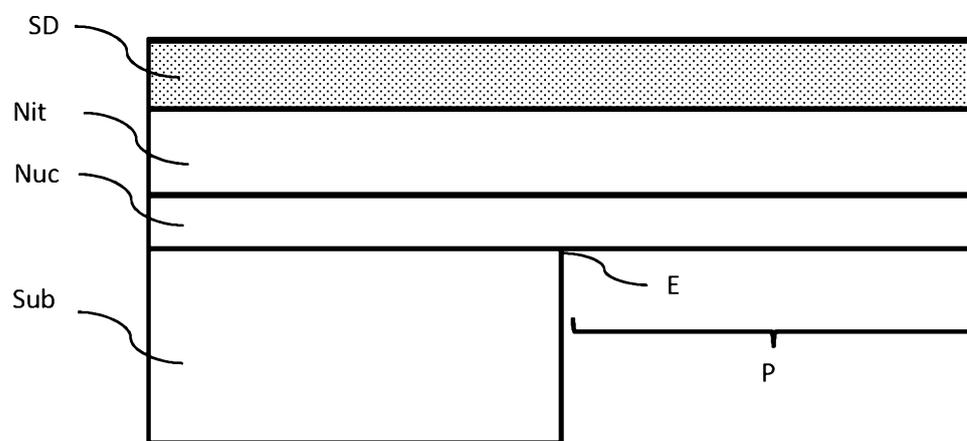
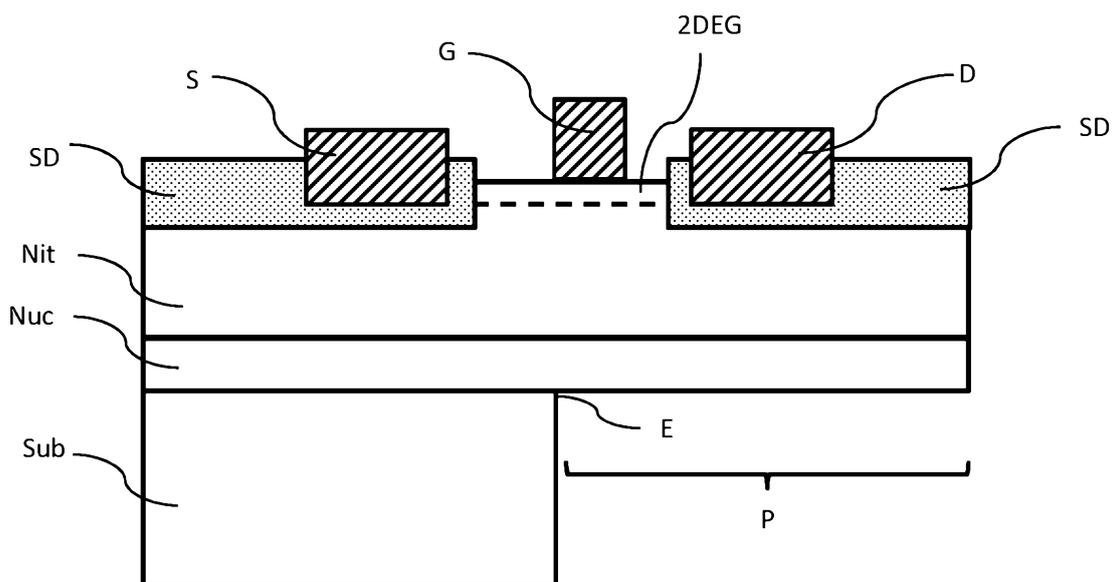
5 13. Dispositif microélectromécanique selon l'une des revendications 9 à 12, dans lequel au moins une desdites électrodes est un contact ohmique, le matériau composant ledit contact ohmique étant choisi parmi du titane, du nickel, de l'aluminium ou de l'or.

10 14. Dispositif microélectromécanique selon l'une des revendications 9 à 13, dans lequel lesdites électrodes forment les contacts (D, S, G) d'un transistor à effet de champ.

1/5

*Fig. 1**Fig. 2*

2/5

*Fig. 3**Fig. 4*

3/5

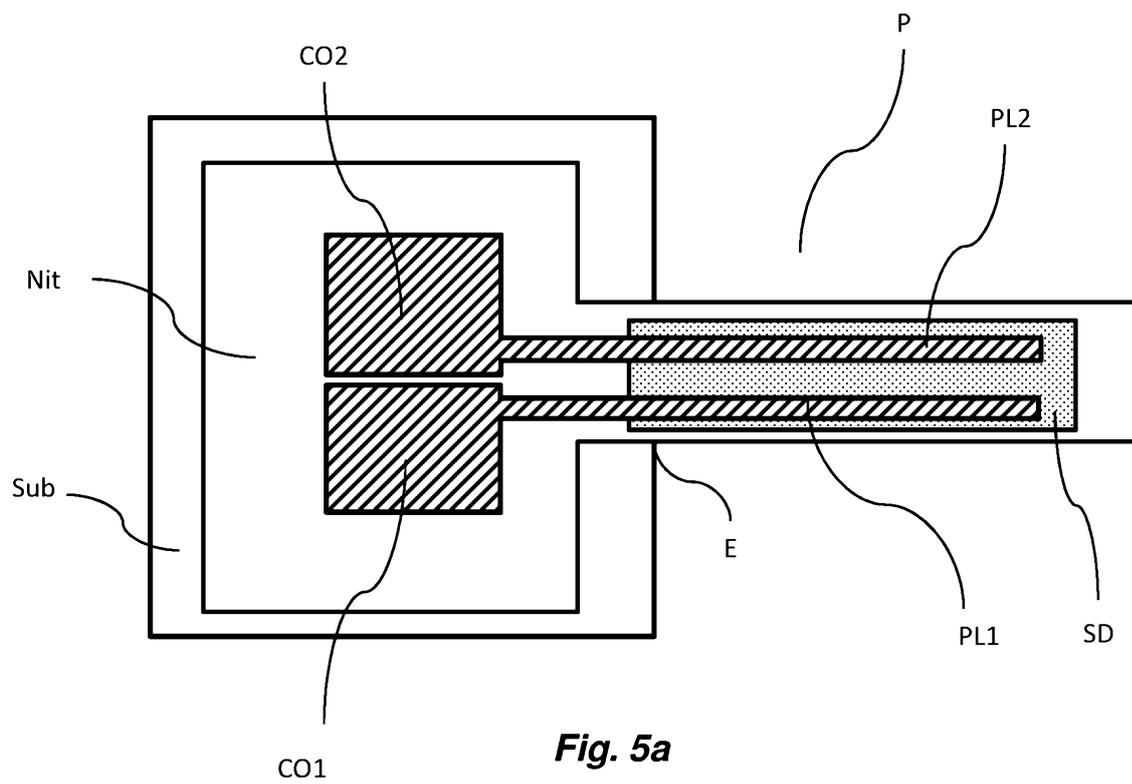


Fig. 5a

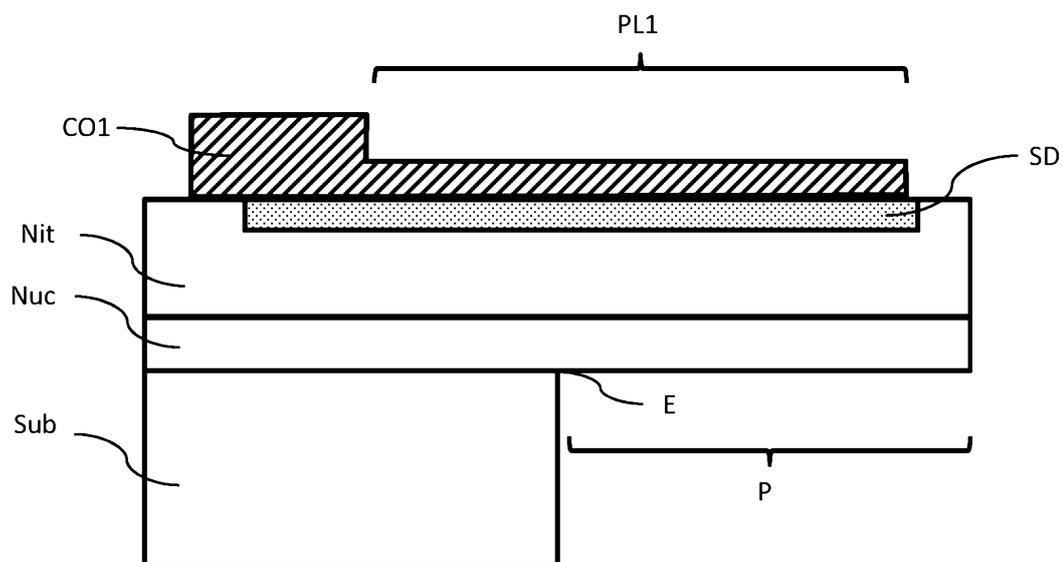


Fig. 5b

4/5

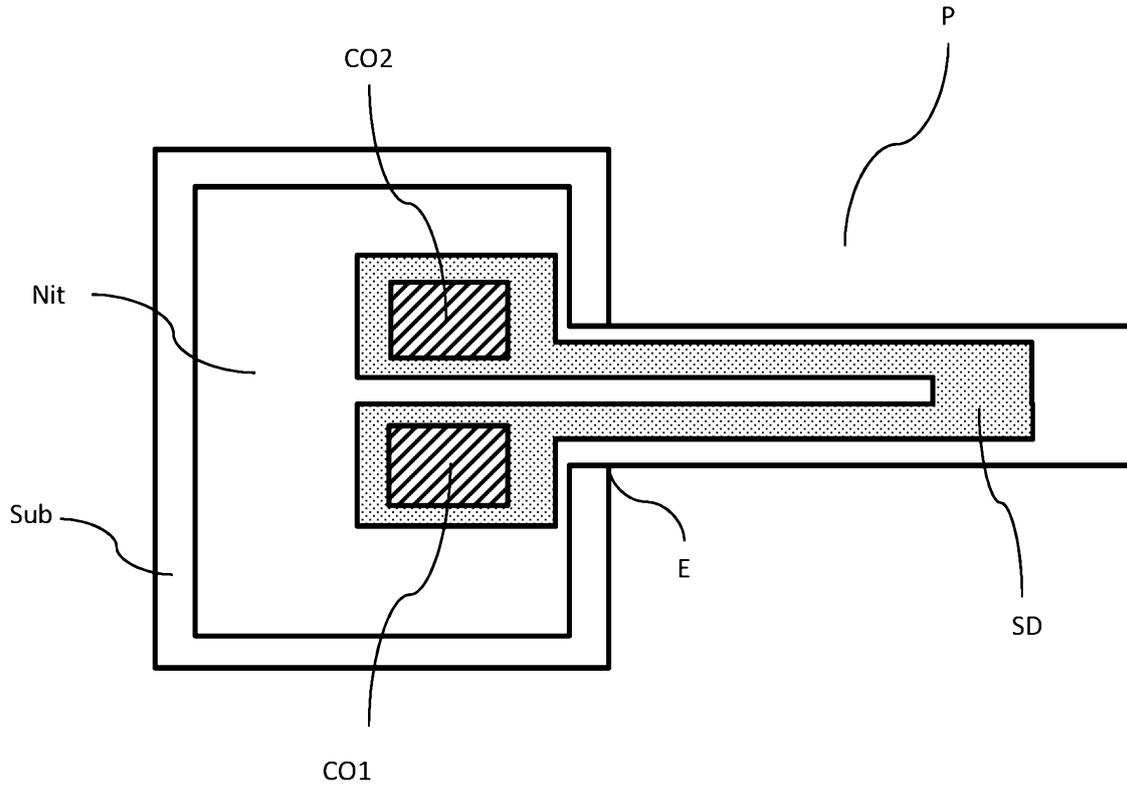


Fig. 6

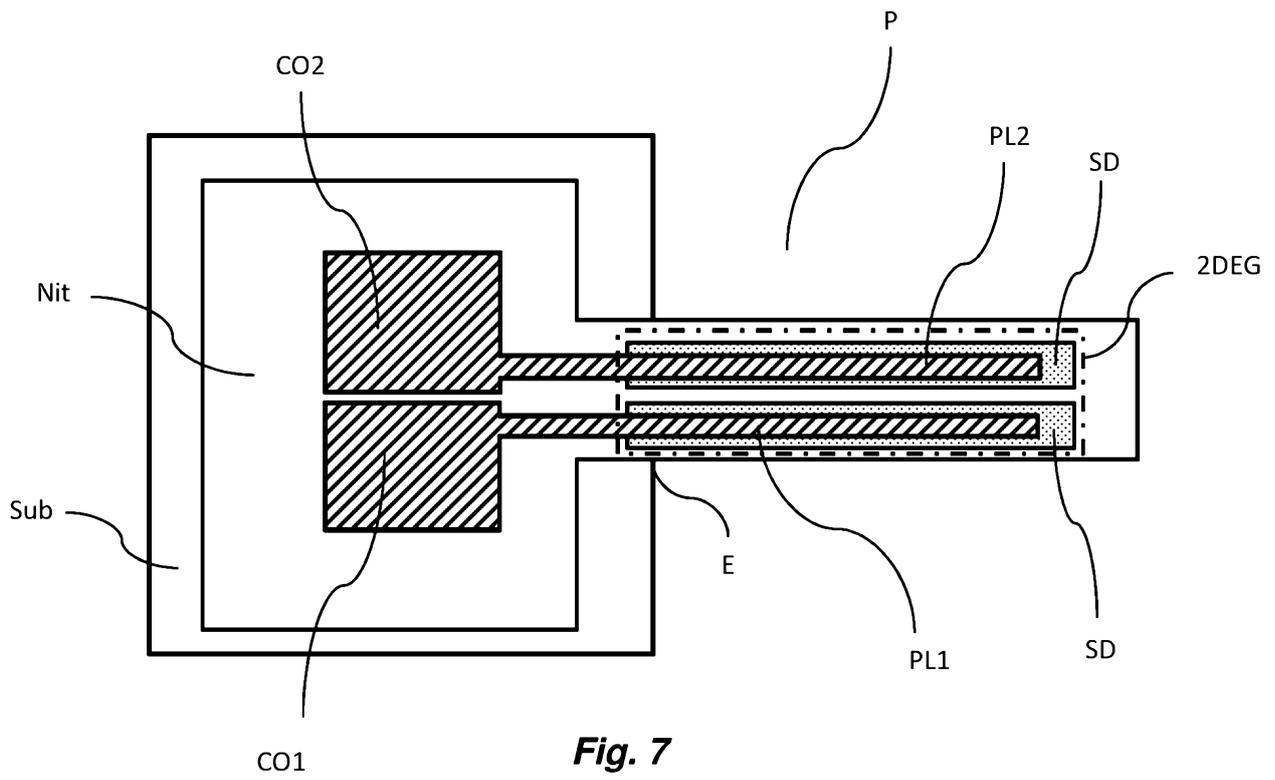
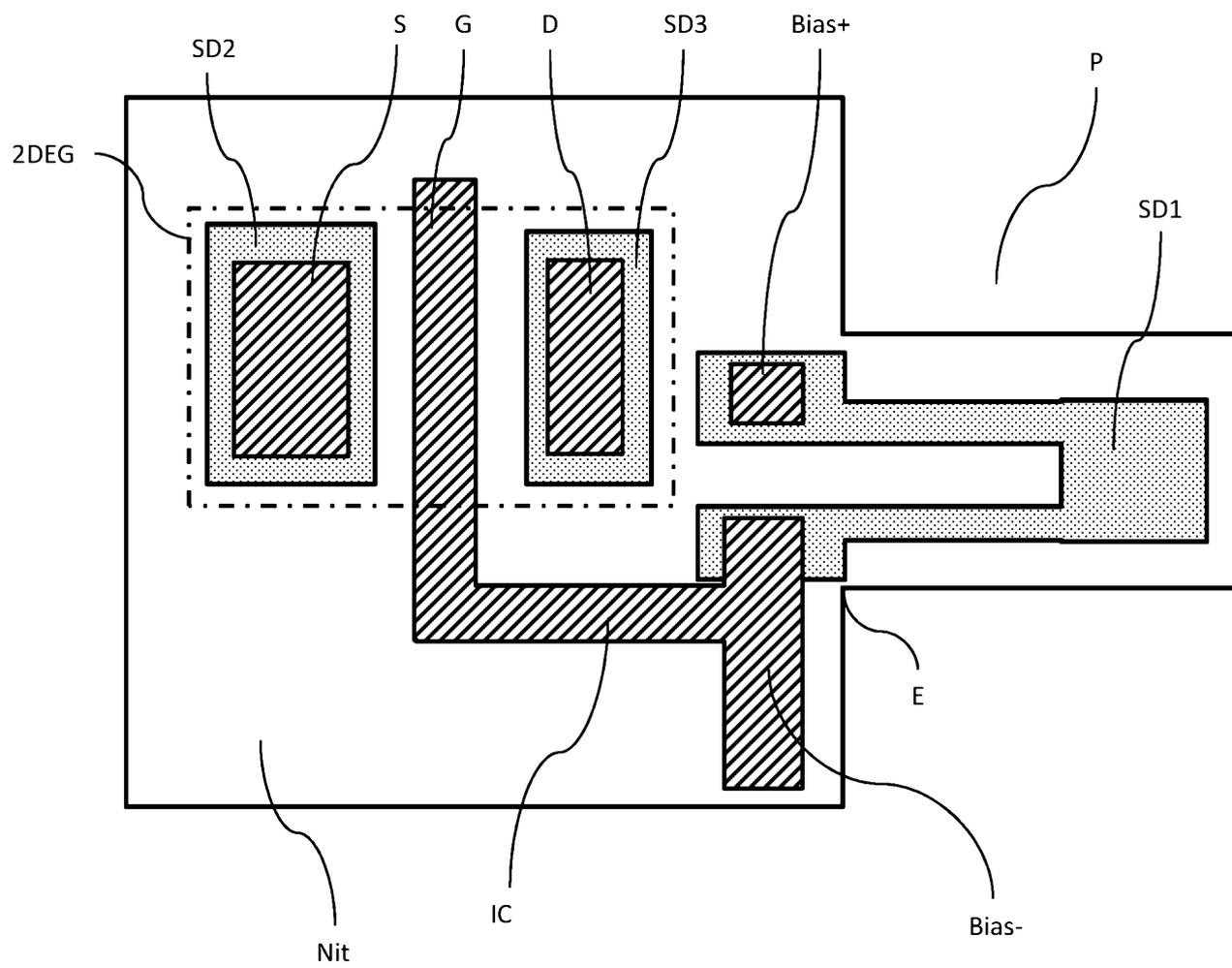


Fig. 7

5/5

**Fig. 8**

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-17 et R.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'ÉTABLISSEMENT DU PRÉSENT 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 CITÉS DANS LE PRÉSENT 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

STRITTMATTER R P ET AL: "GaN Schottky diodes for piezoelectric strain sensing", JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, vol. 93, no. 9, 1 mai 2003 (2003-05-01), pages 5675-5681, XP012059587, ISSN: 0021-8979, DOI: 10.1063/1.1558960

US 2002/066319 A1 (BEACH ROBERT A ET AL)
6 juin 2002 (2002-06-06)

US 2009/174014 A1 (KUNZE MIKE ET AL)
9 juillet 2009 (2009-07-09)

STEINKE I P ET AL: "Current versus voltage characteristics of GaN/AlGaIn/GaN double heterostructures with varying AlGaIn thickness and composition under hydrostatic pressure", JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, vol. 103, no. 6, 064502, 17 mars 2008 (2008-03-17), XP012109643, ISSN: 0021-8979, DOI: 10.1063/1.2844484

US 2011/210378 A1 (UENO MASAKI ET AL)
1 septembre 2011 (2011-09-01)

EGAWA T ET AL: "Recessed gate AlGaIn/GaN modulation-doped field-effect transistors on sapphire", APPLIED PHYSICS LETTERS, vol. 76, no. 1, 3 janvier 2000 (2000-01-03), pages 121-123, XP012024722, ISSN: 0003-6951, DOI: 10.1063/1.125676

US 2014/008658 A1 (SIEMIENIEC RALF ET AL)
9 janvier 2014 (2014-01-09)

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

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