

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

①1 N° de publication : **3 043 251**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : **15 02296**

⑤1 Int Cl⁸ : **H 01 L 29/772 (2017.01)**

①2 **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION**

A1

②2 **Date de dépôt** : 30.10.15.

③0 **Priorité** :

④3 **Date de mise à la disposition du public de la demande** : 05.05.17 Bulletin 17/18.

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

⑥0 **Références à d'autres documents nationaux apparentés** :

○ **Demande(s) d'extension** :

⑦1 **Demandeur(s)** : THALES Société anonyme — FR et COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public — FR.

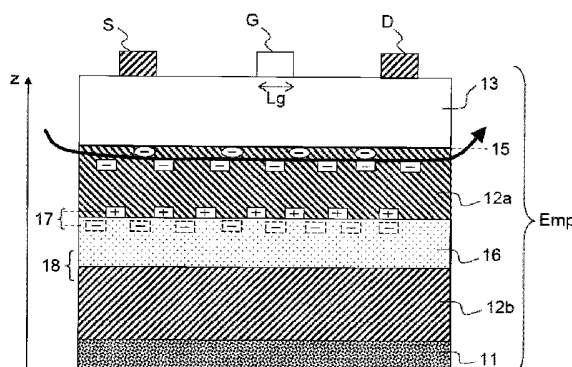
⑦2 **Inventeur(s)** : JACQUET JEAN CLAUDE, GAMARRA PIERO, PIOTROWICZ STEPHANE, LACAM CEDRIC, POISSON MARIE ANTOINETTE et PATARD OLIVIER.

⑦3 **Titulaire(s)** : THALES Société anonyme, COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public.

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

⑤4 **TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP A RENDEMENT ET GAIN OPTIMISE.**

⑤7 L'invention concerne un transistor comprenant un empilement de matériaux semi-conducteurs comprenant notamment une première sous-couche (16), judicieusement disposée et d'épaisseur spécifique, scindant la couche tampon (12) en deux parties (12a; 12b) et comprenant un troisième matériau (Mat3) de sorte que la différence de coefficients de polarisation spontanée et piézoélectrique entre le matériau de la couche tampon et le troisième matériau induit à une première interface (17) entre la première partie de la couche tampon (12a) et la première sous-couche (16) une première charge électrique fixe surfacique générant un champ électrique dirigé selon l'axe z de manière à permettre le confinement du gaz bidimensionnel (9) dans le canal.



FR 3 043 251 - A1



Transistor à effet de champ à rendement et gain optimisé

La présente invention concerne les transistors à effet de champ à haute
5 mobilité électronique dénommés transistors HEMT, acronyme de l'expression anglo-
saxonne « High Electron Mobility Transistor ».

La présente invention concerne, plus particulièrement, les empilements à partir
desquels sont fabriqués les transistors HEMT utilisés comme amplificateur à faible
bruit ou de puissance, comme commutateur ou comme oscillateur et couvrant la
10 gamme de fréquences comprise typiquement entre 1 MHz et 100 GHz.

La figure 1 représente schématiquement une coupe de la structure d'un système de
transistor HEMT élémentaire classique, dans un plan Oxz, réalisé sur un
substrat **11**. Classiquement, on utilise un substrat **11** isolant ou semi-conducteur,
comprenant par exemple du silicium (Si), du Carbure de Silicium (SiC) ou du
15 Saphire (Al_2O_3), sur lequel est réalisé un empilement Emp selon l'axe z d'au moins
deux couches de semi-conducteur qui s'étendent dans le plan Oxy.

Une première couche **12**, dénommée couche tampon, ou plus connue sous le terme
anglo-saxon « buffer », présente une large bande interdite, on parle de matériau
semi-conducteur dit à grand gap comprenant un matériau comprenant un composé
20 binaire tel le GaN ou un composé ternaire de nitrure d'éléments III, dénommé III-N,
tel que l'AlGaN, ou plus précisément l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

Une seconde couche, dénommée couche barrière **13**, présente une bande interdite
plus grande que celle de la couche tampon **12**. Cette couche comprend un matériau
à base de composé quaternaire, ternaire ou binaire de nitrure d'éléments III,
25 dénommé III-N, à base de Al, Ga, In ou B.

Par exemple, avec une couche tampon **12** en GaN, la couche barrière **13** comprend
de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ou de l' $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$, ou une séquence $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{AlN}$ ou $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}$.
Selon la teneur x en aluminium, les largeurs de bandes interdites de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ et
de l' $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ varient de 3,4eV (GaN) à 6,2eV (AlN) et de 0,7eV (InN) à 6,2eV (AlN),
30 respectivement.

L'épaisseur de la couche barrière **13** est typiquement comprise entre 5 nm et 40 nm, l'épaisseur de la couche tampon **12** est typiquement comprise entre 0,2 μm et 3 μm .

Des couches supplémentaires peuvent être présentes soit en surface, soit entre la couche tampon **12** et la couche barrière **13**.

- 5 La couche tampon **12** et la couche barrière **13** sont classiquement réalisées par MOVPE, acronyme de « Metalorganic Vapor Phase Epitaxy », en langue anglaise, ou épitaxie en phase vapeur aux organometalliques, en langue française, ou par MBE acronyme de « Molecular Beam Epitaxy », en langue anglaise, ou épitaxie par jet moléculaire, en langue française. A titre d'exemple, on peut citer une couche
- 10 tampon **12** à base de GaN avec une couche barrière **13** à base d'AlGaN ou d'InAlN, et plus précisément à base d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ou d' $\text{In}_z\text{Al}_{1-z}\text{N}$, avec x compris typiquement entre 15% et 35%, et, z compris typiquement entre 15% et 25%.

- La jonction entre la couche tampon **12** et la couche barrière **13** constitue une hétérojonction **15** qui s'étend également dans le plan Oxy. L'origine O du repère
- 15 Oxyz est choisie dans ce plan.

Un transistor HEMT comprend classiquement une source **S**, un drain **D** et une grille **G** déposés sur la face supérieure **14** de la couche barrière **13**.

La grille **G** est déposée entre la source **S** et le drain **D** et permet de commander le transistor.

- 20 Le courant entre la source **S** et le drain **D** est modulé par l'action électrostatique de la grille **G**, classiquement de type Schottky ou de type MIS, acronyme de métal/isolant/semi-conducteur, sur le gaz bidimensionnel d'électrons **9**, dénommé 2DEG pour «Two-Dimensional Electron Gas» localisé au voisinage de l'hétérojonction **15**. La tension V_{GS} appliquée entre la grille **G** et la source **S**
- 25 commande le courant circulant dans le transistor.

- Ces électrons sont mobiles dans le plan Oxy et ont une forte mobilité électronique μ_e , typiquement supérieure à 1000 cm^2/Vs . Dans un fonctionnement normal du transistor ces électrons ne peuvent pas circuler dans la direction z car ils sont confinés dans le puits de potentiel se formant dans le plan Oxy au voisinage de
- 30 l'hétérojonction **15**. Le gaz d'électrons **9**, confiné dans ce qui est dénommé le canal du transistor, est donc apte à transporter un courant I_{DS} circulant entre le drain **D** et

la source **S**. Classiquement, une différence de potentiel V_{DS} est appliquée entre la source **S** et le drain **D**, avec typiquement une source **S** reliée à la masse, et la valeur du courant I_{DS} est une fonction de la tension appliquée V_{GS} entre la grille **G** et la source **S**.

- 5 On définit la transconductance g_m d'un transistor comme le rapport entre le courant I_{DS} et la tension V_{GS} . En d'autres termes, la transconductance traduit la variation du courant de drain en fonction de la polarisation de la grille V_{GS} , à V_{DS} constant.

Le gain du transistor est relié à sa transconductance. Ce gain sera d'autant plus élevé que sa transconductance g_m sera grande permettant de transformer un faible
10 signal appliqué sur la grille **G** en un signal plus fort récupéré sur le drain **D**.

La figure 2 représente la répartition des charges au voisinage de l'hétérojonction 15. Les matériaux de la famille des III-N sont fortement électronégatifs. Lorsque l'on met en contact deux composés différents de cette famille des charges électriques fixes positive $\sigma+$ ou négative $\sigma-$ de nature piézoélectrique apparaissent au niveau de
15 l'interface tel que représentée sur la figure 2. La charge électrique fixe surfacique résultante attire des charges mobiles : électrons lorsqu'elle est positive telle que dans la figure 2 ou trous lorsqu'elle est négative. Ce sont ces charges mobiles em qui créent un courant lorsqu'une tension est appliquée entre le drain **D** et la source **S**.

20 Le GaN est un semi-conducteur qui, dans les conditions de croissance habituelles, est dopé en impuretés de type donneur (N), typiquement des lacunes d'azote. Ce type de défauts ne permet pas d'obtenir un confinement efficace des électrons dans le canal lorsque la tension appliquée sur le drain du transistor devient trop grande, typiquement supérieure à 10 V, et lorsque la longueur de la grille L_g devient trop
25 courte, typiquement inférieure à 0,25 μm . Les électrons circulent alors dans la couche tampon 12, ce qui provoque :

- une diminution de la transconductance g_m et donc du gain du transistor, (région 1 de la figure 3),
- une augmentation, dans la zone exponentielle de la caractéristique de transfert
30 (région 2 de la figure 3) de l'inverse de la pente sous le seuil SS (SS pour "Subthreshold Swing", $SS = n (k_b T / q) \log(10)$). Cette grandeur s'exprime en

mV/décade et correspond à la variation de la tension de grille nécessaire pour augmenter le courant d'une décade. A température ambiante et dans le cas idéal où $n = 1$, elle vaut 60mV/décade. La dégradation de cette grandeur entraîne une moins bonne capacité du composant à commuter un courant.

- 5 - une augmentation du courant de fuite et donc une diminution du rendement du transistor (région 3 de la figure 3).

Un confinement inefficace se répercute donc directement sur les performances du transistor, comme on peut l'observer sur la figure 3.

10 La figure 3 est une représentation graphique de $\text{Log}(I_{DS}) = f(V_{GS})$ pour un transistor présentant un bon et un mauvais confinement des électrons.

On peut y définir 3 régions.

- La région 1 sur laquelle on définit la transconductance g_m et sur laquelle la représentation graphique de I_{DS} en fonction de V_{GS} associée à la courbe $\text{Log}(I_{DS}) = f(V_{GS})$ présente une portion sensiblement linéaire.
- 15 - La région 2 correspond à la zone préférentiellement utilisée pour les applications de commutation, et, notamment la zone sur laquelle on définit la caractéristique de transfert d'un transistor. On y définit l'inverse de la pente sous le seuil **SS**.
- La région 3 correspond à une zone asymptotique dans laquelle on peut y
- 20 définir le courant de fuite.

La courbe **31** de la figure 3 correspond à la représentation graphique $\text{Log}(I_{DS}) = f(V_{GS})$ d'un transistor présentant un bon confinement des électrons dans le canal. A V_{DS} constant élevé, par exemple 20V, et pour une grille courte inférieure à $0,25\mu\text{m}$, par exemple. La courbe **31** présente une transconductance g_m élevée, l'inverse de

25 la pente sous le seuil **SS** proche de sa valeur idéale de 60mV/décade à température ambiante et un faible courant de fuite, typiquement inférieur à $100\mu\text{A}/\text{mm}$.

La courbe **32** de la figure 3 correspond à la représentation graphique $\text{Log}(I_{DS}) = f(V_{GS})$ d'un transistor présentant un mauvais confinement des électrons dans le canal.

30 Pour obtenir un bon confinement des électrons dans le canal et obtenir un bon fonctionnement du transistor en termes de gain, de l'inverse de la pente sous le

seuil **SS** et de rendement électrique, il est nécessaire de compenser le dopage N initial.

5 Une première solution est de doper P le « buffer » comprenant du GaN ou de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en introduisant des impuretés de type accepteur, par exemple par modification des conditions d'épitaxie ou par l'ajout d'impuretés de type accepteur lors de la croissance de la couche.

10 La densité d'impuretés introduite dans l'entièreté de la couche tampon **12** « buffer » est optimisée pour obtenir le comportement transistor souhaité. Les impuretés compatibles sont principalement le carbone et le fer mais peuvent aussi être du magnésium, du béryllium ou du zinc ou toutes impuretés connues pour être un centre accepteur dans le GaN. Typiquement, un excès en impuretés de type P par rapport aux impuretés de type N de 10^{16} cm^{-3} à 10^{17} cm^{-3} permet de maintenir l'inverse de la pente sous le seuil à une valeur inférieure à 150mV/décade pour une tension de fonctionnement maximale V_{DS} de 50V et une longueur de grille L_g de 15 0,15 μm . Ces impuretés constituent cependant des centres profonds.

On appelle centre profond une impureté dont le niveau d'énergie est situé à plus de 2 à 3 fois l'énergie d'activation thermique ($3/2 k_b \cdot T$) du minimum de la bande de conduction pour une impureté de type N ou du maximum de la bande de valence pour une impureté de type P. A température ambiante, l'énergie d'activation 20 thermique est de l'ordre de 40 meV.

Un centre sera donc considéré comme profond lorsqu'il sera situé à plus de 100 meV de l'un de ces extrema, ce qui est le cas pour le GaN dopé en impureté de type accepteur. Ces centres se chargent négativement lorsque le transistor est mis sous tension et comme ils sont profonds ne se déchargent pas aux fréquences de 25 fonctionnement supérieures au MégaHertz. Cela a pour effet de réduire la charge mobile présente dans le canal conducteur, ce qui réduit le courant et augmente la résistance d'accès. Il s'ensuit que cette approche a pour principal inconvénient en sus de générer de la dispersion, de réduire le rendement du transistor et la puissance qu'il peut émettre. Cette dégradation des performances est d'autant plus 30 prononcée que la tension V_{DS} de fonctionnement du transistor est élevée, typiquement supérieure à 20 V.

Cette diminution de la charge mobile, dénommée «current collapse» en langue anglaise, est illustrée à la figure 4. Dans cet exemple, la couche tampon du transistor en GaN est dopée P uniformément à une valeur de $5 \cdot 10^{17}$ atomes / cm^3 .

La courbe 40 illustre une caractéristique courant/tension d'un transistor réalisée à $V_{GS} = 0V$ qui n'a pas été mis sous tension préalablement à l'établissement de la caractéristique.

La courbe 41 illustre une caractéristique courant/tension du transistor réalisée à $V_{GS} = 0V$ qui a subi une contrainte sous la forme d'une tension $V_{GS} = -6V$ et $V_{DS} = 40V$, préalablement à l'établissement de la caractéristique.

On constate que sur la courbe 41, I_{DS} en fonction de V_{DS} est modifiée par rapport à la courbe 40 initiale, la caractéristique courant/tension est dégradée. Sur cet exemple, une variation relative de 60% du courant I_{DS} et donc de la puissance disponible à une tension V_{DS} de 5V est observée.

Une deuxième solution est de réaliser un buffer composite GaN / $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ par exemple, tel qu'illustré sur la figure 5, avec le canal en GaN.

Dans ce cas, la charge piézoélectrique négative apparaissant à l'interface 50 GaN / $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ crée une barrière de potentiel permettant de confiner les électrons dans le canal. Quelques pourcents d'aluminium dans la couche d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, typiquement 3% à 10%, sont nécessaires pour obtenir un bon confinement des électrons pour une tension de fonctionnement maximale comprise entre 20V et 40V et une longueur de grille inférieure à 0,25 μm .

Cependant la conductivité thermique de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ est inférieure à celle du GaN d'un facteur compris entre 3 et 5 pour les taux d'aluminium nécessaires à un bon confinement des électrons.

La résistance thermique du transistor est ainsi fortement dégradée, multipliée par 2 à 3, et la puissance pouvant être émise réduite d'un facteur 1,5 à 3 selon les applications visées avec cette solution.

Une troisième solution consiste à introduire dans la couche tampon la charge électrique négative fixe qui est juste nécessaire à l'obtention de bonnes caractéristiques de transfert aux tensions et aux fréquences de fonctionnement souhaitées. Le contrôle de la quantité de charges et de leur position par rapport au

gaz 9 d'électrons permet d'obtenir un bon confinement des électrons dans le canal sans créer de phénomènes de piégeage indésirables qui entraînent une dégradation de la linéarité ou, en d'autres termes, des effets dispersifs et une diminution de la puissance disponible et du rendement, sans dégrader la
 5 conductivité thermique du « buffer » par exemple en GaN.

La figure 6 illustre un empilement 10 pour transistor à effet de champ à haute mobilité électronique (HEMT) selon cette troisième solution de l'art antérieur. L'empilement 10 est réalisé à partir d'un substrat 11 classique pour ce type de composant.

10 L'empilement 10 comprend une pluralité de couches selon un plan xy perpendiculaire à un axe z.

L'empilement 10 comprend une couche tampon 12 comprenant un premier matériau semi-conducteur dit « grand gap » tel que l'AlGa_xN, et plus précisément, de l'Al_xGa_{1-x}N, avec x compris typiquement entre 0 et 35%. La couche tampon 12
 15 l'empilement comprend une zone Vf comprenant des charges négatives fixes localisées à un endroit spécifique de la couche tampon 12.

On entend par charges négatives fixes des charges non mobiles (charges mobiles dans ce contexte signifient électrons ou trous), le terme mobile étant entendu au sens habituel dans le domaine de la physique des semi-conducteurs.

20 La zone Vf s'étendant selon le plan xy est située à une distance d de l'hétérojonction et présente une épaisseur t.

La figure 7 décrit, plus précisément, la répartition et la nature des charges dans l'empilement. Le caractère fixe d'une charge est symbolisé par un sigle de forme rectangulaire entourant cette charge, tandis que le caractère mobile est symbolisé
 25 par un sigle de forme ovale. Comme décrit plus haut, du fait d'un effet piézo-électrique, une densité surfacique σ^+ de charges positives fixes 71 est présente au voisinage de l'hétérojonction 15, et des charges négatives mobiles em également situées à proximité de l'hétérojonction 15 constituent le gaz bidimensionnel d'électrons 9 à l'origine du fonctionnement du transistor HEMT. La densité
 30 surfacique d'électrons em dans le canal est typiquement d'environ $0,5 \times 10^{13}$ à 3×10^{13} cm⁻².

Le profil de charge qu'il faut réaliser (localisation et dosage des charges négatives) pour obtenir un bon confinement des électrons, dépend de la tension de fonctionnement, de la longueur de grille et de la densité d'électrons dans le canal du transistor. Autrement dit, pour chaque tension V_{DS} de fonctionnement du transistor,
5 la longueur de grille, la densité d'électrons et le profil de charge fixe doivent être optimisés.

Les charges électriques négatives fixes volumiques **70** localisées dans la couche tampon **12** sont obtenues à partir d'impuretés de type accepteur A introduites dans la couche tampon **12**, telles que des atomes de carbone, de fer, de magnésium ou
10 tout type d'impuretés connues pour être un centre accepteur dans le GaN ou l'AlGaN.

Un but de l'invention est notamment de proposer un transistor destiné à des applications de commutation rapide (modulation d'enveloppe), d'amplification de signal hyperfréquence de puissance présentant une bonne conductivité thermique
15 et dont la configuration de la couche tampon est indépendante des conditions d'utilisation.

Selon un aspect de l'invention, il est proposé un transistor à effet de champ comprenant un empilement selon un axe z comprenant :

- une couche barrière comprenant un premier matériau semi-conducteur,
- 20 - une hétérojonction entre ladite couche barrière et une couche tampon,
- un gaz bidimensionnel localisé dans un canal situé dans un plan xy perpendiculaire à l'axe z et au voisinage de l'hétérojonction,
- la couche tampon comprenant un deuxième matériau semi-conducteur comprenant un composé binaire ou ternaire ou quaternaire de nitrure,
- 25 caractérisé en ce que l'empilement comprend en outre une première sous-couche scindant la couche tampon en deux parties et comprenant un troisième matériau comprenant un composé binaire ou ternaire ou quaternaire de nitrure, de sorte que la différence de coefficients de polarisation spontanée et piézoélectrique entre le deuxième matériau et le troisième matériau induit à une première interface entre la
- 30 première partie de la couche tampon et la première sous-couche, une première charge électrique fixe surfacique générant un champ électrique dirigé selon l'axe z et orienté vers la première interface de manière à permettre le confinement du gaz

bidimensionnel dans le canal, la distance entre l'hétérojonction et la première interface située entre la première partie de la couche tampon et la première sous-couche étant comprise entre un tiers de la longueur de la grille selon la direction Ox perpendiculaire à la direction de l'empilement Oz du transistor et deux longueurs de grille, l'épaisseur de la première sous-couche selon l'axe z étant inférieure à une valeur seuil. Avantageusement, la valeur seuil de l'épaisseur est de 20 nm.

Ce profil d'empilement Emp permet un meilleur confinement des charges mobiles dans le canal.

Avantageusement, le gaz bidimensionnel est un gaz d'électrons, la charge électrique fixe surfacique induite à la première interface entre la première partie de la couche tampon et la première sous-couche étant négative générant ainsi un champ électrique orienté vers la première sous-couche qui confine les électrons dans le canal.

Avantageusement, le deuxième matériau est de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ avec $x=0\%$.

Avantageusement, la première sous-couche comprend de l' $\text{Al}_{x_1}\text{Ga}_{(1-x_1)}\text{N}$, x_1 étant supérieur à $x+15\%$, x étant la teneur en aluminium de la couche tampon et x_1 étant la teneur en aluminium de cette première sous-couche.

Avantageusement, la couche tampon comprend en outre une deuxième sous-couche située entre la première sous-couche et la deuxième partie de la couche tampon, la deuxième sous-couche comprenant de l' $\text{Al}_{x_2}\text{Ga}_{(1-x_2)}\text{N}$, et x_2 étant inférieur ou égal à $x+15\%$ et supérieur ou égal à x , x étant la teneur en aluminium de la couche tampon et x_2 étant la teneur en aluminium de cette deuxième sous-couche, présentant un excès de charges électriques fixes négatives au niveau d'une deuxième interface à partir de l'hétérojonction entre la première et la deuxième sous-couche, une deuxième charge électrique fixe surfacique positive et inférieure, en valeur absolue, à la première charge électrique fixe surfacique de la première interface.

Avantageusement, l'épaisseur de la deuxième sous-couche selon la direction de l'empilement est supérieure ou égale à 100 nm.

Avantageusement, la deuxième sous-couche d'AlGa₂N présente un gradient de concentration en aluminium croissant selon la direction de l'empilement et orienté vers l'hétérojonction, la concentration en aluminium x_2 à l'interface entre les sous-couches **19** et **12b** étant comprise entre x et $x+15\%$.

- 5 L'association d'une deuxième sous-couche comprenant de l'AlGa₂N permet notamment d'éviter la formation d'un gaz d'électrons au voisinage de la deuxième interface entre la première sous-couche et la deuxième partie de la couche tampon.

Le gradient de concentration en aluminium permet de limiter la dégradation de la résistance thermique du transistor généré par l'ajout de la deuxième sous-couche.

- 10 Avantageusement, la deuxième sous-couche comprend en outre des impuretés de type accepteur de manière à compenser le dopage de type N induit par le gradient de concentration en aluminium de la deuxième sous-couche.

- Avantageusement, les impuretés de type accepteur introduites dans la deuxième sous-couche sont du carbone ou du fer, du béryllium ou du magnésium ou de
15 béryllium ou tout type d'impuretés connues pour être un centre accepteur dans le GaN ou l'AlGa₂N.

- Une localisation appropriée d'une fine couche de matériau générant une interface chargée négativement, ou, en d'autres termes, dont la somme des charges environnantes est négative, permet le confinement de charges électriques négatives
20 mobiles dans le canal du transistor.

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

- la figure 1 déjà citée représente schématiquement une coupe de la structure d'un
25 transistor HEMT classique,
- la figure 2 déjà citée représente la répartition des charges au voisinage de l'hétérojonction du transistor HEMT classique,

- la figure 3 déjà citée représente schématiquement les courbes caractéristiques courant/tension d'un transistor HEMT présentant un bon et un mauvais « pincement »,
- la figure 4 déjà citée illustre schématiquement le comportement d'un transistor HEMT, selon l'art connu, présentant une dispersion en courant,
- la figure 5 déjà citée illustre schématiquement un empilement d'un transistor, selon l'art connu, présentant une couche tampon composite,
- la figure 6 déjà citée illustre un empilement pour transistor à effet de champ selon un art antérieur,
- 10 - la figure 7 déjà citée décrit plus précisément la structure des charges dans l'empilement selon un art antérieur,
- la figure 8 représente la répartition des charges au sein d'un cristal de GaN,
- la figure 9 illustre deux structures cristallines de type wurtzite du GaN,
- la figure 10 illustre un transistor, selon un aspect de l'invention,
- 15 - la figure 11 représente un transistor selon un autre aspect de l'invention,
- la figure 12 illustre un exemple de profil du pourcentage d'aluminium dans l'AlGaN de l'empilement, selon l'invention. Trois variantes de profil de concentration d'aluminium de la couche 19 sont représentées (la concentration en aluminium à l'interface entre les sous-couches 16 et 19 étant supérieure ou égale à la concentration en aluminium à l'interface entre les sous-couches 19 et 12b),
- 20 - la figure 13 représente les caractéristiques courant-tension simulées $\text{Log}(I_{DS})=f(V_{GS})$ de transistors HEMTs selon l'invention pour différents teneurs en aluminium de la première sous-couche.

Le principe de l'invention consiste au confinement des charges mobiles circulant dans le canal en se basant sur les propriétés intrinsèques aux matériaux de l'empilement et non pas sur l'ajout de charges fixes (sous forme d'impuretés) dépendantes des conditions d'utilisation du transistor.

Dans un solide, les effets de polarisation apparaissent lorsque les atomes d'un cristal forment des dipôles qui s'orientent partiellement ou complètement sous l'action d'un champ électrique ou non.

5 Dans les matériaux semi-conducteurs binaires, ternaires ou quaternaires, en raison de la présence d'atomes de nature différente ayant une électronégativité différente, des molécules asymétriques se forment en créant des moments dipolaires permanents. Les semi-conducteurs sont facilement sujets à ces effets de polarisation.

10 Les charges de polarisation résultent de deux mécanismes: la polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique.

La polarisation spontanée résulte des différences d'électronégativité des différents atomes en contact et la polarisation piézoélectrique résulte des contraintes mécaniques.

15 On entend par polarisation spontanée la polarisation d'une molécule, non soumise à un champ électrique, basée sur les différences d'électronégativité des atomes qui composent la molécule. En l'espèce, l'invention se base sur l'exploitation de ces 2 polarisations (spontanée et piézoélectrique) qui sont propres à cette famille de matériaux (famille des III-N : association d'éléments de la colonne III du tableau de Mendeleïev et d'azote par exemple BN, GaN, AlN, InN, pour les composés binaires, 20 AlGa_nN, InAlN, InGa_nN, BGa_nN pour les composés ternaires, InGaAlN pour les composés quaternaires par exemple).

La figure 8 illustre la répartition des charges au sein d'un cristal de GaN.

25 Les atomes de gallium étant moins électronégatifs que ceux d'azote, respectivement 1,6 eV et 3 eV, les électrons des liaisons covalentes entre ces atomes ont une probabilité plus grande d'être plus proche des atomes d'azote. Ainsi, la charge négative apparaît autour de ces atomes et une charge positive autour des atomes de gallium. La répartition finale des charges au sein d'un cristal résulte de la sommation des différentes contributions $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3, \vec{P}_4$. La résultante des polarisations $\vec{P}_2, \vec{P}_3, \vec{P}_4$ notée \vec{P}_r , s'oppose à \vec{P}_1 . Des calculs ont montré que

la contribution de \vec{P}_1 , est supérieure à la contribution résultante \vec{P}_r , et donc la polarisation spontanée finale, est dans la même direction et le même sens que \vec{P}_1 .

Dans le cas où la liaison orientée Ga-N (direction cristallographique [0001]) pointe vers la surface on parle de polarité Gallium ou face Ga, dans le cas contraire on parle de polarité Azote ou face N.

Dans une structure wurtzite face-N une charge positive se trouve en surface et une charge négative et de même grandeur se forme du côté du substrat. La répartition des charges est inversée dans le cas d'une structure wurtzite face-Ga, comme cela est représenté sur la figure 9.

L'électronégativité des atomes d'aluminium étant inférieure à celle des atomes d'azote, le sens et la direction du champ électrique résultant de la polarisation spontanée sont identiques dans la couche AlGaN et dans la couche de GaN.

La figure 10 représente un transistor comprenant un empilement, selon un aspect de l'invention.

L'empilement **10** comprend un substrat **11**, il comprend également une couche barrière **13** comprenant un premier matériau semi-conducteur comprenant un composé binaire, tel que l'AlN, ou ternaire tels que l'AlGaN ou de l'InAlN, et plus précisément, de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ou de l' $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{N}$ avec x compris typiquement entre 15% et 35%, ou quaternaire de nitrure BAIGaN ou de l'InGaAlN.

L'empilement **10** présente une hétérojonction **15** entre la couche tampon **12** et la couche barrière **13** et un gaz bidimensionnel d'électrons **9** localisé dans un plan xy perpendiculaire à l'axe z et au voisinage de l'hétérojonction **15**, selon la structure classique d'un empilement pour transistor HEMT.

La couche tampon **12** comprend en outre une première sous-couche **16**, séparant la couche tampon **12** en deux parties **12a** et **12b**. La première sous-couche **16** est située à une distance comprise entre un tiers de la longueur de la grille L_g et deux fois la longueur de la grille L_g . Autrement dit, l'épaisseur de la première partie **12a** de la couche tampon **12a** est comprise entre un tiers de la longueur de la grille L_g et deux fois la longueur de la grille L_g du transistor.

En l'espèce, la couche tampon **12** comprend du nitrure de gallium GaN face-Ga et, la première sous-couche **16** comprend de l' $\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1}\text{N}$, la teneur $x1$ en aluminium étant supérieure à $x+15\%$, l'épaisseur t de la première sous-couche **16** selon la direction de l'empilement **10** étant inférieure à 20 nm. D'autres matériaux pourraient être envisagés. Toutefois, le nitrure de gallium-indium InGaN, souvent cité, n'est pas un bon candidat. En effet, il est difficile de faire croître de l'InGaN comprenant plus de quelques pourcents d'indium avec une qualité cristalline satisfaisante. De plus, la croissance de l'InGaN est réalisée à une température qui est 200°C plus basse que celle nécessaire à la croissance du GaN. Aussi, il est difficile par la suite de faire croître sur une couche d'InGaN un composé tel que le GaN avec une bonne qualité cristalline sans dégrader la qualité de la couche d'InGaN.

Dans la solution proposée dans ce brevet les températures de croissance des différents matériaux sont assez proches pour permettre l'élaboration des différentes couches de l'empilement avec une qualité cristalline suffisante.

Du fait des différences de polarisation entre les couches **12a** et **16**, il apparaît une première charge électrique négative fixe surfacique à l'interface **17** située entre la première partie de la couche tampon **12a** et la première sous-couche **16**. Autrement dit, une charge électrique négative apparaît à l'interface **17** et non dans le volume de la première sous-couche **16** ou dans la première partie de la couche tampon **12a**.

Cette solution permet notamment de limiter la dégradation thermique du transistor à une valeur inférieure à 2°C/mm/W et ne génère pas de dispersion fréquentielle de la transconductance (due à l'utilisation dans l'état de l'art antérieur de centres profonds pour introduire des charges négatives dans la couche tampon **12**).

Le gaz bidimensionnel 9 d'électrons est alors confiné dans le canal, les charges mobiles ne se répandent pas à l'intérieur de la première partie de la couche tampon **12a**.

On entend par canal une couche d'une épaisseur inférieure à 10nm environ située en surface de la couche tampon **12** au voisinage de l'hétérojonction **15**.

La faible épaisseur d' $\text{Al}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1}\text{N}$ de la première sous-couche **16** limite l'augmentation de la résistance thermique du transistor à une valeur inférieure à $2^\circ\text{C}/\text{mm}/\text{W}$.

Par ailleurs, pour éviter qu'un autre gaz d'électrons ne se forme à la deuxième interface **18** entre la première sous-couche **16** et la deuxième partie de la couche tampon **12b**, il est proposé selon un autre aspect de l'invention d'associer à la première sous-couche **16** une deuxième sous-couche **19** contigüe à la première sous-couche **16**, ou en d'autres termes, une deuxième sous-couche **19** en contact avec la première sous-couche **16** pour former une deuxième interface **18**. La somme des charges situées au voisinage de la deuxième interface **18** entre la première sous-couche **16** et la deuxième sous-couche **19** est positive.

La figure 11 illustre cet aspect de l'invention.

L'empilement **10** comprend, comme sur la figure 10, une couche tampon **12** séparée en deux parties **12a** et **12b** par une première sous-couche **16**. En l'espèce, l'empilement **10** comprend en outre une deuxième sous-couche **19** comprenant de l' $\text{Al}_{x_2}\text{Ga}_{1-x_2}\text{N}$, la teneur en aluminium x_2 étant inférieure à $x+15\%$. Ainsi, la somme des charges piézoélectriques et spontanées (de valeur positive) au voisinage de la deuxième interface **18** étant inférieure à la somme des charges piézoélectriques et spontanées (de valeur négative) de la première interface **17** permet d'obtenir un bon confinement des électrons dans le canal tout en évitant qu'un gaz d'électrons parasite ne se forme à l'interface **18** ce qui dégraderait les performances du transistor dans le domaine des ondes hyperfréquences.

La conductivité thermique de l'AlGaN se dégradant fortement avec la concentration en aluminium (elle est divisée par 4 pour un taux d'aluminium de 10%), il est proposé, pour améliorer la résistance thermique, de créer un gradient de concentration en aluminium croissant orientée vers la première sous-couche **16**. Par rapport à une concentration en aluminium constante, un gradient linéaire de concentration en aluminium permet de réduire la résistance thermique due à la deuxième sous-couche d'un facteur 3 à 4.

La figure 12 illustre des profils P1, P2 et P3 de concentration en aluminium de l'empilement. La première sous-couche **16** de faible épaisseur, typiquement

inférieure à 20 nm, comprend une forte teneur en aluminium de manière à améliorer le confinement des électrons dans le canal au voisinage de l'hétérojonction **15**. A partir de la première sous-couche **16** vers la deuxième partie de la couche tampon **12b**, la teneur en aluminium sur le profil P1 présente un gradient linéaire décroissant, la teneur en aluminium étant comprise entre $x+0$ et $x+15\%$. Les profils P2 et P3 présentent d'autres évolutions décroissantes de la teneur en aluminium sur la deuxième sous-couche **19**.

Pour compenser le dopage de type N de la couche d'AlGaN **19** induit par ce gradient de concentration, il est proposé dans une amélioration de l'invention d'introduire des impuretés de type accepteur dans la couche d'AlGaN **19**.

Avantageusement, les impuretés introduites dans la deuxième sous-couche **19** sont du fer ou du carbone ou du magnésium ou de béryllium ou tout atome connu pour être un centre accepteur dans le GaN ou l'AlGaN. La concentration d'impuretés introduite est supérieure ou égale au dopage induit par ce gradient de concentration. Cette concentration doit être supérieure ou égale à la somme des charges spontanées et piézoélectriques induite par le gradient de concentration, divisée par l'épaisseur de la couche d'AlGaN **19**.

Sur la figure 13 sont représentées les caractéristiques de transfert simulées, $\text{Log}(I_{DS})=f(V_{GS})$ 61, 62, 63 et 64 d'un transistor de 150 nm de longueur de grille L_g , pour une tension $V_{DS}=40V$ élaborés selon l'invention. La première sous-couche **16** est située à 100 nm de l'hétérojonction **15** et présente une épaisseur t_1 de 5 nm.

En l'espèce chacune des caractéristiques **61**, **62**, **63** et **64** correspond à un transistor dont la première sous-couche **16** présente des teneurs en aluminium différentes, respectivement 25, 30, 35 et 40 %.

On constate que l'inverse de la pente sous le seuil **SS** de chacune des caractéristiques est de l'ordre de 70mV par décade, proche de sa valeur idéale (60mV/décade à température ambiante). Cette valeur de 70mV/décade est maintenue sur cinq décades de courant lorsque le taux d'aluminium est de 40% ce qui permet d'avoir un courant de fuite inférieur au $\mu A/mm$ et présente un réel intérêt pour des applications pour lesquelles la consommation électrique est un critère important.

REVENDEICATION

1. Transistor à effet de champ comprenant un empilement (Emp) selon un axe z comprenant :

- 5 - une couche barrière (13) comprenant un premier matériau (Mat1) semi-conducteur,
- une hétérojonction (15) entre ladite couche barrière (13) et une couche tampon (12)
- un gaz bidimensionnel (9) localisé dans un canal situé dans un plan xy
- 10 perpendiculaire à l'axe z et au voisinage de l'hétérojonction (15),
- la couche tampon (12) comprenant un deuxième matériau (Mat2) semi-conducteur comprenant un composé binaire ou ternaire ou quaternaire de nitrure,

caractérisé en ce que l'empilement comprend en outre une première sous-couche (16) scindant la couche tampon (12) en deux parties (12a ; 12b) et

15 comprenant un troisième matériau (Mat3) comprenant un composé binaire ou ternaire ou quaternaire de nitrure, de sorte que la différence de coefficients de polarisation spontanée et piézoélectrique entre le deuxième matériau (Mat2) et le troisième matériaux (Mat3) induit à une première interface (17) entre la première

20 partie de la couche tampon (12a) et la première sous-couche (16), une première charge électrique (Q1) fixe surfacique générant un champ électrique dirigé selon l'axe z et orienté vers la première interface (17) de manière à permettre le confinement du gaz bidimensionnel (9) dans le canal, la distance entre l'hétérojonction (15) et la première interface (17) située entre la première partie de la

25 couche tampon (12a) et la première sous-couche (16) étant comprise entre un tiers de la longueur de la grille (Lg) selon la direction Ox perpendiculaire à la direction de l'empilement Oz du transistor et deux fois la longueur de grille (Lg), l'épaisseur (t1) de la première sous-couche (16) selon l'axe z étant inférieure à une valeur seuil (t1s).

2. Transistor à effet de champ selon la revendication 1 dans lequel le gaz

30 bidimensionnel (9) est un gaz d'électrons, la charge électrique fixe surfacique à l'interface (17) étant négative.

3. Transistor à effet de champ selon les revendications 1 ou 2 dans lequel le deuxième matériau (**Mat2**) est de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ avec $x=0\%$, x étant la teneur en aluminium de ladite couche tampon (12).
4. Transistor à effet de champ selon l'une des revendications précédentes dans lequel la première sous-couche (16) comprend de l' $\text{Al}_{x_1}\text{Ga}_{(1-x_1)}\text{N}$, x_1 étant supérieur à $x+15\%$, x_1 étant la teneur en aluminium.
5. Transistor à effet de champ selon l'une des revendications précédentes dans lequel la valeur seuil de l'épaisseur (**t1s**) est de 20 nm.
6. Transistor à effet de champ selon l'une des revendications précédentes dans lequel la couche tampon (12) comprend en outre une deuxième sous-couche (19) située entre la première sous-couche (16) et la deuxième partie de la couche tampon (12b), la deuxième sous-couche (19) comprenant de l' $\text{Al}_{x_2}\text{Ga}_{(1-x_2)}\text{N}$, et x_2 étant inférieur à $x+15\%$, la deuxième sous-couche (19) présentant un excès de charges électriques fixes négatives au niveau d'une deuxième interface (18) à partir de l'hétérojonction (15) entre la première (16) et la deuxième (19) sous-couche, une deuxième charge électrique fixe surfacique (**Q2**) à la deuxième interface (18) étant positive et inférieure, en valeur absolue, à la première charge électrique fixe surfacique de la première interface (17).
7. Transistor à effet de champ selon la revendication 6 dans lequel l'épaisseur de la deuxième sous-couche (19) selon la direction de l'empilement est supérieure ou égale à 100 nm.
8. Transistor à effet de champ selon l'une revendication 6 ou 7 dans lequel la deuxième sous-couche d'AlGaN (19) présente un gradient de concentration en aluminium croissant selon la direction de l'empilement (**Emp**) et orienté vers l'hétérojonction (15), x_2 étant compris entre 0 et 15%.
9. Transistor à effet de champ selon l'une des revendications 6 à 8 dans lequel la deuxième sous-couche (19) comprend en outre des impuretés de type accepteur (**A**) de manière à compenser le dopage de type N induit par le gradient de concentration en aluminium de la deuxième sous-couche (19).

10. Transistor à effet de champ selon la revendication 9 dans lequel les impuretés de type accepteur (A) introduites dans la deuxième sous-couche (19) sont du carbone ou du fer, du béryllium ou du magnésium.

1/7

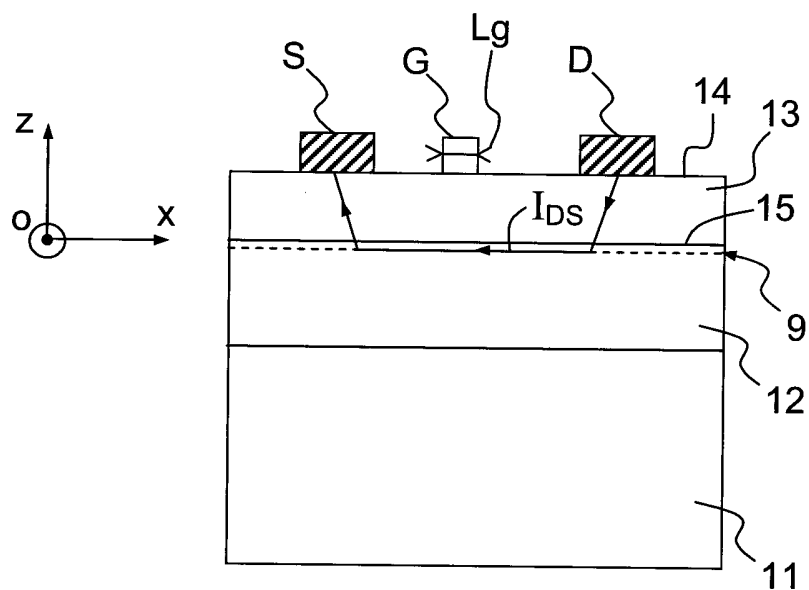


FIG. 1

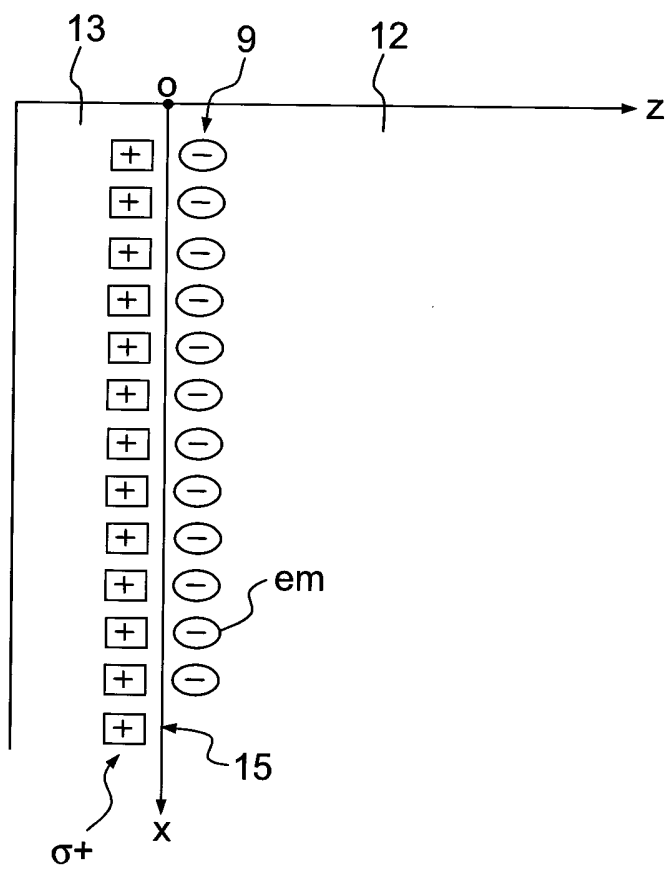


FIG. 2

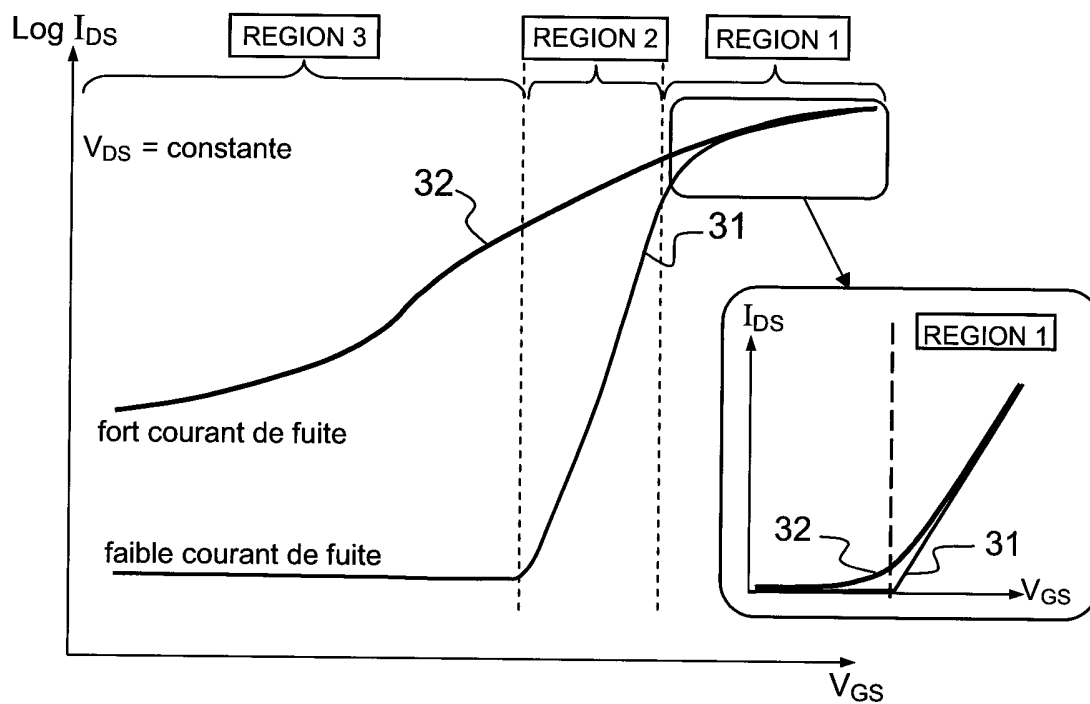


FIG.3

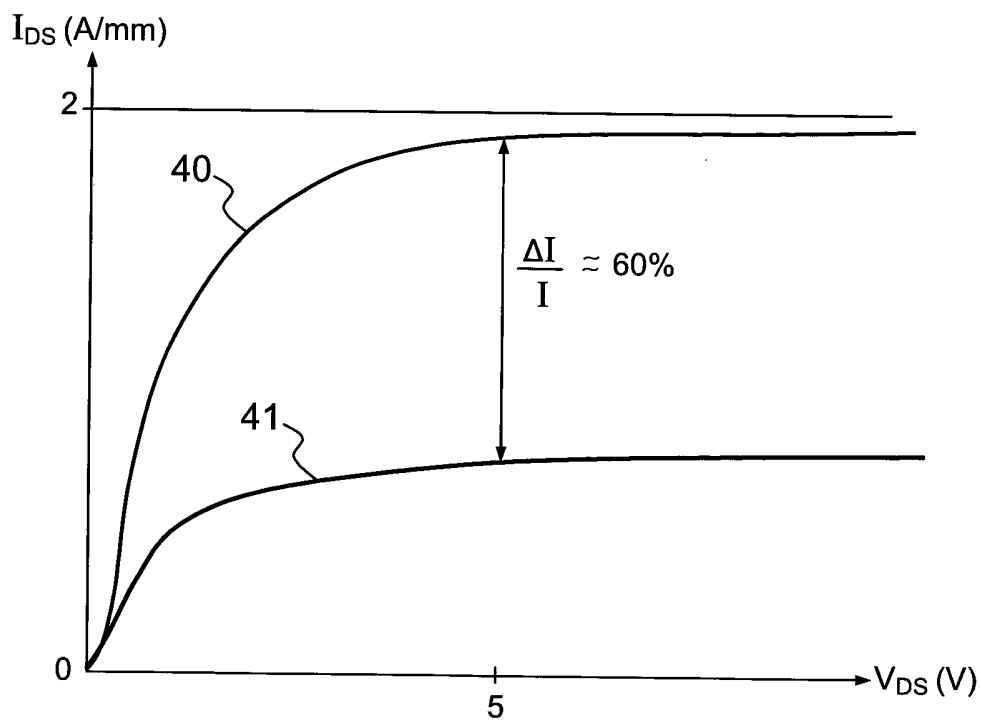


FIG.4

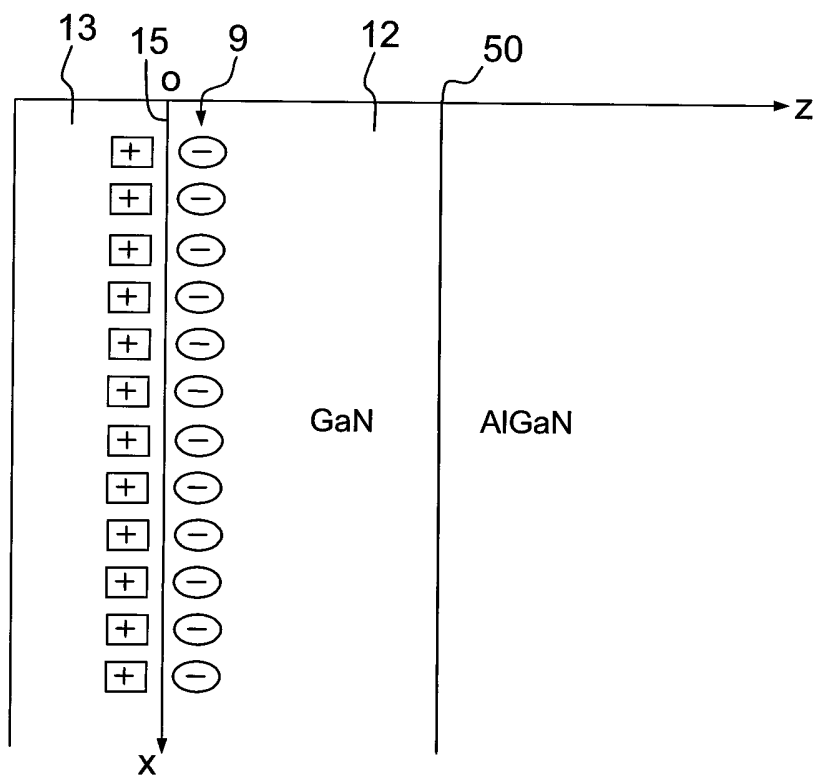


FIG.5

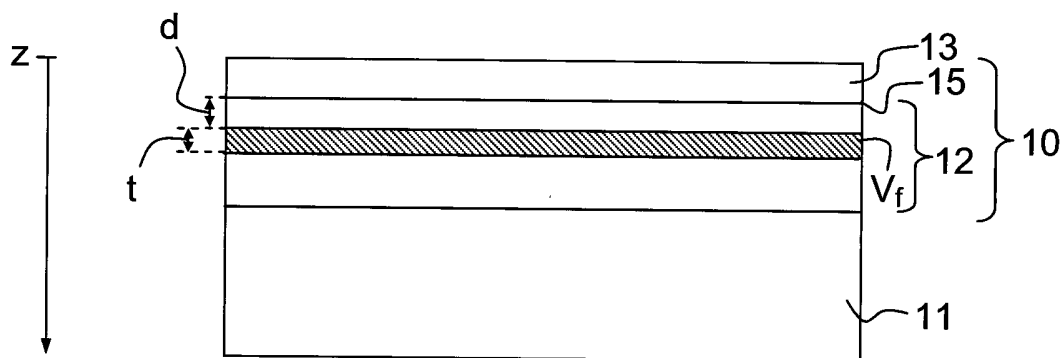


FIG.6

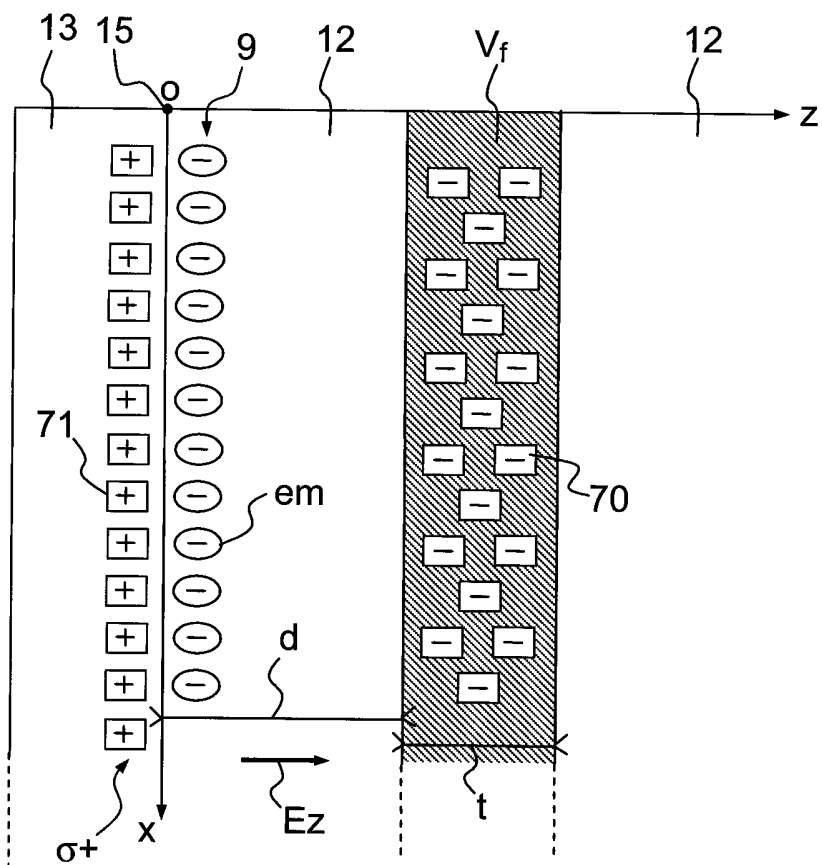


FIG.7

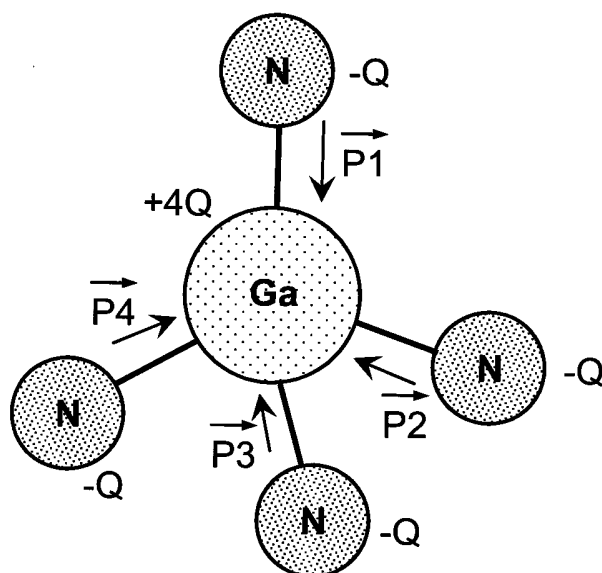


FIG.8

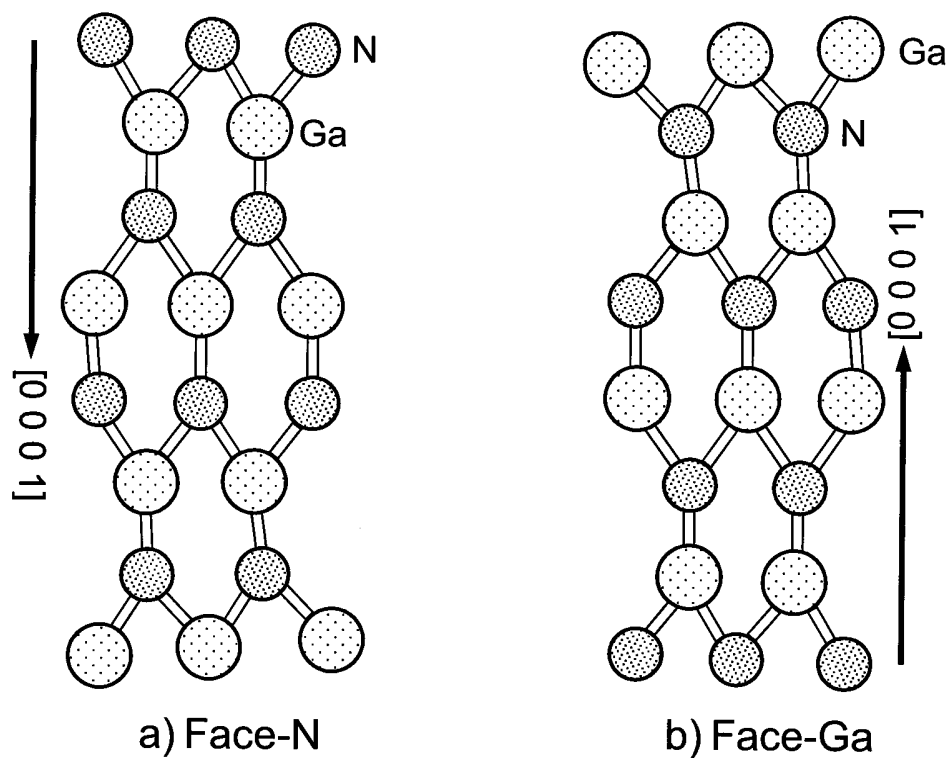


FIG.9

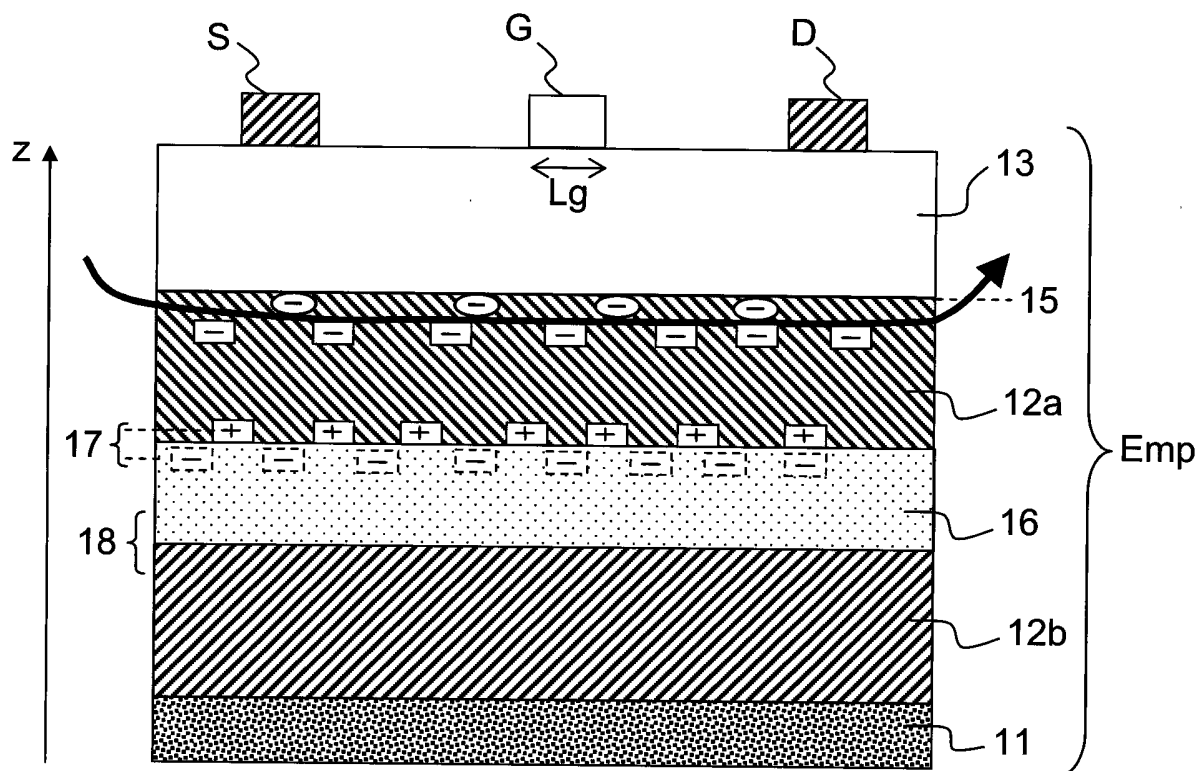


FIG.10

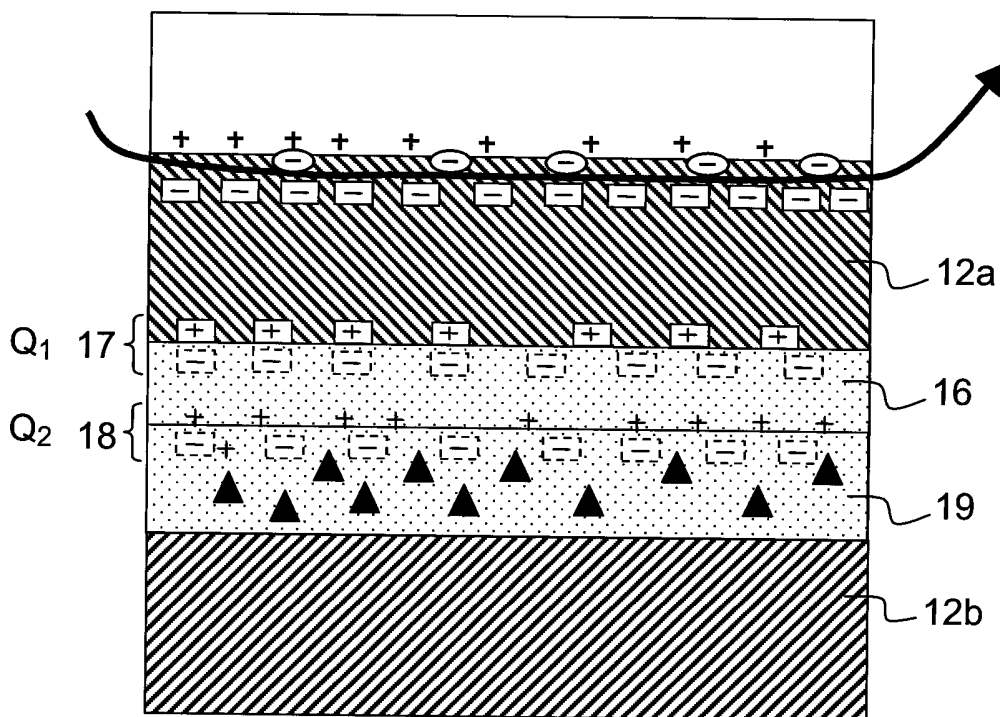


FIG.11

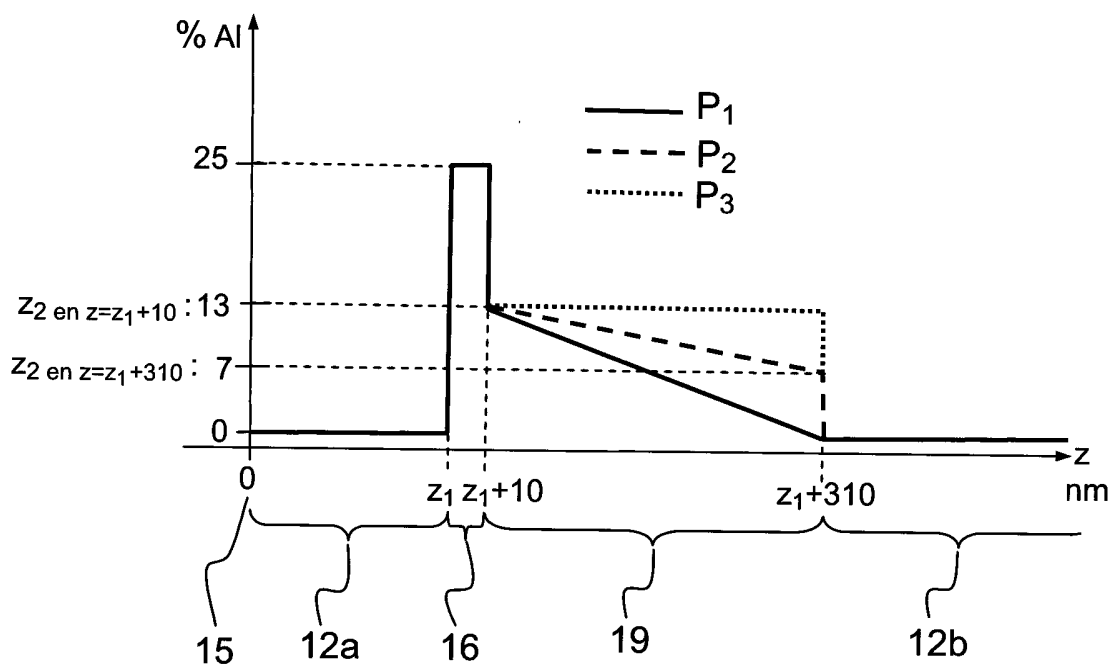


FIG.12

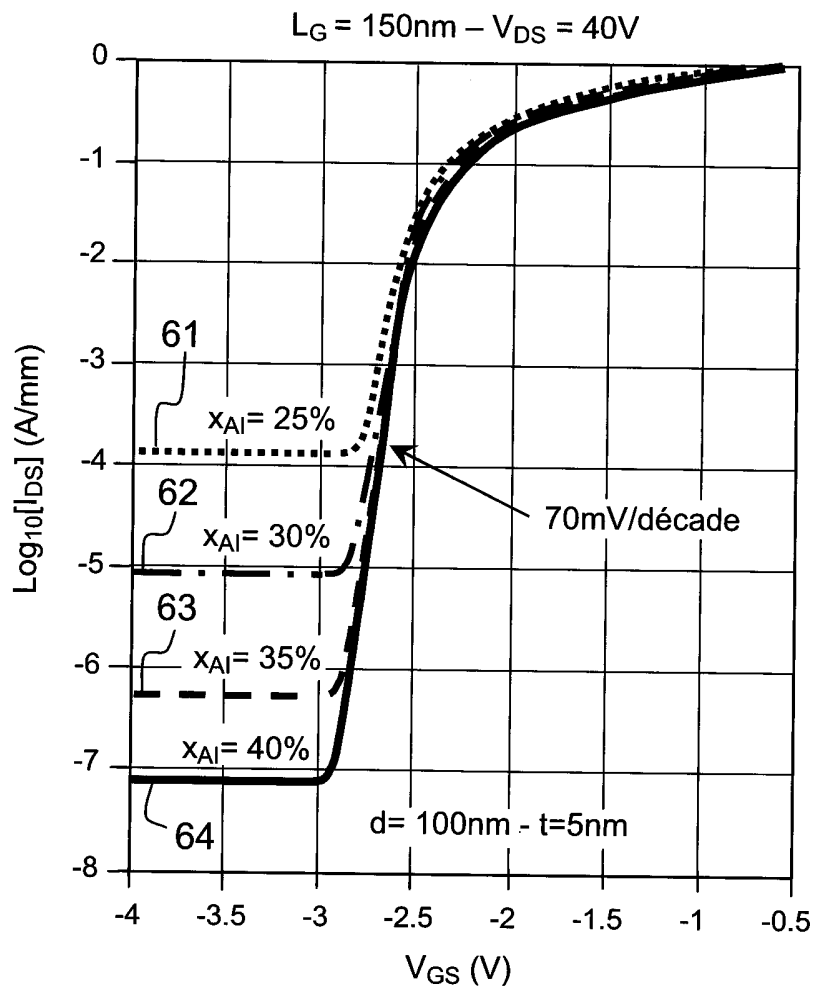


FIG.13

**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

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

N° d'enregistrement
national

FA 823628
FR 1502296

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	US 2010/244041 A1 (OISHI TOSHIYUKI [JP] ET AL) 30 septembre 2010 (2010-09-30) * figures 2, 8-12 et texte associé * -----	1-10	H01L29/772
X	JP 2008 010803 A (NAT INST OF ADV IND & TECHNOL) 17 janvier 2008 (2008-01-17) * figures 1-3 et texte associé * -----	1-10	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H01L
		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
		14 septembre 2016	Moehl, Sebastian
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 1502296 FA 823628**

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 14-09-2016

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
US 2010244041 A1	30-09-2010	JP 2010238752 A	21-10-2010
		US 2010244041 A1	30-09-2010

JP 2008010803 A	17-01-2008	JP 5334149 B2	06-11-2013
		JP 2008010803 A	17-01-2008
