

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 04.04.14.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 09.10.15 Bulletin 15/41.

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, AUBRY RAPHAEL, GAMARRA PIERO, JARDEL OLIVIER et PIOTROWICZ STEPHANE.

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 COUCHE TAMPON OPTIMISEE POUR TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP A HAUTE MOBILITE.

57 L'invention concerne un empilement (10) selon un axe z pour transistor à effet de champ à haute mobilité électronique comprenant :

- une couche tampon (12) comprenant un premier matériau semi-conducteur comprenant un composé binaire ou ternaire ou quaternaire de nitrure et présentant une première bande interdite,

- une couche barrière (13) comprenant un deuxième matériau semi-conducteur comprenant un composé binaire ou ternaire ou quaternaire de nitrure et présentant une deuxième bande interdite,

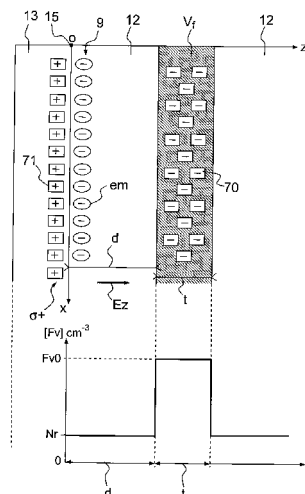
- la deuxième bande interdite étant supérieure à la première bande interdite,

- une hétérojonction (15) entre ladite couche tampon (12) et ladite 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), caractérisé en ce que :

- ladite couche tampon (12) comprend une zone (Vf) comprenant des charges négatives fixes (70) de densité volumique ([Fv]) supérieure ou égale à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , ladite zone (Vf) présentant une épaisseur (t) inférieure ou égale à 200 nm, le produit de la densité volumique de charges négatives fixes ([Fv]) par l'épaisseur (t) de la zone (Vf) étant compris

entre  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  et  $3.10^{13} \text{ cm}^{-2}$ .



## **Couche tampon optimisée pour transistor à effet de champ à haute mobilité**

### DOMAINE DE L'INVENTION

La présente invention concerne les transistors à effet de champ à haute mobilité électronique dénommés transistors HEMT (acronyme de  
5 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 faible bruit ou de puissance, comme commutateur ou comme oscillateur et couvrant la gamme de fréquence comprise typiquement entre  
10 1MHz et 100GHz.

### ETAT DE LA TECHNIQUE

15 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, par exemple comprenant du silicium (Si), du Carbure de Silicium (SiC) ou du Saphire ( $Al_2O_3$ ), sur lequel est réalisé un empilement  
20 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 « buffer » (terme utilisé dans la littérature anglo-saxonne), présente une large bande interdite (matériau semi-conducteur dit à grand gap) par exemple comprenant un  
25 matériau composé binaire de l'azote, tel le GaN ou un matériau à base de composé ternaire de nitrure d'éléments III, dénommé III-N, tel que l'AlGa<sub>x</sub>N, ou plus précisément l' $Al_xGa_{1-x}N$ .

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

## 2

Par exemple, avec une couche tampon en GaN, la couche barrière 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  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}/\text{AlN}$ .

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) 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  $\mu\text{m}$  et 3  $\mu\text{m}$ .

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

La couche tampon 12 et la couche barrière 13 sont classiquement réalisées par épitaxie par MOCVD ou par MBE. A titre d'exemple, on peut citer une couche tampon à base de GaN avec une couche barrière 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 et la couche barrière constitue une hétérojonction 15 qui s'étend également dans le plan Oxy. L'origine O du repère 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. La conductance entre la source S et le drain D est modulée par l'action électrostatique de la grille G, classiquement de type Schottky ou de type MIS pour (métal/isolant/semiconducteur), et la tension  $V_{GS}$  appliquée entre la grille et la source commande le transistor.

Un gaz bidimensionnel d'électrons 9 (dénommé 2DEG pour « two-Dimensional Electron Gas ») est localisé au voisinage de l'hétérojonction 15. Ces électrons sont mobiles dans le plan Oxy et ont une forte mobilité électronique  $\mu_e$ , typiquement supérieure à 1000 $\text{cm}^2/\text{Vs}$ . 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

## 3

dans le plan Oxy au voisinage de 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 et la source. Classiquement, une différence de potentiel  $V_{DS}$  est appliquée entre la source S et le drain D, avec typiquement une source S 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.

L'effet transistor est basé sur la modulation de la conductance  $g_m$  entre les contacts S et D par l'action électrostatique de l'électrode de commande G. La variation de cette conductance est proportionnelle au nombre de porteurs libres dans le canal, et donc au courant entre source et drain. C'est l'effet d'amplification transistor qui permet de transformer un faible signal appliqué sur la grille en un signal plus fort récupéré sur le drain.

La figure 2 représente la répartition des charges au voisinage de l'hétérojonction. Les matériaux de la famille des III-N sont fortement électronégatifs. Lorsque l'on met en contact deux composés différents de cette famille une charge électrique fixe pouvant être positive ( $\sigma^+$ ) (figure 2) ou négative ( $\sigma^-$ ) apparaît à leur interface. Cette charge fixe 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 qui créent un courant lorsqu'une tension est appliquée entre le drain et la source.

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 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 courte (typiquement inférieure à 0.25  $\mu\text{m}$ ). Les électrons circulent alors dans la couche tampon ce qui a pour conséquence une diminution de la conductance  $g_m$  du transistor.

Ce mauvais confinement des électrons dans le canal se traduit sur la caractéristique de transfert  $\text{Log}(I_{DS}) = f(V_{GS})$  par une diminution de la pente  $g_m = \Delta I_{DS} / \Delta V_{GS}$  telle qu'illustrée figure 3. Cette diminution indique une moins grande efficacité à moduler le courant par la grille.

Un bon fonctionnement du transistor est obtenu lorsque la courbe 31  $\text{Log}(I_{DS}) = f(V_{GS})$ , à  $V_{DS}$  constant élevé (par exemple 20V) et pour une grille courte (par exemple inférieure à  $0.25\mu\text{m}$ ), présente une pente raide, telle qu'illustrée figure 3. Cette pente raide caractérisée par une transconductance  $g_m$  élevée traduit la capacité du transistor à moduler de forts courants avec un gain en puissance suffisant au point de fonctionnement 30. On dit dans ce cas que le « pincement » du transistor est bon. La courbe 32 illustre un transistor présentant un mauvais « pincement ». Il est possible de quantifier cette valeur par une grandeur appelée 'Subthreshold Slope' dans la littérature anglo-saxonne ou pente avant le seuil de pincement en français. Une valeur de celle-ci inférieure à 150mV/décade de courant est recherchée.

Pour obtenir un fonctionnement du transistor avec une pente avant le seuil de pincement inférieure à 150mV/décade pour les tensions de fonctionnement souhaitées il est nécessaire de compenser le dopage N initial.

Une première solution est de doper P le « buffer » ( $\text{GaN}$  ou  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ) en introduisant des impuretés de type accepteur, par exemple par modification des conditions d'épitaxie ou par l'ajout lors de la croissance d'impuretés de type accepteur. La densité d'impuretés introduite dans le « 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 quelques  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  à quelques  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  permet d'obtenir une pente avant le seuil de pincement inférieure à 150mV/décade pour des tensions de fonctionnement maximale de 50V ( $V_{DS}$ ) et des grilles de  $0.15\mu\text{m}$  de long.

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 ( $= 3/2 k_b * T$ ) 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 thermique est de l'ordre de 40meV. Un centre sera donc considéré comme profond lorsqu'il sera situé à plus de 100meV de l'un de ces extrema, ce qui est le cas pour le GaN dopé en impureté de type

5 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 fonctionnement supérieures au MHz. Cela a pour effet de réduire la charge mobile présente dans le canal conducteur, ce qui réduit le courant et

10 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 prononcée que la tension  $V_{DS}$  de fonctionnement du transistor est élevée (typiquement supérieure à 20V).

15

Cette diminution de la charge mobile, dénommée «current collapse» en terminologie anglo-saxonne est illustrée figure 4. Dans cet exemple le buffer du transistor en GaN est dopé P uniformément à une valeur de  $5 \cdot 10^{17}$  atomes /  $\text{cm}^3$ .

20 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 subit une contrainte sous la forme d'une tension =

25  $V_{GS} = -6V$  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, avec sur cet exemple une variation relative de 60 % du courant  $I_{DS}$

30 (et donc de la puissance disponible) à une tension  $V_{DS}$  de 5V.

Une deuxième solution est de réaliser un buffer composite GaN /  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  par exemple, tel qu'illustré figure 5, avec le canal en GaN. Dans ce cas la charge piézoélectrique négative apparaissant à l'interface

35  $\text{GaN} / \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  crée une barrière de potentiel permettant de confiner les électrons dans

le canal. Quelques pourcent 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  $0.25\mu\text{m}$ .

- 5 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 nécessaire 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
- 10 solution.

Un but de l'invention est de pallier aux inconvénients précités en proposant un empilement optimisé pour transistor HEMT, permettant au transistor HEMT réalisé à partir de cet empilement de présenter de bonnes

15 caractéristiques courant/tension, traduisant un bon confinement des électrons dans le canal et une faible dispersion de courant, y compris lorsque le transistor doit fonctionner à haute fréquence (faibles dimensions de grille) ou à des tensions de drain  $V_{DS}$  élevées.

20

## DESCRIPTION DE L'INVENTION

- Plus précisément l'invention a pour objet un empilement selon un axe z pour transistor à effet de champ à haute mobilité électronique comprenant :
- 25 - une couche tampon comprenant un premier matériau semi-conducteur comprenant un composé binaire ou ternaire ou quaternaire de nitrure et présentant une première bande interdite,
- une couche barrière comprenant un deuxième matériau semi-conducteur comprenant un composé binaire ou ternaire ou quaternaire de nitrure et
- 30 présentant une deuxième bande interdite,
- la deuxième bande interdite étant supérieure à la première bande interdite,
- une hétérojonction entre ladite couche tampon et ladite couche barrière et,
- un gaz bidimensionnel d'électrons localisé dans un plan xy perpendiculaire à l'axe z et au voisinage de l'hétérojonction,
- 35 caractérisé en ce que :

- ladite couche tampon comprend une zone comprenant des charges négatives fixes de densité volumique supérieure ou égale à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , la zone présentant une épaisseur inférieure ou égale à 200 nm, le produit de la densité volumique de charges négatives fixes par l'épaisseur de la zone étant compris entre  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  et  $3.10^{13} \text{ cm}^{-2}$ .

Préférentiellement, la zone comprend des impuretés de type accepteur introduites dans ladite couche tampon pour générer les charges négatives fixes.

Préférentiellement les impuretés de type accepteur sont du Carbone ou du Fer ou du Magnésium.

Préférentiellement la densité volumique de charges négatives fixes à l'équilibre thermodynamique est sensiblement égale à la densité volumique d'impuretés de type accepteur introduites dans ladite zone de la couche tampon.

Préférentiellement, la densité volumique de charges négatives fixes est supérieure ou égale à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , l'épaisseur de la zone est inférieure ou égale à 40 nm, le produit de la densité volumique de charges négatives fixes par l'épaisseur de la zone est inférieur ou égal à  $4.10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , et ces charges sont situées à une distance de l'hétérojonction inférieure ou égale à 40 nm.

Préférentiellement, le premier matériau semi conducteur comprend du GaN.

Préférentiellement, le deuxième matériau semi conducteur comprend de l'AlN, de l'AlGaN, de l'InAlN, de l'InGaAlN ou du BGaAlN.

Selon une variante, la densité volumique de charges négatives fixes présente un profil selon l'axe z en forme de créneau.

Selon une autre variante, la densité volumique de charges négatives présente un profil selon l'axe z trapézoïdal présentant une première pente croissante puis une valeur constante puis une deuxième pente décroissante.

Selon une autre variante la densité volumique de charges négatives fixes présente un profil selon l'axe z en forme de cloche.

Selon un mode de réalisation, la couche tampon est composite, et comprend une première couche tampon à base de matériau GaN et une deuxième couche tampon à base de matériau AlGaN, la zone Vf étant comprise dans la première couche tampon.

Selon un autre aspect, l'invention a pour objet un transistor à effet de champ à haute mobilité électronique réalisé à partir d'un empilement selon l'invention.

- 5 Selon un mode de réalisation, le transistor présente une longueur de grille  $L_g$  et la distance à l'hétérojonction de la zone est inférieure ou égale à la longueur de grille  $L_g$ .

Préférentiellement, le produit de la densité volumique de charges négatives fixes par l'épaisseur de la zone vérifie la relation suivante :

10  $[Fv]. t = (1 \pm 0.3) \times 10^{13} \times V_{DSMAX} / L_g$

dans laquelle :

$L_g$  est la longueur de grille du transistor, en nm

$V_{DSMAX}$  est la tension maximale appliquée entre la source et le drain du transistor, en Volt,

15  $[Fv]. t$  est exprimé en  $cm^{-2}$ .

D'autres caractéristiques, buts et avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée qui va suivre et en regard des dessins annexés donnés à titre d'exemples non limitatifs et sur lesquels :

20

- la figure 1 déjà citée représente schématiquement une coupe de la structure d'un transistor HEMT classique,

- la figure 2 déjà citée représente la répartition des charges au voisinage de l'hétérojonction du transistor HEMT classique,

- 25 - la figure 3 déjà citée représente schématiquement la caractéristique 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'état de la technique présentant une dispersion en courant,

30

- la figure 5 déjà citée illustre schématiquement un empilement d'un transistor selon un état de la technique présentant une couche tampon composite,

- la figure 6 illustre un empilement pour transistor à effet de champ selon l'invention,

35

- la figure 7 décrit plus précisément la structure des charges dans l'empilement selon l'invention,
- la figure 8 illustre différentes formes de profil de densité volumique de charges négatives fixes selon l'invention,
- 5 - la figure 9 schématise la différence entre le profil d'impuretés introduites et le profil d'impuretés chargées pour trois valeurs de distance  $d$  entre la zone  $V_f$  et l'hétérojonction,
- la figure 10 illustre la caractéristique  $\text{Log}[I_{DS}] = f(V_{GS})$  pour un transistor HEMT réalisé avec l'empilement selon l'invention, pour trois valeurs de
- 10 distance  $d$  entre la zone  $V_f$  et l'hétérojonction,
- la figure 11 illustre la dispersion en courant pour trois valeurs de distance  $d$  entre la zone  $V_f$  et l'hétérojonction,
- la figure 12 schématise la différence entre le profil d'impuretés introduites et le profil d'impuretés chargées pour trois valeurs d'épaisseur  $t$  de la zone  $V_f$ ,
- 15 - la figure 13 illustre une variante de l'empilement selon l'invention présentant une couche tampon composite.

## DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

20 La figure 6 illustre un empilement 10 pour transistor à effet de champ à haute mobilité électronique (HEMT) selon l'invention.

L'empilement 10 selon l'invention est réalisé à partir d'un substrat 11 classique pour ce type de composant.

L'empilement 10 comprend une pluralité de couches selon un plan  $xy$  perpendiculaire à un axe  $z$ . Par convention l'empilement est dit « selon l'axe

25  $z$  ».

L'empilement 10 comprend une couche tampon 12 comprenant un premier matériau semi-conducteur comprenant un composé binaire ou ternaire de nitrure et présentant une première bande interdite. Le premier matériau semi

30 conducteur est dit « grand gap » selon la terminologie classique.

Préférentiellement le premier matériau semi conducteur comprend du GaN. En variante il comprend de l'AlGa<sub>x</sub>N, plus précisément de l'Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, avec  $x$  compris typiquement entre 1% et 35%. La couche tampon est déposée sur le substrat 11. L'épaisseur de cette couche est suffisante pour garantir une

bonne qualité cristalline du matériau à l'interface avec la couche barrière ou se forme le canal conducteur.

L'empilement comprend également une couche barrière 13 comprenant un  
5 deuxième matériau semi-conducteur comprenant un composé binaire, ou ternaire, ou quaternaire de nitrure et présentant une deuxième bande interdite.

Selon une variante, la couche barrière comprend de l'AlN.

Selon une deuxième variante, préférentiellement, la couche barrière  
10 comprend de l'AlGaN ou de l'InAlN, et plus précisément de l' $Al_xGa_{1-x}N$  ou de l' $In_yAl_{1-y}N$  avec x compris typiquement entre 15% et 35% et y compris typiquement entre 15% et 25%.

Selon une troisième variante, la couche barrière comprend du BAIGaN ou de l'InGaAlN.

15 La deuxième bande interdite est supérieure à la première bande interdite, selon la structure classique d'un empilement pour transistor HEMT.

L'empilement 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  
20 la structure classique d'un empilement pour transistor HEMT.

Préférentiellement les matériaux des couches tampon 12 et barrière 13 sont des semi conducteurs classiquement utilisés pour la fabrication de transistor HEMT à base de gallium (Ga).

Des couches intermédiaires peuvent être insérées entre la couche tampon et  
25 le substrat, ou entre la couche tampon et la couche barrière, mais ne sont pas décrites ici par souci de simplification.

La couche tampon 12 de l'empilement selon l'invention présente une structure particulière optimisée pour l'amélioration des performances des  
30 transistors HEMT réalisés à partir de l'empilement 10 selon l'invention, par dépôt de structures de grilles, de sources et de drains selon l'état de la technique des transistors HEMT.

La couche tampon 12 de l'empilement selon l'invention comprend une zone Vf comprenant des charges négatives fixes localisées à un endroit spécifique  
35 de la couche tampon. On entend par charges négatives fixes des charges

non mobiles (charges mobiles dans ce contexte signifie électrons ou trous), le terme mobile étant entendu au sens habituel dans le domaine de la physique des semi-conducteurs. La zone Vf s'étend selon le plan xy, est située à une distance d de l'hétérojonction et présente une épaisseur t.

5 La figure 7 décrit plus précisément la répartition et la nature des charges dans l'empilement selon l'invention. Le caractère fixe d'une charge est symbolisé par un rectangle entourant cette charge, tandis que le caractère mobile est symbolisé par un ovale.

Comme décrit plus haut, du fait d'un effet piézo-électrique, une densité surfacique  $\sigma^+$  de charges positives fixes 71 est présente au voisinage de l'hétérojonction, et des charges négatives mobiles em également situées à proximité de l'hétérojonction constituent le gaz bidimensionnel d'électrons à l'origine du fonctionnement du transistor HEMT. La densité surfacique d'électrons em dans le canal est typiquement d'environ  $0.5 \text{ à } 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ .

15

La zone Vf de l'empilement selon l'invention comprend des charges négatives fixes 70.

Ces charges négatives fixes présentent une densité volumique [Fv] classiquement exprimée en  $\text{cm}^{-3}$ .

20 Après de nombreuses expérimentations et simulations, les inventeurs ont déterminé des plages de paramètres [Fv], et t de la zone Vf pour lesquels le transistor HEMT, réalisé sur l'empilement comme décrit précédemment, présente un bon fonctionnement, particulièrement un bon « pincement » et une faible dispersion de courant (« lag »). L'obtention d'un bon  
25 fonctionnement signifie également que les inconvénients liés aux empilements selon l'état de la technique tels que : diminution de la puissance émise, baisse de rendement, réduction de la linéarité ... sont réduits, voir supprimés.

L'idée générale de l'invention est d'introduire dans la couche tampon 12 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 2D d'électron permet :

35 - d'obtenir un bon confinement des électrons dans le canal sans créer de phénomènes de piégeage indésirables qui entraînent une dégradation de la

linéarité (effets dispersifs) et une diminution de la puissance disponible et du rendement,

- sans dégrader la conductivité thermique du « buffer » par exemple en GaN.

- 5 Les paramètres  $[Fv]$  et  $t$  sont reliés à des grandeurs physiques intervenant dans le fonctionnement du transistor HEMT réalisé à partir de l'empilement 10 selon l'invention.

Une première grandeur physique est le champ électrique  $E$  créé du fait de 10 l'existence de la zone Vf.

Le champ électrique  $E$  selon l'axe  $z$   $E_z$  créé entre l'hétérojonction 15 et la zone Vf vérifie la relation:

$$\text{div}E_z = q \cdot [Fs] / \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

avec :  $q$  charge de l'électron,  $\epsilon_0$  permittivité diélectrique du vide,  $\epsilon_r$  15 permittivité relative de la couche tampon,  $[Fs]$  densité surfacique de charges négatives « vues » par les charges mobiles em du canal (exprimée en  $\text{cm}^{-2}$ ).

On a :

$$[Fs] \approx [Fv] \cdot t$$

La présence du champ électrique  $E_z$  crée par la zone Vf de charges 20 négatives a pour effet de confiner les électrons dans le canal, ce qui permet d'obtenir un « bon pincement ».

Ainsi pour que ce champ  $E_z$  soit suffisant pour confiner les électrons, les inventeurs ont montré que les grandeurs  $[Fv]$  et  $t$  et doivent être comprises dans les plages suivantes :

25  $[Fv] \geq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

$$t \leq 200 \text{ nm}$$

$$10^{12} \text{ cm}^{-2} \leq [Fv] \cdot t \leq 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$$

Le paramètre  $[Fv] \cdot t$  représente la dose de charges négatives, qui doit être optimale et disposée à proximité de l'interface 15.

30

Un avantage de l'invention est que la localisation et le dosage des charges négatives introduites permet d'introduire la quantité de charge qui est juste nécessaire au confinement des électrons (cette quantité dépendant par ailleurs de la tension de fonctionnement et de la longueur de grille comme 35 décrit plus loin), tout en limitant la perte de puissance par rapport à une

approche selon laquelle l'intégralité du buffer est « dopée » en impuretés de type accepteur.

5 Les plages revendiquées doivent également être respectées pour assurer une faible dispersion du courant, comme décrit plus loin.

Le profil de densité volumique de charges négatives fixes selon l'axe z peut être de forme quelconque, la forme n'intervenant pas au premier ordre dans les effets physiques en cause.

10 La figure 7 illustre un profil en forme de créneau de valeur constante  $Fv_0$ . La valeur minimale  $N_r$  correspond à la densité de charges négatives fixes résiduelles dans la couche tampon 12, pour une couche tampon dite « compensée » selon l'état de la technique. Dans ce cas la couche tampon dans son ensemble présente un excès de concentration en impuretés de type accepteur par rapport à la concentration en impuretés de type donneur  
15 supérieur à  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , correspondant à la densité résiduelle  $N_r$ .

La figure 8 (8a à 8d) illustre différentes formes de profil de densité volumique  $[Fv]$  selon l'invention.

La figure 8a illustre un profil trapézoïdal présentant une première pente croissante 81 puis une valeur constante  $Fv_0$  puis une deuxième pente décroissante 82. La figure 8b illustre un profil présentant une première pente croissante, une valeur constante et une deuxième pente abrupte. La figure 8c illustre un profil présentant une première pente abrupte, une valeur constante et une deuxième pente décroissante. La figure 8d illustre un profil  
20 en cloche.

L'empilement 10 selon l'invention peut présenter tout autre type de profil présentant une densité de charges volumique localisée dans une épaisseur  $t$  vérifiant les conditions précédentes. Pour un profil quelconque, l'épaisseur  $t$  peut être évaluée à mi-hauteur entre la valeur maximale et la valeur  
30 résiduelle. La distance  $d$  à l'hétérojonction 15 peut être évaluée par rapport au point 83 correspondant au point à mi-hauteur du côté de l'hétérojonction 15.

Préférentiellement les charges négatives fixes 70 localisées dans la couche  
35 tampon 12 sont obtenues à partir d'impuretés de type accepteur A introduites

dans la couche tampon 12. Ces atomes de type accepteurs sont préférentiellement du carbone ou du fer, ou du magnésium ou du béryllium ou tout type d'impuretés connues pour être un centre accepteur dans le GaN ou l'AlGaN.

- 5 Ces impuretés sont par exemple introduites en faisant varier les conditions d'épitaxie de la couche tampon 12 ou en introduisant volontairement ces impuretés lors de la croissance de la couche tampon 12.

Ces impuretés A ne réalisent pas une fonction de dopage au sens classique du terme, puisqu'ils constituent des centres profonds.

- 10 Ces impuretés de type accepteur sont en interaction de type électrostatique avec les charges positives fixes 71 formant le plan de charge  $\sigma^+$  situé au voisinage de l'hétérojonction 15, et sont plus ou moins ionisées selon leur distance  $d$  à cette hétérojonction 15 et à leur position dans la bande interdite du matériau constituant la couche tampon.

15

Une deuxième grandeur physique intervenant pour le fonctionnement du transistor HEMT réalisé à partir de l'empilement selon l'invention est le paramètre  $\Delta$  défini comme suit, et illustré sur la figure 9.

$$\Delta = \int_0^t ([A] - [A^-]) \cdot dz \quad (\text{en cm}^{-2})$$

- 20 Avec :

[A] densité volumique d'impuretés A (également dénommés défauts) de type accepteur introduites dans la couche tampon 12. On a donc  $[A] = [Fv]$ .

- [A<sup>-</sup>] la densité volumique d'impuretés dite « chargées » ou « ionisées » par interaction électrostatique (ionisation du défaut qui entraîne une capture d'un  
25 électron par le centre profond), chaque impureté « chargée » correspondant à une charge négative fixe « figée » par interaction électrostatique.

Nous allons à présent expliciter la signification physique de la grandeur  $\Delta$ , et pour cela préciser le sens du terme « figé » et « non figé ».

- 30 Un centre accepteur à deux états possibles : soit il est occupé par un électron et est alors chargé négativement, soit il est vide et est dans ce cas neutre. Le taux d'occupation de ces centres (c.a.d. le nombre de centres occupés par un électron et donc la quantité de charge négative liée à ces centres) dépend des conditions d'utilisations (fréquence, température et

tension). Ceci a pour conséquence que le niveau de puissance dépend des conditions d'utilisations.

Ces impuretés étant des centres profonds, aux températures de fonctionnement du transistor (25°C à 250°C typiquement), le temps  
5 nécessaire pour que ces centres atteignent leur état d'équilibre est plus long que les temps caractéristiques de fonctionnement du transistor (fréquences de fonctionnement typique de l'ordre de 1GHz à 100GHz qui correspondent à des tensions qui changent périodiquement en 1ns à 10ps environ).

Ces centres ne répondent donc pas immédiatement au signal appliqué. Il  
10 s'ensuit que la charge négative portée par ces impuretés et par conséquent le niveau de courant et de puissance dépend du temps et des différentes tensions appliquées. On observe donc une évolution du signal au cours du temps indépendante du signal appliqué à l'instant  $t$  qui dégrade la linéarité.

Cependant si ces impuretés sont suffisamment proches de l'interface, alors  
15 par interaction électrostatique, une partie de ces impuretés (celles les plus proches de cette interface) seront chargées quelle que soit la tension appliquée au transistor. Leur état ne dépendra alors plus des conditions d'utilisation du transistor. On aura alors moins d'effet dispersif et un fonctionnement plus linéaire du transistor. La grandeur  $\Delta$  quantifie ces effets  
20 dispersifs, elle représente la quantité de charges négatives fixes dont l'état dépend des conditions d'utilisations.

Ainsi dans ce contexte, le terme « figé » signifie que l'état du centre  
accepteur ne dépend pas des conditions d'utilisations, et le terme « non figé » signifie que l'état du centre accepteur dépend des conditions  
25 d'utilisations.

La grandeur  $\Delta$  se définit par la quantité d'impuretés, ici négatives, introduites dans la couche tampon pour améliorer le pincement (et donc le gain du transistor) **moins** la quantité d'impuretés dont l'état est « figé » par la présence de la charge piézoélectrique.  $\Delta$  représente donc le résiduel  
30 d'impuretés non figées dont l'état de charge évoluera au gré des conditions d'utilisations (température, fréquence, tension). En d'autres termes,  $\Delta$  représente le nombre d'impuretés par unité de surface n'ayant pas capturé d'électrons (c'est-à-dire « non figé ») dont l'état va dépendre des conditions d'utilisation. Ces centres vont donc potentiellement pouvoir capturer un

électron, la quantité de centres accepteurs capturant un électron dépendant des conditions d'utilisation.

Le profil 91 (traits pleins) sur la figure 9 correspond au profil initial [A], le profil  
5 92 (traits en pointillé) correspond au profil [A<sup>-</sup>].

La différence entre les deux profils correspond à la surface hachurée  $\Delta$  sur la figure 9.

Les simulations pour calculer le profil [A<sup>-</sup>] ont été réalisées pour trois valeurs de distance  $d$  à l'hétérojonction 15,  $d_1 = 25$  nm,  $d_2 = 75$  nm,  $d_3 = 140$  nm, et  
10 avec les hypothèses suivantes :

Impuretés de type accepteur introduites dans la couche tampon avec une densité volumique [A] $=10^{18}$ cm<sup>-3</sup> et formant une zone Vf présentant un profil en forme de créneau et une épaisseur  $t = 40$  nm et dont le niveau d'énergie  $E_T$  dans la bande interdite du matériau constituant la couche tampon se  
15 trouve à  $E_T = E_V + 0.9$ eV.

De plus la longueur de grille  $L_g$  du transistor réalisé sur l'empilement est dans cet exemple de 150 nm, qui correspond à une grille dite « courte ». Les différentes applications visées couvrent des tailles de grille typiquement  
20 inférieures à 4 $\mu$ m. Les inventeurs ont mis en évidence une dépendance des performances du transistor en fonction de la distance  $d$  à l'hétérojonction de la zone Vf, cette dépendance étant fonction de la taille de la grille  $L_g$ .

Lors de la mise sous tension du transistor HEMT (dans cet exemple  $V_{GS} = -3$  V et  $V_{DS} = 40$  V), les impuretés non initialement chargées ( $\Delta$ ) vont se charger. Lors d'un retour à  $V_{GS} = -3$  V et  $V_{DS} = 40$  V ces impuretés étant des centres profonds restent chargées aux fréquences de fonctionnement du transistor. Ainsi, les impuretés dont la charge négative n'est pas figée par effet électrostatique ont un état qui se modifie par application d'une tension.  
30 Cette modification provoque une variation du courant et donc de la puissance disponible (diminution ou augmentation selon que l'on accroisse ou que l'on réduise la tension de polarisation du transistor).

On constate sur la figure 9 que les charges non figées sont de plus en plus nombreuses au fur et à mesure que la zone Vf est éloignée de

l'hétérojonction située à l'origine O. (donc dispersion plus importante du courant).

On remarque également que, pour une distance d donnée, ces charges apparaissent du côté opposé à celui de l'hétérojonction 15. En effet, du côté de l'hétérojonction, les impuretés sont plus proches des charges positives fixes, donc l'interaction électrostatique avec la densité surfacique  $\sigma^+$  est plus importante et permet de figer l'état des charges.

Dans l'exemple donné sur la figure 9 (tension maximale appliquée sur le drain du transistor de 40V), la simulation physique indique:

$$10 \quad \Delta 1 \approx 0.1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

$$\Delta 2 \approx 1.9 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

$$\Delta 3 \approx 2.7 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

La figure 10 illustre la caractéristique  $\text{Log}[I_{DS}] = f(V_{GS})$  pour un transistor HEMT réalisé avec l'empilement selon l'invention décrit précédemment, pour un point de fonctionnement (appelé « quiescent point » en langage anglo-saxon – noté QP ici)  $I_{DS\_QP} = 100\text{mA/mm}$  ( $V_{GS\_MAX} = -6\text{V}$  dans cet exemple) et  $V_{DS\_QP} = 20\text{V}$  ( $V_{DS\_MAX} = 2 \times V_{DS\_QP} = 40\text{V}$ ), pour une zone Vf réalisée selon les trois distances précédentes. On constate que la caractéristique est très bonne pour  $d1 = 25 \text{ nm}$ , un peu moins bonne pour  $d2 = 75 \text{ nm}$  et mauvaise pour  $d3=140 \text{ nm}$ .

La figure 11 illustre la dispersion en courant telle qu'explicitée plus haut pour les trois cas précités. On constate que cette dispersion augmente lorsque d augmente.

Ainsi pour une grille « courte » de longueur  $L_g$  typiquement inférieure à 200 nm, un bon fonctionnement du transistor est obtenu pour une zone Vf située à une distance  $d < 100 \text{ nm}$  de l'hétérojonction 15.

Pour une distance d trop importante, les charges piégées non figées deviennent trop nombreuses, et un phénomène analogue à celui constaté par les inventeurs pour un dopage P homogène sur l'ensemble de la couche tampon est observé (mauvais pincement et dispersion en courant). Une distance d trop importante réduit également le champ électrique  $E_z$  de confinement des électrons.

La figure 12 illustre l'évolution du paramètre  $\Delta$  en fonction de l'épaisseur  $t$  de la zone Vf présentant un profil en forme de créneau avec des impuretés de type accepteur dont le niveau d'énergie  $E_T$  dans la bande interdite du matériau constituant la couche tampon se trouve à  $E_T = E_V + 0.9\text{eV}$  et avec

5 une densité volumique  $[A] = 10^{18}\text{cm}^{-3}$ .

Plus la valeur de  $t$  augmente (de 38 nm à 90 nm) plus la valeur de  $\Delta$  augmente. La valeur d'épaisseur  $t$  maximum pour laquelle le transistor conserve un bon fonctionnement est également fonction de la densité d'impuretés introduites  $[A]$  et de la distance à l'hétérojonction  $d$ .

10

Il ressort des considérations précédentes relatives aux figures 9 à 12 que, pour un fonctionnement le plus linéaire possible du transistor réalisé sur l'empilement selon l'invention, et afin de réduire la perte de puissance et de rendement du transistor, on cherche à minimiser le paramètre  $\Delta$ .

15 Une valeur de  $\Delta$  proche de 0 correspond à la situation dans laquelle la densité surfacique de charges négatives fixes  $\int_0^t [A^-].dz$  est sensiblement égale à la densité surfacique d'impuretés de type accepteur  $\int_0^t [A].dz$  introduites dans la zone Vf de la couche tampon 12.

20 Une condition d'optimum correspond à une valeur de  $\Delta$  telle que :

$$\Delta \leq 10^{12}\text{cm}^{-2}$$

Pour cela une concentration volumique  $[Fv]$  suffisamment élevée d'impuretés doit être placée à une distance  $d$  suffisamment proche de l'interface 15 (de manière à rendre l'épaisseur  $t$  de cette couche la plus fine possible pour un produit  $[Fv].t$  donné) pour que toutes les impuretés introduites présentent des charges dans un état figé (tous les « dopants » sont ionisés et le restent pour toutes les conditions d'utilisation). Dans cette situation, la dispersion temporelle sur la transconductance  $g_m$  et le courant est réduite, ce qui représente un avantage pour les applications dans lesquelles les aspects de

25

30 linéarité du signal sont importants.

Cette condition est par exemple vérifiée pour un empilement selon l'invention pour transistor HEMT avec :

$$[Fv] \geq 10^{18}\text{cm}^{-3}$$

$$t \leq 40\text{nm}.$$

35  $[Fv].t \leq 4.10^{12}\text{cm}^{-2}$

et  $d \leq 40$  nm.

En première approximation cette condition préférentielle est indépendante de la longueur de la grille  $L_g$  du transistor réalisé à partir de l'empilement.

- 5 Selon un autre aspect, l'invention concerne un transistor à effet de champ à haute mobilité électronique réalisé à partir d'un empilement selon l'invention.

De plus, suite à de nombreuses expérimentations et simulations, les inventeurs ont dégagé des conditions préférentielles de dimensionnement du transistor HEMT selon l'invention, c'est-à-dire réalisé à partir de l'empilement  
10 selon l'invention, en fonction de l'application souhaitée.

Lors du fonctionnement du transistor, une partie des impuretés introduites dans le buffer pour améliorer le « pincement » se charge négativement. Ces  
15 charges fixes correspondent aux impuretés qui passent d'un état neutre (pas d'électrons capturés) à un état chargé négativement (capture d'un électron par le centre profond). La quantité d'impureté capturant un électron dépend des conditions d'utilisations (température, fréquence, tension) et des caractéristiques du profil de ces impuretés ( $d$ ,  $t$  et  $[Fv]$ ).

20

Les inventeurs ont mis en évidence qu'un bon fonctionnement du transistor est obtenu préférentiellement lorsque la distance  $d$  est inférieure ou égale à la longueur de la grille  $L_g$  du transistor selon l'invention :  $d \leq L_g$ .

- 25 Par simulation on peut établir une relation semi-empirique reliant la densité surfacique de charge fixes (en  $\text{cm}^2$ ) à réaliser dans l'empilement, en fonction de la longueur de grille  $L_g$  et de la tension maximale appliquée sur le drain  $V_{DSMax}$ . Cette relation a été validée par simulation pour une densité d'électrons dans le canal allant jusqu'à  $3 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ , pour une longueur de  
30 grille  $L_g$  comprise entre 50nm et 4  $\mu\text{m}$ , et une tension  $V_{DSMax}$  allant jusqu'à quelques kV (pour les grilles les plus longues) soit :

$$[Fv] \cdot t = [Fs_{opt}] = (1 \pm 0.3) \times 10^{13} \times V_{DSMAX} / L_g \quad (\text{relation n}^\circ 1)$$

avec  $[Fs_{opt}]$  en  $\text{cm}^{-2}$ ,  $L_g$  en nm et  $V_{DSMAX}$  en V

35

Par exemple, pour une tension de fonctionnement maximale  $V_{DSMAX}$  de 40V et une longueur de grille de 150nm, il faut réaliser :

$$[F_{s_{opt}}] = (1 \pm 0.3) \times 10^{13} \times 40V / 150nm,$$

soit environ  $(2.7 \pm 0.8) \times 10^{12}$  charges fixes/cm<sup>2</sup>,

5

Dans les trois exemples qui vont suivre, on se place dans le cas où  $\Delta \approx 0$  soit  $\Delta < 10^{12}/cm^2$  (cas le plus favorable du point de vue dispersion du signal).

On prend également  $t = 40nm$ , et  $[F_v] = 10^{18}cm^{-3}$  respectivement soit  $[A] = [F_v] \cdot t = 4 \times 10^{12}cm^2$ .

10

La relation 1 peut s'écrire sous deux formes équivalentes selon le paramètre, longueur de grille ou tension maximale de fonctionnement, que l'on cherche à optimiser :

15 Si c'est la tension on a :

$$V_{MAX} = L_g \times ([F_v] \cdot t) / ((1 \pm 0.3) \times 10^{13}) \quad (\text{relation n°2})$$

Si c'est la longueur de grille alors :

$$L_g = V_{MAX} \times ((1 \pm 0.3) \times 10^{13}) / ([F_v] \cdot t) \quad (\text{relation n°3})$$

20 -Application télécom spatiale à 30GHz :

Dans ces applications la longueur de grille est comprise entre 50nm et 150nm. On utilise la relation n°2, et on trouve :

- pour une longueur de grille  $L_g = 50nm$  :  $V_{MAX} \approx 15V$  à  $28V$

- pour une longueur de grille  $L_g = 150nm$  :  $V_{MAX} \approx 45V$  à  $85V$

25

-Application en commutation du type « envelope tracking » :

Dans ce cas on veut avoir la grille la plus courte possible (temps de commutation le plus court) pouvant fonctionner à 60V. On utilise la relation n°3 et on obtient :

$$30 \quad L_g = V_{MAX} \times (1 \pm 0.3) \times 10^{13} / ([F_v] \cdot t) = 60 \times (1 \pm 0.3) \times 10^{13} / (4 \times 10^{12}) \\ \approx 100nm \text{ à } 200nm.$$

-Application en commutation de puissance pour l'automobile :

35 Dans ce cas on veut tenir des tensions de 650V à 1300V. La longueur de grille doit donc être de l'ordre de :

- Pour 650V :

$$Lg = V_{MAX} \times (1 \pm 0.3) \times 10^{13} / ([Fv]^*d) = 650 \times (1 \pm 0.3) \times 10^{13} / (4 \times 10^{12})$$

$$\approx 1 \mu\text{m} \text{ à } 2 \mu\text{m}.$$

- Pour 1300V :

5  $Lg = V_{MAX} \times (1 \pm 0.3) \times 10^{13} / ([Fv]^*d) = 1300 \times (1 \pm 0.3) \times 10^{13} / (4 \times 10^{12})$

$$\approx 2 \mu\text{m} \text{ à } 4 \mu\text{m}.$$

L'empilement selon l'invention est compatible de l'utilisation d'une couche tampon 12 composite, comprenant une première couche tampon à base de matériau GaN et une deuxième couche tampon à base de matériau AlGaN.

10 On note 50 l'interface entre le GaN et l'AlGaN (voir figure 5). La présence d'une zone Vf selon l'invention permet de diminuer le pourcentage d'aluminium dans le matériau AlGaN, par exemple en dessous de 5%, avec pour avantage de réduire l'augmentation de la résistance thermique de cette

15 deuxième couche tampon.

Selon une variante préférée illustrée figure 13 la zone Vf est comprise dans la première couche tampon.

Selon une autre variante, la zone Vf est comprise dans la deuxième couche tampon.

20 Selon une autre variante, la zone Vf comprend l'interface 50.

## REVENDEICATIONS

1. Empilement (10) selon un axe z pour transistor à effet de champ à haute mobilité électronique comprenant :
- 5 - une couche tampon (12) comprenant un premier matériau semi-conducteur comprenant un composé binaire ou ternaire ou quaternaire de nitrure et présentant une première bande interdite,
- une couche barrière (13) comprenant un deuxième matériau semi-conducteur comprenant un composé binaire ou ternaire ou quaternaire de
- 10 nitrure et présentant une deuxième bande interdite,
- la deuxième bande interdite étant supérieure à la première bande interdite,
- une hétérojonction (15) entre ladite couche tampon (12) et ladite couche barrière (13) et,
- un gaz bidimensionnel d'électrons (9) localisé dans un plan xy
- 15 perpendiculaire à l'axe z et au voisinage de l'hétérojonction (15), caractérisé en ce que :
- ladite couche tampon (12) comprend une zone (Vf) comprenant des charges négatives fixes (70) de densité volumique ([Fv]) supérieure ou égale à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , ladite zone (Vf) présentant une épaisseur (t) inférieure ou égale
- 20 à 200 nm, le produit de la densité volumique de charges négatives fixes ([Fv]) par l'épaisseur (t) de la zone (Vf) étant compris entre  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  et  $3.10^{13} \text{ cm}^{-2}$ .
2. Empilement selon la revendication 1 dans lequel ladite zone (Vf)
- 25 comprend des impuretés de type accepteur (A) introduites dans ladite couche tampon (12) pour générer les charges négatives fixes (70).
3. Empilement selon l'une des revendications 1 ou 2 dans lequel les impuretés de type accepteur sont du Carbone ou du Fer ou du Magnésium.
- 30
4. Empilement selon l'une des revendications précédentes dans lequel la densité surfacique de charges négatives fixes  $\int_0^t [A^-].dz$  est sensiblement égale à la densité surfacique d'impuretés de type accepteur  $\int_0^t [A].dz$  introduites dans la zone Vf de la couche tampon (12).

5. Empilement selon l'une des revendications précédentes dans lequel la densité volumique de charges négatives fixes ( $[Fv]$ ) est supérieure ou égale à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , l'épaisseur ( $t$ ) de la zone ( $Vf$ ) est inférieure ou égale à 40 nm, le produit de la densité volumiques de charges négatives fixes ( $[Fv]$ ) par l'épaisseur ( $t$ ) de la zone ( $Vf$ ) est inférieur ou égal à  $4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , et la distance ( $d$ ) de la zone ( $Vf$ ) à l'hétérojonction (15) est inférieure ou égale à 40 nm.
6. Empilement selon l'une des revendications précédentes dans lequel le premier matériau semi conducteur comprend du GaN.
7. Empilement selon l'une des revendications précédentes dans lequel le deuxième matériau semi conducteur comprend de l'AlN, de l'AlGaN, de l'InAlN, de l'InGaAlN ou du BAIGaN.
8. Empilement selon l'une des revendications précédentes dans lequel la densité volumique de charges négatives fixes ( $[Fv]$ ) présente un profil selon l'axe z en forme de créneau.
9. Empilement selon l'une des revendications 1 à 7 dans lequel la densité volumique de charges négatives fixes ( $[Fv]$ ) présente un profil selon l'axe z trapézoïdal présentant une première pente croissante puis une valeur constante puis une deuxième pente décroissante.
10. Empilement selon l'une des revendications 1 à 7 dans lequel la densité volumique de charges négatives fixes ( $[Fv]$ ) présente un profil selon l'axe z en forme de cloche.
11. Empilement selon l'une des revendications précédentes dans lequel la couche tampon (12) est composite, comprenant une première couche tampon à base de matériau GaN et une deuxième couche tampon à base de matériau AlGaN, ladite zone ( $Vf$ ) étant comprise dans la première couche tampon.

12. Transistor à effet de champ à haute mobilité électronique réalisé à partir d'un empilement selon l'une des revendications précédentes.

13. Transistor selon la revendication 12 présentant une longueur de grille (Lg) dans lequel la distance (d) à l'hétérojonction de la zone (Vf) est inférieure ou égale à la longueur de grille (Lg).

14. Transistor selon l'une des revendications 12 ou 13 dans lequel le produit de la densité volumique de charges négatives fixes ([Fv]) par l'épaisseur (t) de la zone (Vf) vérifie la relation suivante :

$$[Fv]. t = (1 \pm 0.3) \times 10^{13} \times V_{DSMAX} / Lg$$

dans laquelle :

Lg est la longueur de grille du transistor, en nm

$V_{DSMAX}$  est la tension maximale appliquée entre la source et le drain du transistor, en Volt,

[Fv]. t est exprimé en  $\text{cm}^{-2}$ .

1/8

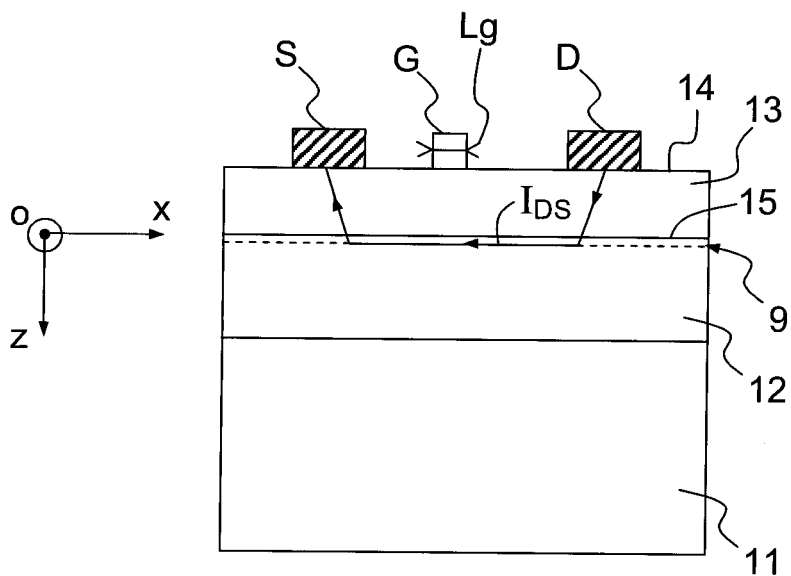


FIG. 1

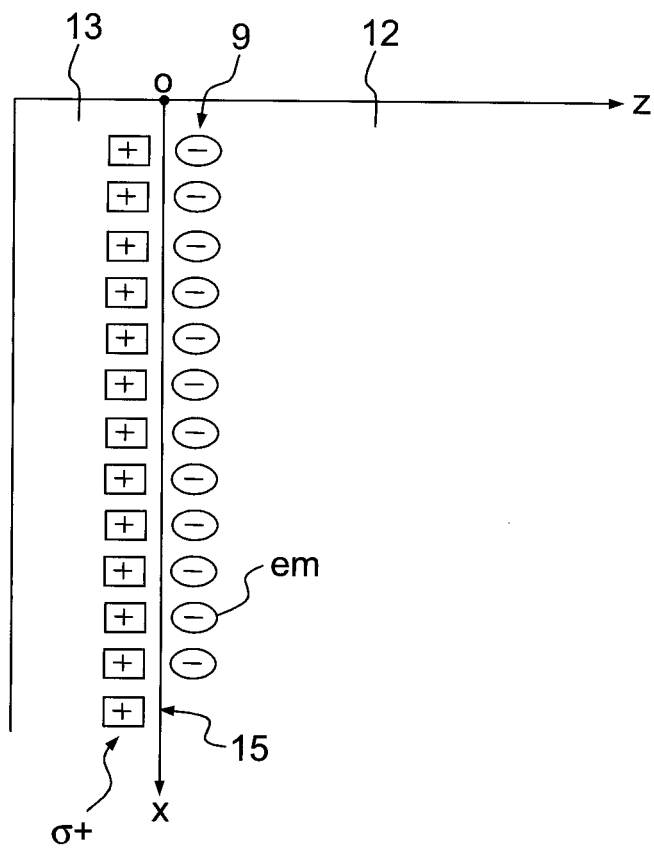


FIG. 2

2/8

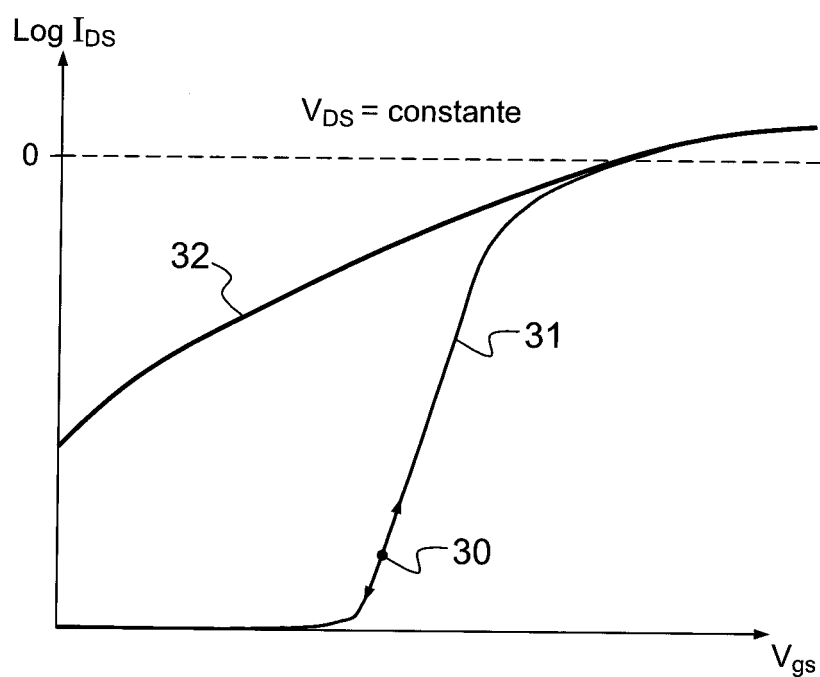


FIG.3

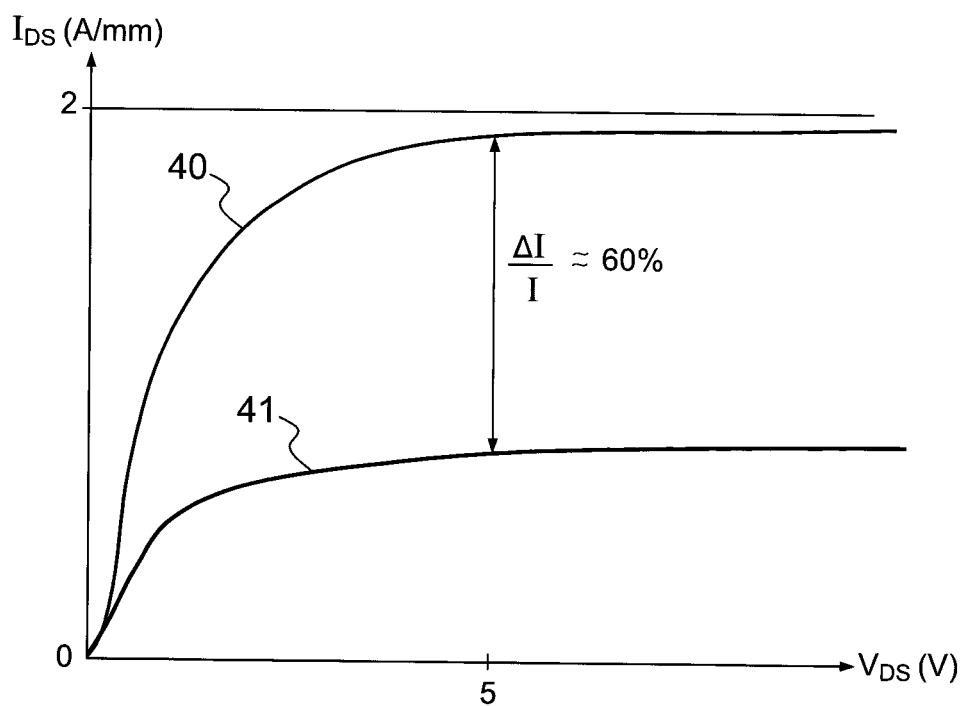


FIG.4

3/8

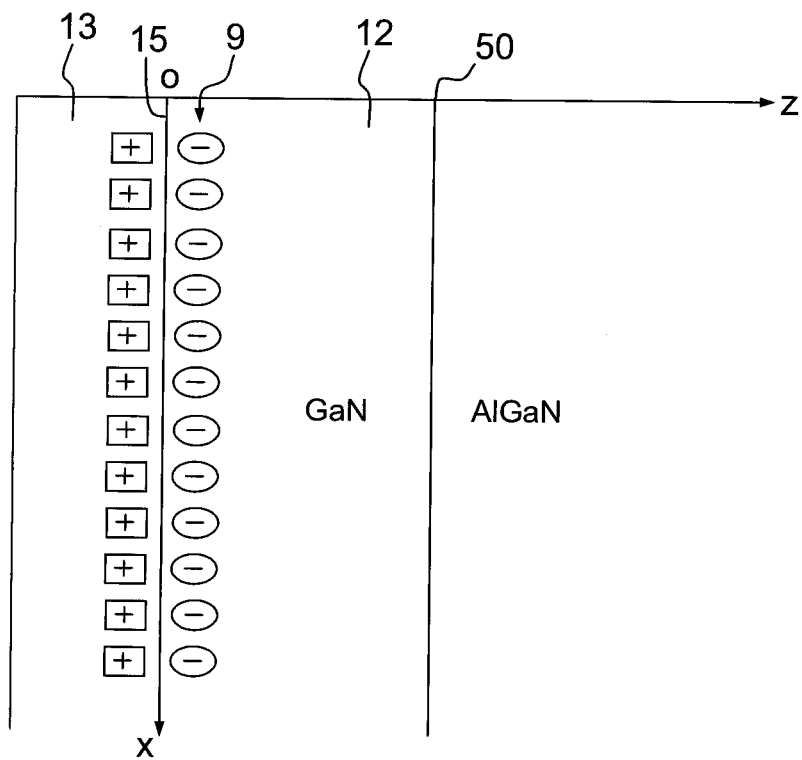


FIG. 5

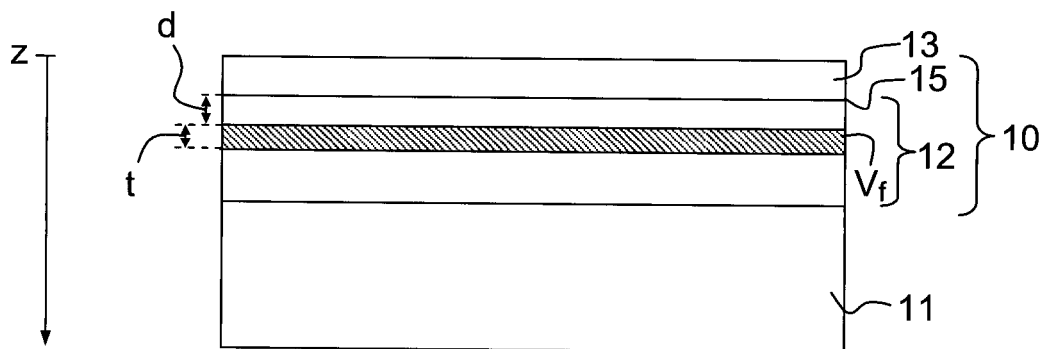


FIG. 6

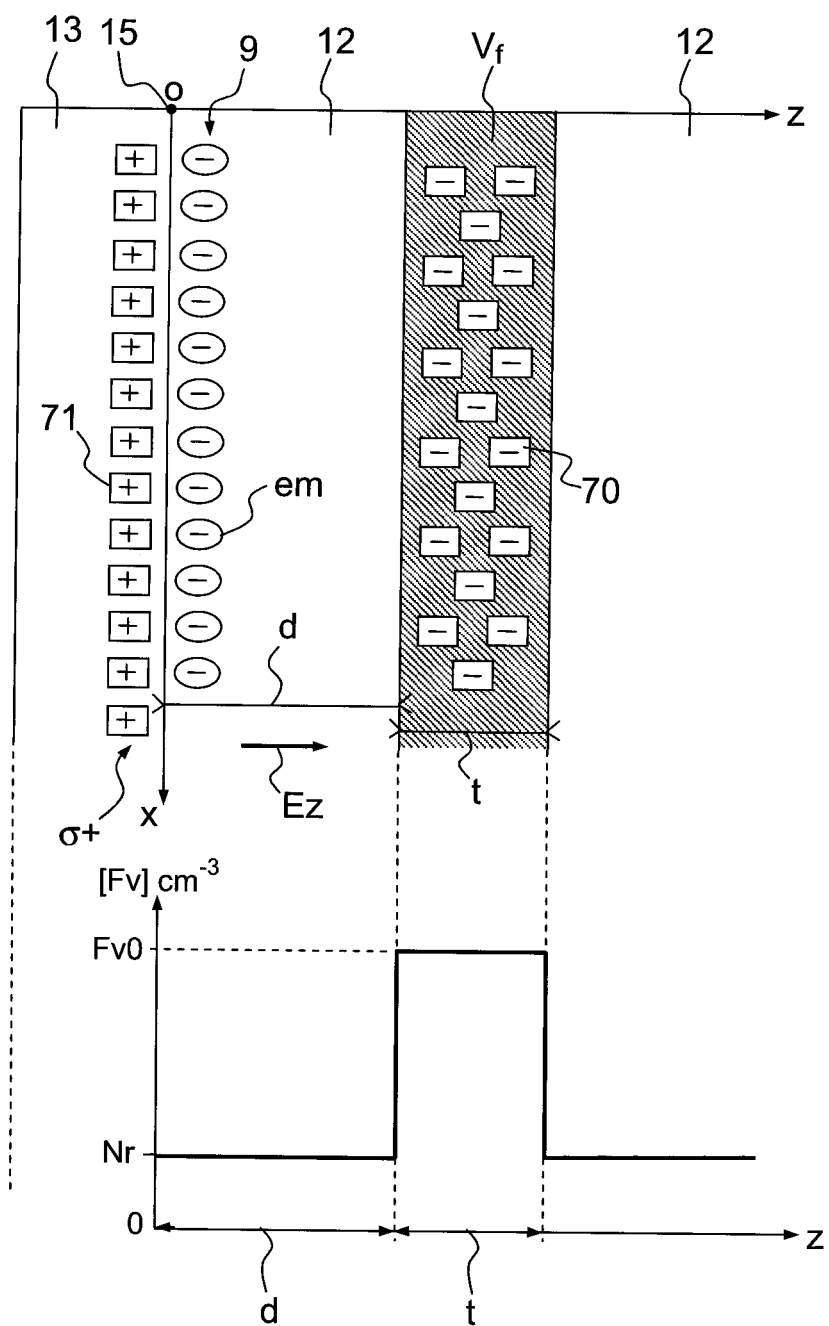


FIG.7

5/8

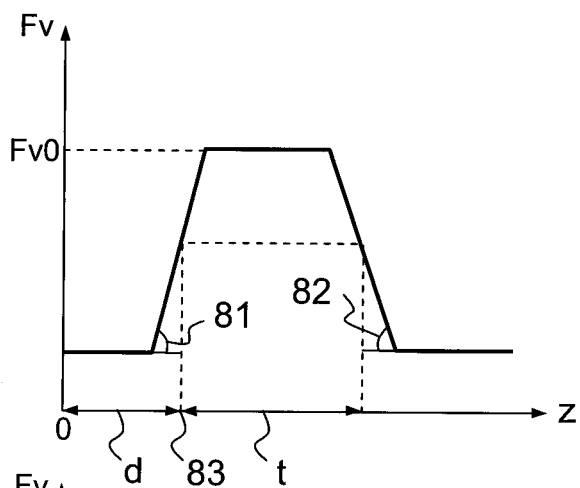


FIG. 8a

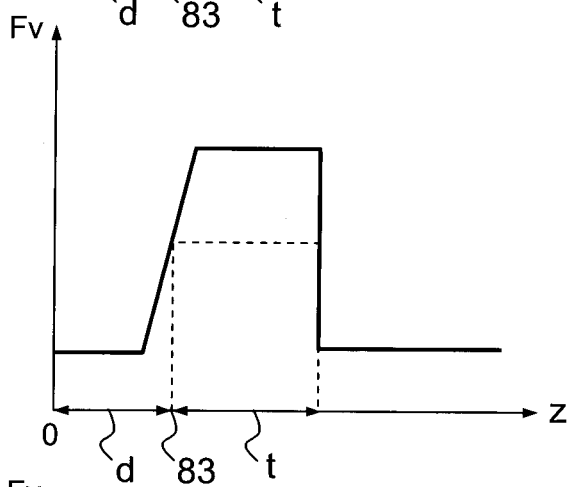


FIG. 8b

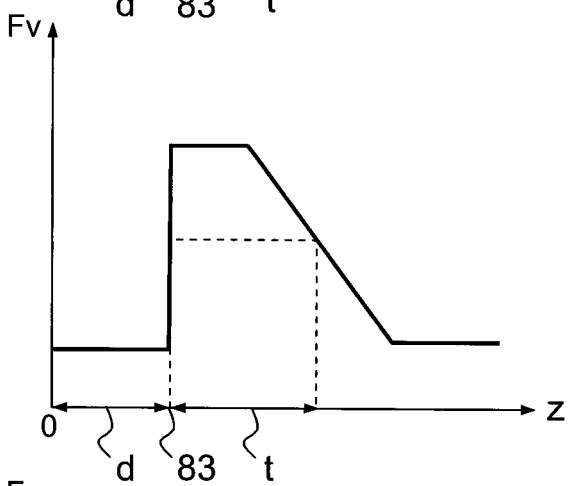


FIG. 8c

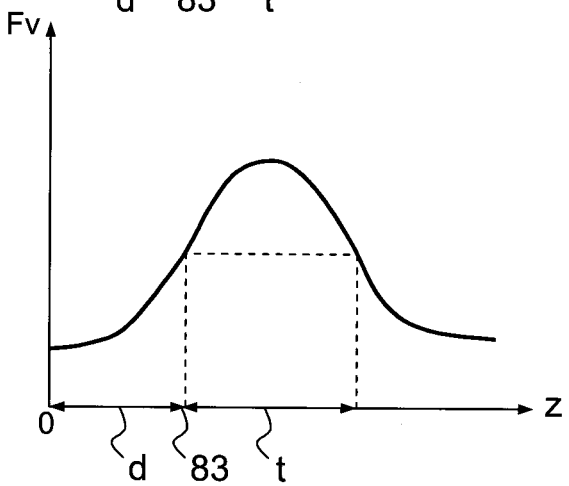
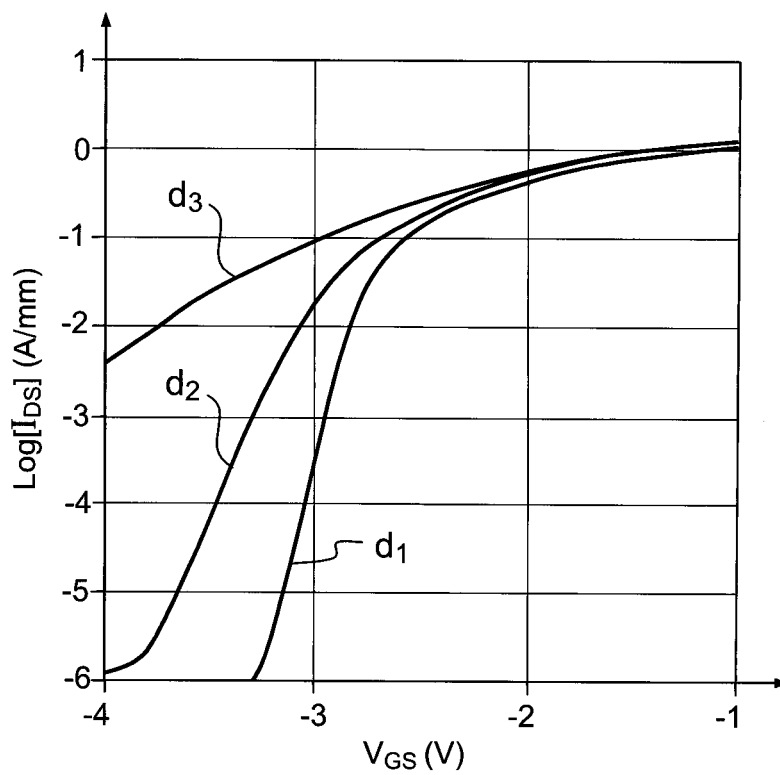
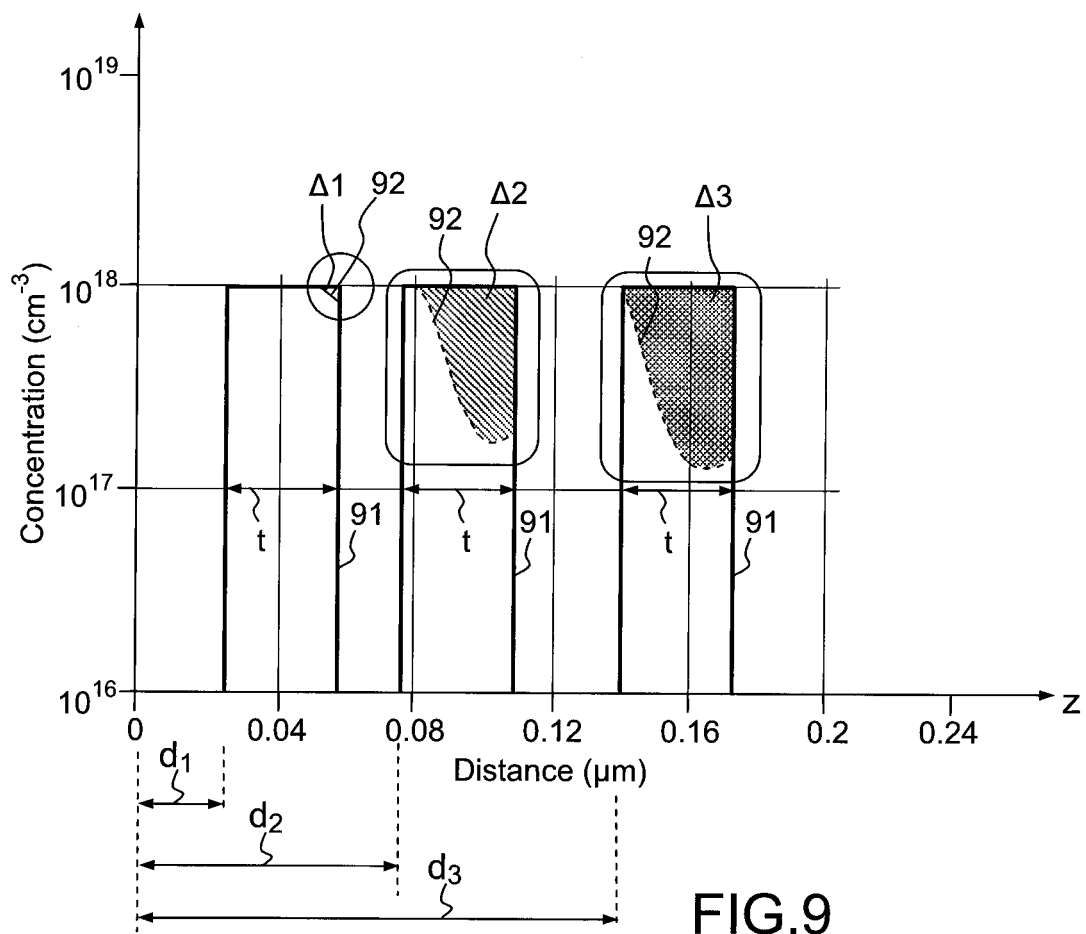


FIG. 8d

6/8



7/8

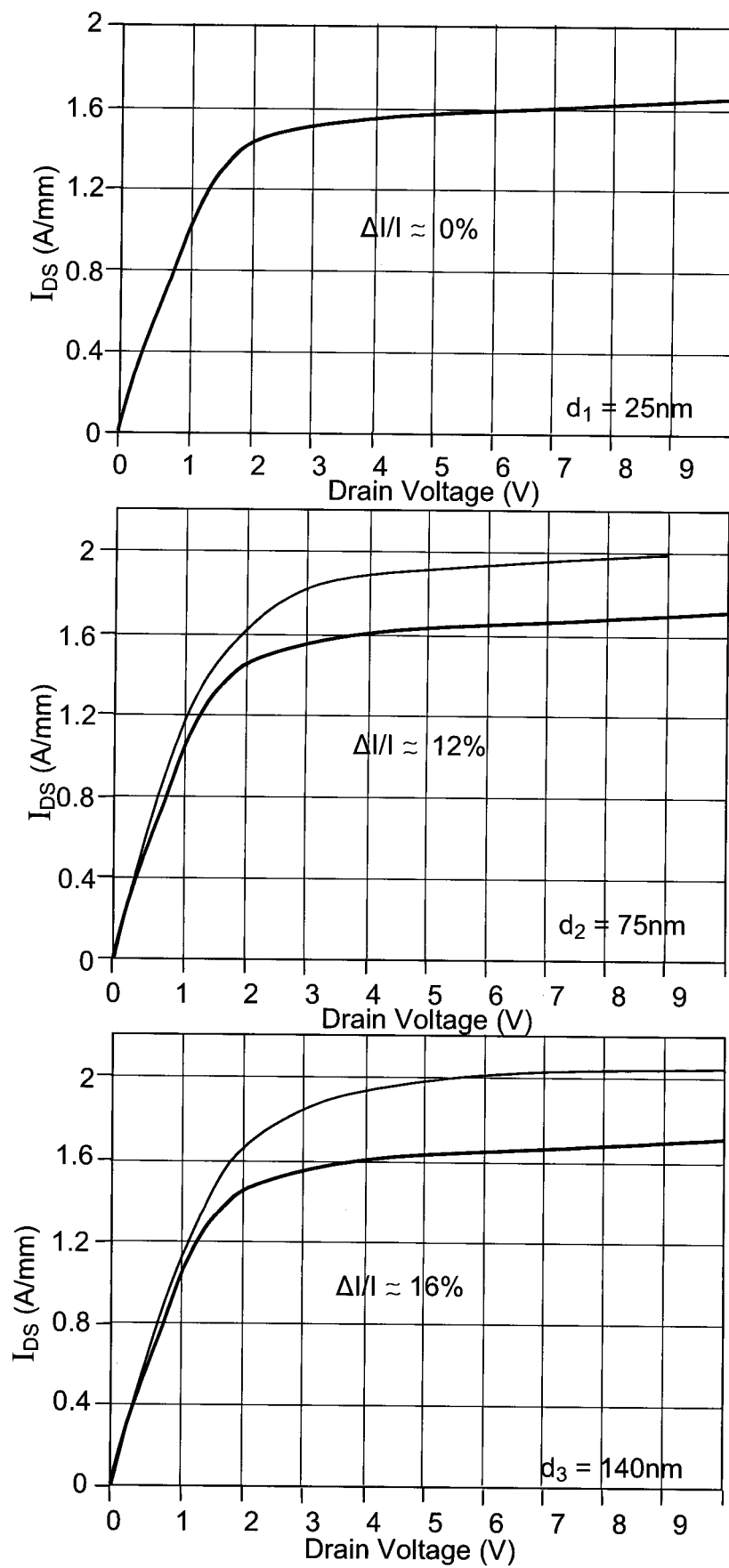


FIG.11

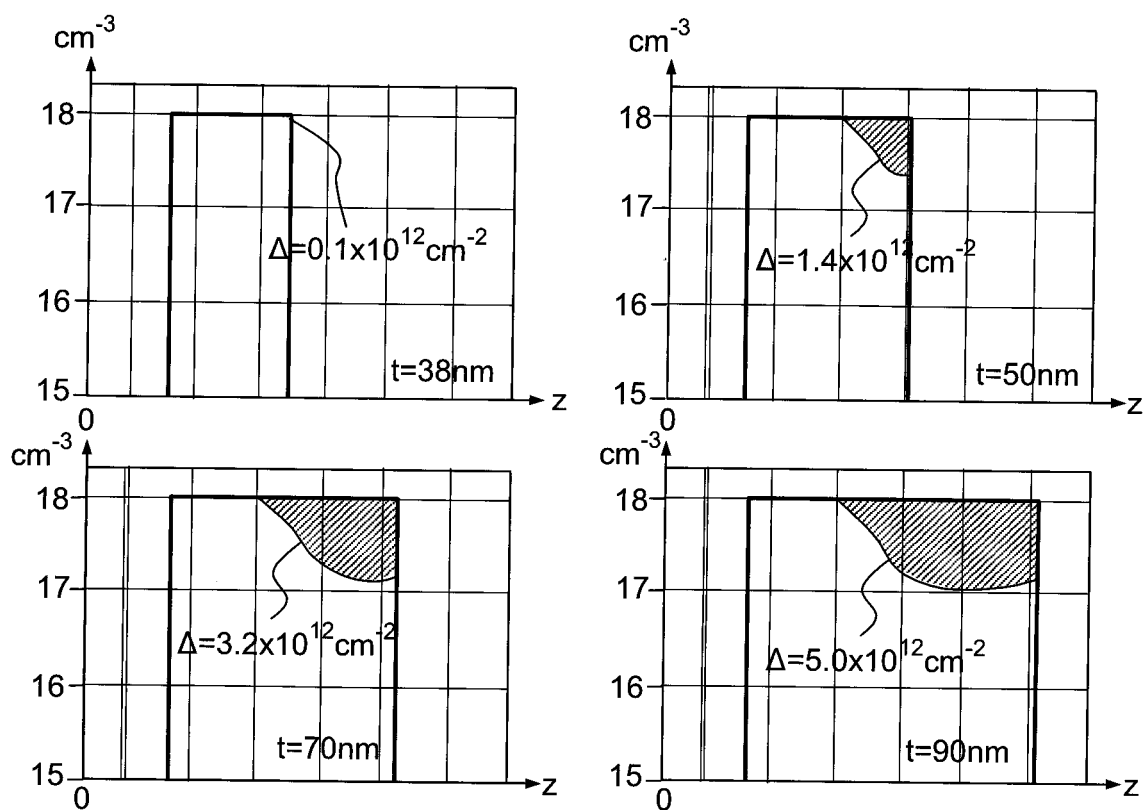


FIG.12

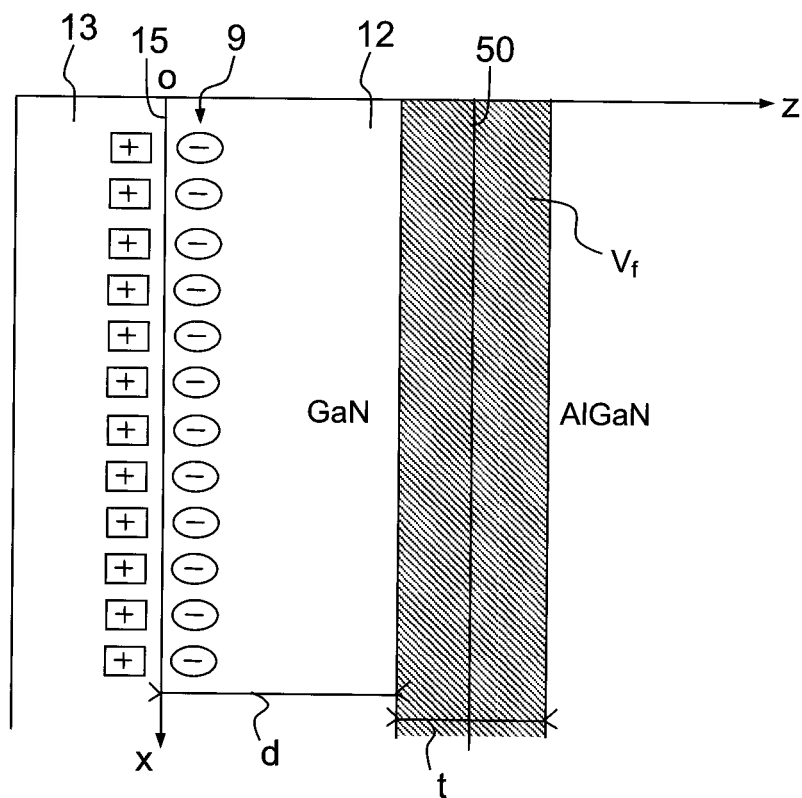


FIG.13



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

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

N° d'enregistrement  
national

FA 797696  
FR 1400825

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		
A	US 2013/328106 A1 (KOKAWA TAKUYA [JP] ET AL) 12 décembre 2013 (2013-12-12) * alinéas [0080] - [0089]; figure 7 *	1-14	H01L29/778  DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)  H01L
A	US 2013/200389 A1 (LEE JAE HOON [KR]) 8 août 2013 (2013-08-08) * alinéas [0057] - [0066]; figures 3-8 *	1-14	
A	US 2010/289067 A1 (MISHRA UMESH [US] ET AL) 18 novembre 2010 (2010-11-18) * alinéas [0025] - [0035]; figures 2-9 *	1-14	
A	US 2012/025268 A1 (ICHIKAWA OSAMU [JP]) 2 février 2012 (2012-02-02) * alinéas [0044] - [0099]; figure 2 *	1-14	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
23 janvier 2015		Franche, Vincent	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		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.	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		D : cité dans la demande	
A : arrière-plan technologique		L : cité pour d'autres raisons	
O : divulgation non-écrite		.....	
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1400825 FA 797696**

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 **23-01-2015**

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 2013328106 A1	12-12-2013	CN 103430295 A	04-12-2013
		EP 2711975 A1	26-03-2014
		JP 5624940 B2	12-11-2014
		JP 2012243868 A	10-12-2012
		US 2013328106 A1	12-12-2013
		WO 2012157229 A1	22-11-2012
-----			
US 2013200389 A1	08-08-2013	KR 101256466 B1	19-04-2013
		US 2013200389 A1	08-08-2013
-----			
US 2010289067 A1	18-11-2010	CN 102460710 A	16-05-2012
		US 2010289067 A1	18-11-2010
		US 2014342512 A1	20-11-2014
		WO 2010132587 A2	18-11-2010
-----			
US 2012025268 A1	02-02-2012	CN 102369597 A	07-03-2012
		JP 2010263197 A	18-11-2010
		KR 20110129891 A	02-12-2011
		TW 201101461 A	01-01-2011
		US 2012025268 A1	02-02-2012
		WO 2010116700 A1	14-10-2010
-----			