(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international

(43) Date de la publication internationale
18 octobre 2012 (18.10.2012)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2012/140271 A1

(51) Classification internationale des brevets :
H01L 29/778 (2006.01) *H01L 29/15* (2006.01)
H01L 29/201 (2006.01) *H01L 29/205* (2006.01)
H01L 23/29 (2006.01) *H01L 29/04* (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2012/056945

(22) Date de dépôt international :
16 avril 2012 (16.04.2012)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1101167 14 avril 2011 (14.04.2011) FR

(71) Déposants *(pour tous les États désignés sauf US)* : **THALES** [FR/FR]; 45 rue de Villiers, F-92200 Neuilly Sur Seine (FR). **CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE** [FR/FR]; 3, rue Michel Ange, F-75016 Paris (FR). **ALCATEL LUCENT** [FR/FR]; 3, avenue Octave Gréard, F-75007 Paris (FR). **UNIVERSITÉ LILLE I SCIENCES ET TECHNOLOGIES** [FR/FR]; Cité scientifique, Avenue Paul Langevin, F-59655 Villeneuve d'Ascq (FR). **GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY** [US/US]; GTRI - 505 10th Street, Atlanta, Georgia 30332-0415 (US).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants *(pour US seulement)* : **OUGAZZADEN, Abdallah** [FR/FR]; 36, rue du Longeau, F-57133 Marly (FR). **POISSON, Marie-Antoinette** [FR/FR]; 32, avenue Georges V, F-75008 Paris (FR). **RAVINDRAN, Vinod** [FR/FR]; 3, rue Lamartine, F-94450 Limeil-Brevannes (FR). **SOLTANI, Ali** [FR/FR]; 13, rue Docteur Schweitzer, F-59491 Villeneuve d'Ascq (FR). **DE JAEGER, Jean-Claude** [FR/FR]; 62, avenue Verdun, F-59155 Faches Thumesnil (FR).

(74) Mandataires : **ESSELIN, Sophie** et al.; Marks & Clerk France, Conseils en Propriété Industrielle, Immeuble VISIUM, 22 avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil Cedex (FR).

(81) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible)* : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : HEMT TRANSISTORS CONSISTING OF (III-B)-N WIDE BANDGAP SEMICONDUCTORS COMPRISING BORON

(54) Titre : TRANSISTORS HEMTS COMPOSES DE SEMI - CONDUCTEURS BORES A LARGE BANDE INTERDITE (III-B) -N

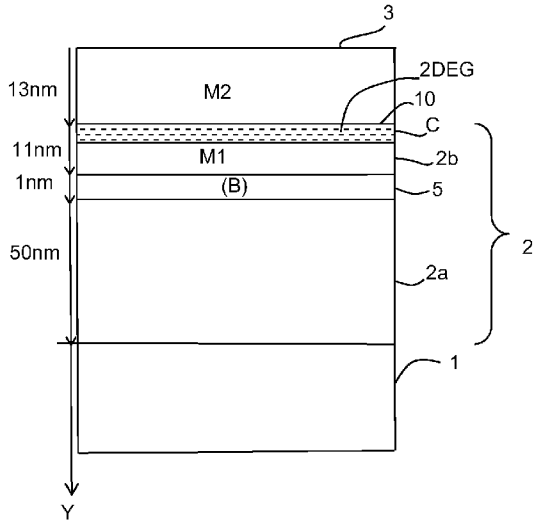


Fig. 2

(57) Abstract : The invention relates to an electronic structure of an HEMT transistor, including: a heterojunction consisting of a first so-called buffer layer (2), a first wide bandgap semiconductor material (M1), and a second layer (3) consisting of a second wide bandgap semiconductor material (M2), the width of the bandgap Eg_2 of which is greater than that Eg_1 of the first material; and a two-dimensional electron gas (2DEG) flowing in a channel (C) defined in the first layer (2) under the interface (10) of the heterojunction. The first layer also includes a layer (5) of a BGaN material under the channel (C), the mean boron concentration of which is at least 0.1%, thereby improving the electrical performance of the transistor. The invention can be used in microwave power components.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2012/140271 A1

KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible)* : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— *avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))*

Une structure électronique de transistor HEMT, comprend une hétérojonction formée d'une première couche dite tampon (2), d'un premier matériau semi-conducteur à large bande interdite (M1), et d'une deuxième couche (3) d'un deuxième matériau semi-conducteur à large bande interdite (M2), avec une largeur de bande interdite Eg_2 supérieure à celle Eg_1 du premier matériau, et un gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) circulant dans un canal (C) délimité dans la première couche (2) sous l'interface (10) de l'hétérojonction. La première couche comprend en outre une couche (5) d'un matériau BGaN sous le canal (C), avec une concentration moyenne en bore d'au moins 0,1 %, améliorant les performances électriques du transistor. Application aux composants hyperfréquence de puissance.

TRANSISTORS HEMTS COMPOSES DE SEMI-CONDUCTEURS BORES A LARGE BANDE INTERDITE (III-B)-N

DOMAINE DE L'INVENTION

L'invention concerne une structure électronique de transistor à effet de champ à hétérojonction, dit transistor HEMT (pour *High Electron Mobility Transistor*) à base d'hétérostructures formées par des matériaux semi-conducteurs à large bande interdite, dits matériaux grands gaps.

DESCRIPTION DE L'ETAT DE L'ART

Les matériaux semi-conducteurs à large bande interdite sont des matériaux semi-conducteurs qui présentent une largeur de bande interdite supérieure à environ 2 eV, ce qui correspond au domaine des longueurs d'onde micrométriques, du proche infrarouge à l'UV profond. Ils comprennent typiquement les nitrures d'élément III, mais aussi le diamant et les oxydes comme l'oxyde de zinc.

Un nitrure d'élément III est une composition d'un ou plusieurs éléments de la colonne III, par exemple, B, Al, Ga, In, qui forment un alliage avec l'azote N (élément V). On a des compositions binaires, tel que GaN, AlN, BN ; ou des alliages ternaires, à deux éléments III tel que $Al_xGa_{1-x}N$, $In_xAl_{1-x}N$, $B_xGa_{1-x}N$, $B_xAl_{1-x}N$ quaternaires à 3 éléments III $B_xAl_yGa_{1-x-y}N$, voire quinquénaires. Ces alliages sont réalisés par substitution partielle de l'un des éléments III par un autre élément de la même colonne III. Dans ces écritures de composition des matériaux, x et y sont des fractions comprises entre 0 et 1.

Les transistors HEMT réalisés à partir de structures formées d'un empilement de nitrures d'éléments III, et plus généralement de matériaux semi-conducteurs grand gap, présentent des propriétés très intéressantes pour les applications hyperfréquence et/ou nécessitant de la puissance. Ces structures utilisent de manière connue différentes compositions III-N, en couches empilées. Chaque composition est choisie pour ses propriétés électroniques particulières, par exemple la masse effective des électrons, leur mobilité ou encore la largeur de la bande interdite. Des considérations sur les paramètres de maille sont aussi prises en compte dans le choix des compositions, puisqu'ils déterminent les possibilités de croissance de matériaux avec des bonnes qualités structurales. L'empilement des

matériaux conduit à une structure électronique qui se caractérise notamment par le diagramme des bandes d'énergie correspondant. Le choix des matériaux III-N et leurs compositions pour réaliser une structure électronique de transistor HEMT répond ainsi à des considérations sur les largeurs de bande interdite, en fonction des propriétés et performances recherchées et sur les accords de maille qui conditionnent l'obtention de couches de matériaux à moindre défauts structuraux.

En particulier, pour la conception de transistor à effet de champ de type HEMT, une structure électronique connue, de matériaux semi-conducteurs à grande largeur de bande interdite, est une hétérostructure comprenant la superposition d'une couche d'un premier matériau semi-conducteur à large bande interdite (la zone de barrière) sur une couche d'un deuxième matériau semi-conducteur aussi à large bande interdite (la zone active) mais dans laquelle le premier matériau à un gap supérieur à celui du deuxième matériau.

Le contexte de l'invention étant lié à ces hétérostructures formées d'empilement de couches de matériaux semi-conducteurs à large bande interdite le terme "matériau", utilisé seul, est à comprendre comme étant un matériau semi-conducteur à large bande interdite Eg dans la suite de l'exposé.

Comme illustré schématiquement sur la figure 1, une structure électronique de transistor HEMT est constituée essentiellement de trois matériaux :

- un substrat 1,
- une couche 2 dite couche tampon, d'un matériau M_1 présentant un gap Eg_1,
- une couche 3 dite couche barrière, d'un matériau M_2 présentant un gap Eg_2, où Eg_1 est inférieur à Eg_2.

Cette structure permet la formation et la circulation d'un gaz bidimensionnel d'électrons 2DEG dans un canal C formé dans le matériau M1 à plus petit gap Eg_1, à l'interface 10 (ou interface M2-M1), entre les deux matériaux M2/M1 de l'hétérojonction. Comme illustré sur la figure 3, ce canal correspond à un confinement des électrons dans un puits quantique QW qui

se forme à l'interface 10 (ou interface M2-M1) entre les deux matériaux M2/M1.

Ces structures à hétérojonction à base d'un empilement de matériaux semi-conducteurs à grande largeur de bande interdite offrent des perspectives particulièrement intéressantes quant à l'obtention de transistors rapides HEMT (High Electron Mobility Transistor) performants pour les applications hyperfréquence de puissance (allant de 2 GHz à 100 GHz voire au-delà), et font l'objet de nombreuses recherches afin d'obtenir les structures les plus favorables qui associent une forte densité de gaz d'électrons bidimensionnel n_s à une mobilité des porteurs la plus élevée possible, dans le but d'obtenir des transistors à fort courant de drain, condition nécessaire pour une amplification en puissance efficace.

Une propriété importante de l'hétérojonction M2/M1, est le bon confinement des électrons dans le puits quantique QW, crucial pour l'efficacité du transport électronique du transistor.

Pour améliorer ce confinement, on cherche généralement à augmenter la résistivité du matériau M1 de la couche tampon, pour éviter les fuites d'électrons depuis le canal C vers le substrat qui créent une conduction parallèle. Il est en effet difficile d'obtenir un matériau III-V naturellement résistif. Dans ce contexte, on a proposé des hétérostructures insérant sous la couche canal dans le matériau M1, une couche d'un autre matériau avec un gap plus élevé que celui du matériau M1, et éventuellement dopé Fe. Ces hétérostructures se montrent en pratique décevantes, lors de l'utilisation en hyperfréquence, du fait d'une augmentation significative de la quantité d'impuretés dans la structure, créant de manière irréversible des pièges, sources de dégradation des performances du transistor. Celles-ci sont observées sur la caractéristique Ids(Vds) par une dégradation du courant.

Une autre voie d'amélioration du confinement du gaz bidimensionnel d'électrons pour les structures à hétérojonction M2/M1, avec AlGaN/GaN, a été proposée dans la publication IEEE Electron Device Letters Vol.27, N°.1, Janvier 2006, "*AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors with an InGaN Back-Barriers*" de T. Palacios et al. Elle consiste en l'insertion d'une couche mince d'InGaN sous la couche GaN tampon de la structure HEMT conventionnelle AlGaN/GaN. Cette publication montre que l'alliage InGaN, bien qu'ayant un plus petit gap que le GaN, accroît le niveau de la

bande de conduction de la structure, grâce à des effets importants de polarisation électrostatique dans ce type de matériau. La couche InGaN forme ainsi une barrière électrostatique qui permet un confinement plus efficace du gaz d'électrons bidimensionnel dans le canal de GaN.

Cependant, la mise en œuvre pratique, industrielle, de cette solution s'avère difficile, compte-tenu des températures très différentes à utiliser pour la croissance des différents matériaux de cette structure. Plus précisément, la croissance d'InGaN s'effectue à une température autour de 700°C, bien inférieure à celles du GaN ou de l'AlGaN, qui se situent autour de 1000°C et 1300°C respectivement.

Or il n'est pas possible d'envisager d'abaisser la température de croissance du GaN, car cela conduirait à réduire ses qualités structurales et électroniques. Aussi, l'incorporation d'aluminium pour former la couche AlGaN impose de toute façon d'aller-au-delà de 1000°C.

Il n'est pas possible non plus d'envisager de passer, en quelques fractions de seconde, à l'interface InGaN/GaN, de 700°C à 1000°C : cela aurait des effets très néfastes sur les propriétés électroniques du matériau GaN et structurales du matériau InGaN avec des risques de cassures notamment.

La présente invention propose une nouvelle voie pour améliorer le confinement du gaz bidimensionnel d'électrons dans le canal.

Dans l'invention on s'est intéressé aux études rapportées dans la publication de A. Ougazzaden et al, "Progress on new wide bandgap materials BGaN, BgaAlN and their potential applications", Proc. Of SPIE Vol. 6479 (2007) conduites sur les qualités électriques et structurales de minces couches de BGaN. Il ressort de ces études que l'incorporation de bore jusqu'à 2% augmentait significativement la résistivité et la mobilité des porteurs de charge par rapport au matériau GaN. Ces deux propriétés électriques sont corrélées à une très bonne qualité cristalline de la structure des matériaux BGaN. Cette publication montre qu'avec une composition de bore d'au moins 1%, la couche BGaN peut être caractérisée comme semi-isolante ($>10^2$ ohms.cm) et peut donc être utilisée comme couche tampon dans une structure HEMT. Comme l'incorporation du bore est uniforme en volume, l'épaisseur de la couche BGaN peut être très mince ou épaisse (de quelques dixièmes de nanomètres à quelques microns). Par ailleurs, le

BGaN offre de bonnes caractéristiques en terme de correspondance de maille avec les substrats de croissance usuels (Al_2O_3, SiC (4H-6H), Si (111, 100, 110), GaN (monocristallin), substrats composites, ou à grand gap comme l'AlN ou le diamant poly- ou monocristallin) qui présentent une bonne conductivité thermique.

En outre, comme détaillé dans la publication "*Bandgap bowing in BGaN thin films*" de A.Ougazzaden et al, Applied Physics letters 93, 083118 (2008), le ternaire BGaN possède une largeur de bande interdite inférieure à celle du binaire GaN, pour de faibles taux d'incorporation de bore, ainsi qu'une polarisation électronique du matériau importante, à l'image de l'InGaN.

RESUME DE L'INVENTION

Dans l'invention, on a ainsi eu l'idée d'utiliser une couche BGaN semi-isolante, comme barrière électrostatique, plutôt que l'InGaN sous le canal. On bénéficie alors d'un double effet, de barrière de potentiel favorisant le confinement des électrons dans le puits de potentiel, par la forte polarisation électronique de la couche BGaN, et d'augmentation de la résistivité de la structure sous le canal, empêchant la fuite d'électrons vers le substrat, par le caractère résistif de cette couche.

Ces deux effets sont obtenus pour de faibles quantités de bore, à partir de 0,1%, permettant une mise en œuvre aisée d'une telle structure avec les techniques de l'état de l'art.

L'invention concerne donc une structure de transistor HEMT, comprenant

-au moins une première couche dite tampon, d'un premier matériau semi-conducteur à large bande interdite Eg_1, et une deuxième couche d'un deuxième matériau semi-conducteur à large bande interdite Eg_2, avec une largeur de bande interdite Eg_2 supérieure à celle Eg_1, et

-un gaz bidimensionnel d'électrons qui circule dans un canal délimité dans la première couche à l'interface entre la première couche et la deuxième couche.

Selon l'invention, un matériau BGaN avec une concentration moyenne en bore d'au moins 0,1%, semi-isolant, est inséré dans la couche tampon sous forme d'au moins une couche sous la couche canal, modifiant le

diagramme des bandes d'énergie par création d'une barrière de potentiel électrostatique favorisant le confinement du gaz bidimensionnel d'électrons.

Cette couche BGaN peut être réalisée sous forme d'une couche de BGaN dans la couche tampon, sous le canal, qui présente une concentration uniforme de bore sur toute l'épaisseur ; ou qui présente une concentration graduée ou en marches d'escalier sur l'épaisseur, partant d'une concentration nulle, et croissante avec l'épaisseur, vers le canal.

Quand la couche tampon est une couche du binaire GaN, ou d'un alliage de GaN, des clusters de BGaN peuvent être réalisés directement dans la couche tampon.

Cette couche de confinement peut encore se présenter sous forme d'un super réseau de couches très fines alternant successivement du BGaN et du GaN ou de l'AlN.

L'invention concerne aussi une utilisation d'autres couches de BGaN à des fins de perfectionnements de la structure électronique du transistor HEMT.

Dans un premier perfectionnement, la structure comprend une couche de BGaN comme couche de nucléation, permettant d'améliorer la qualité structurale de la deuxième couche obtenue par croissance de matériau à partir de cette couche de nucléation. Ce sont ici les qualités structurales du BGaN qui sont exploitées.

Dans un autre perfectionnement, la structure comprend une couche de BGaN ou de BN comme couche de passivation en surface, pour minimiser l'influence des pièges éventuels en surface. Ce sont ici les propriétés résistives du BGaN ou du BN qui sont avantageusement exploitées.

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention sont détaillés par la description de plusieurs modes de réalisation de l'invention, et en référence aux dessins annexés, dans lesquels :

- la figure 1 illustre schématiquement une structure électronique pour un transistor HEMT, selon l'état de l'art;
- les figures 2 et 3 illustrent respectivement, une structure électronique pour transistor HEMT dans un premier exemple de mise en œuvre de l'invention, et un diagramme correspondant

des bandes d'énergie avec l'emploi d'une couche mince de BGaN et la formation d'une barrière électrostatique;

- les figures 4 et 5 illustrent respectivement, une structure électronique pour transistor HEMT dans un second exemple de mise en œuvre de l'invention, et un diagramme correspondant des bandes d'énergie avec l'emploi d'une couche graduée en composition de bore et la formation d'une barrière électrostatique dont le sommet se trouve à l'extrémité côté gaz;
- les figures 6 et 7 illustrent respectivement, une structure électronique pour transistor HEMT dans un troisième exemple de mise en œuvre de l'invention, et un diagramme correspondant des bandes d'énergie avec l'emploi d'une couche épaisse de BGaN et la formation d'une barrière électrostatique plus large;
- la figure 8 représente une structure de couche BGaN de type super-réseaux, qui peut être utilisée dans les structures illustrées aux figures 2, 4 et 6;
- la figure 9 illustre une autre structure de couche BGaN du type à incorporations localisées en volume;
- la figure 10 illustre une structure comprenant des perfectionnements selon l'invention ;
- les figures 11 à 13 illustrent trois exemples pratiques d'une structure de type AlGaN/GaN avec une insertion d'une couche d'un matériau BGaN selon l'invention, respectivement en une couche fine à concentration uniforme de Bore, en une couche épaisse à concentration uniforme de Bore et en une couche épaisse avec un gradient de concentration de Bore;
- la figure 14 illustre les courbes obtenues par simulation de la structure à couche fine de BGaN de la figure 11, avec dans une fenêtre supérieure (a) la courbe de niveau d'énergie de la bande de conduction de la structure suivant l'axe Y correspondant à l'épaisseur de la structure, en partant de la surface vers le substrat, dans la fenêtre inférieure (b), la courbe de concentration des porteurs dans la structure suivant cet axe Y;

- la figure 15 illustre ces mêmes courbes de niveau d'énergie de la bande de conduction, et de concentration des porteurs, mais obtenues par simulation de la structure à couche épaisse de BGaN, avec concentration uniforme de bore illustrée à la figure 12, et celle avec concentration graduelle de bore illustrée à la figure 13;
- la figure 16 reprend sur le même schéma les courbes des niveaux d'énergie de la bande de conduction pour les trois structures des figures 11, 12 et 13; et
- la figure 17 reprend sur le même schéma les courbes de concentration de porteurs pour chacune des trois structures des figures 11 à 13.

DESCRIPTION DETAILLEE

À titre liminaire on remarquera que les figures illustrant les empilements de couches de la structure électronique ne sont pas à l'échelle. Notamment, les épaisseurs ne sont pas représentées de manière proportionnelle. Par ailleurs, dans un souci de simplification des références, les éléments communs à toutes les structures portent les mêmes références.

L'invention va être plus particulièrement décrite dans un exemple non limitatif d'application à une structure électronique pour transistor HEMT, à base de nitrures d'éléments III, et plus particulièrement, à hétérojonction AlGaN/GaN. AlGaN est le matériau M2 de la couche barrière présentant un gap Eg_2 plus grand que celui, Eg_1 du premier matériau M1 de la couche tampon, qui est le GaN.

Selon l'invention, la structure comprend une couche BGaN dans la couche tampon, sous le canal.

Un premier exemple d'une structure électronique selon l'invention est illustré sur la figure 2. Elle comprend l'empilement de couches suivant dans l'ordre de croissance (d'empilement) :

- un substrat 1, semi-isolant, spécifique de la filière, c'est-à-dire accordé ou partiellement accordé en maille avec les matériaux formant l'hétérostructure et obtenus par croissance cristallographique à partir de ce substrat. Différents types de substrats sont couramment utilisés : des substrats bas coût tels que Si, avec des orientations cristallines (111), (100),

(110), Al_2O_3 monocristallin, le SiC (4H, 6H) dont le coût est élevé. Les substrats composites tels que SopSiC (Silicium-Oxyde-SiC polycristallin), SiCopSiC (SiC monocristallin- Oxyde-SiC polycristallin), le diamant polycristallin ; les substrats ZnO, les substrats SiC (dans une moindre mesure) et les substrats en diamant monocristallin sont des matériaux qui présentent de bonnes propriétés pour la dissipation thermique. On peut également citer les substrats dits "pseudo substrats" de GaN, AlN, ZnO ou encore les substrats souples, tels que le Kapton, PTFE (polytétrafluoroéthylène) sur lequel on a reporté l'épimatériau. La liste des substrats ne se prétend pas exhaustive. Le choix du substrat est étroitement lié au cahier des charges de l'application, en tenant compte du coût, des performances attendues, ainsi que du paramètre de maille des couches de matériaux de l'hétérostructure envisagée.

On notera que ce substrat peut-être un substrat temporaire, utilisé pour la réalisation de l'épitaxie, par croissance de matériaux. Il peut ensuite être enlevé par toute technique connue, pour reporter la structure ainsi détachée de son substrat de croissance, sur un autre substrat, par exemple un verre, un substrat souple ou un substrat ayant une bonne conductivité thermique. Une structure électronique peut ainsi être provisoirement sans substrat, ou avoir un substrat final, dans le composant, qui n'est pas le substrat de croissance.

- une couche tampon 2 ("template" ou "buffer" dans la littérature anglo-saxonne) d'un nitrure, dans l'exemple GaN, composée généralement d'une première couche GaN 2a qui sert de manière connue, de matériau de base de bonne qualité cristallographique, pour la croissance cristallographique d'une deuxième couche 2b de GaN ayant des qualités structurales excellentes. En effet, le gaz bidimensionnel d'électrons va se former dans cette couche proche de l'hétérojonction.

- une couche barrière 3 formée d'un matériau à plus grand gap. Dans l'exemple cette couche est une composition grand gap d'AlGaN ou d'InAlN, telle que $Al_{0,32}Ga_{0,68}N$ (x=0,32). Ce pourrait être aussi une couche d'AlN. En pratique la couche barrière peut comprendre plusieurs couches élémentaires (non illustré), notamment une couche dopée, appelée couche donneuse qui fournit les électrons libres qui vont participer à former le gaz bidimensionnel d'électrons dans la couche tampon, et une couche non

intentionnellement dopée, appelée espaceur, entre la couche dopée et la couche tampon, qui favorise la mobilité des électrons dans le canal de transport du gaz bidimensionnel d'électrons. On n'envisage pas de dopage dans les structures nitrures... le dopage est souvent inutile, les électrons venant essentiellement de la surface par effet de polarisation piézoélectrique et de génération spontanée.

-une couche de passivation 4 ("cap layer" dans la littérature anglo-saxonne) comme illustrée sur la figure 1 peut être prévue (non illustrée sur la figure 2), formée dans un matériau présentant une largeur de bande interdite plus faible que le matériau M2 de la couche barrière, et qui est fortement dopée type n, pour permettre la réalisation des contacts ohmiques de source et drain (non représentés) du transistor HEMT. C'est par exemple une couche de GaN fortement dopée type n. La couche de passivation sera peu utilisée lorsque la qualité structurale de la couche est bonne. Elle permet surtout d'empêcher l'oxydation de l'Aluminium dans la couche barrière. Si passivation il y a, un dopage éventuel pourra être réalisé sous les contacts exclusivement.

Selon l'invention, la structure comprend en outre une couche 5 de BGaN dans la couche tampon 2, sous le canal C.

Dans l'exemple illustré d'une couche GaN 2a contenant le canal C, obtenue par recroissance d'une couche GaN 2b, comme expliqué ci-dessus, la couche BGaN est insérée entre la couche GaN 2a et la couche GaN 2b.

L'expression couche BGaN ou matériau BGaN est à comprendre dans toute la description comme englobant aussi bien le ternaire BGaN, que des alliages d'ordres plus élevés, c'est-à-dire que cela peut aussi être un quartenaire BInGaN, BAlGaN, ou un quintenaire BAlInGaN. Cette remarque s'applique aux autres matériaux de la structure.

Dans ce premier exemple de structure, la couche BGaN est une couche mince, d'épaisseur de l'ordre de 1 nanomètre, avec une concentration uniforme en bore. Le matériau BGaN est un ternaire, avec une concentration en bore de l'ordre de 1 á 4%, ce qui s'écrit : $B_{0,01}Ga_{0,96}N$,$B_{0,04}Ga_{0,96}N$ respectivement.

Le diagramme des bandes d'énergie obtenu par modélisation, pour cette structure, est illustré sur la figure 3. Il montre les niveaux

d'énergie, en électrons volts, de la bande de valence BV et la bande de conduction BC obtenus (axe vertical de gauche), ainsi que la répartition de la densité d'électrons dans la structure (en cm^{-3}) (axe vertical de droite), sur la hauteur de la structure suivant l'axe transversal Y (nanomètres). L'origine Y=0, correspond à la surface de la couche 3 (figure 2). Il met en évidence la formation du puits de potentiel triangulaire QW à l'interface 10 entre les deux matériaux AlGaN (M2) et GaN (M1). Les courbes d'énergie des bandes de valence et de conduction présentent une décroissance suivie d'une recroissance très marquées à l'endroit de l'interface 10, correspondant à la formation du puits de potentiel QW. Ce puits de potentiel confine le gaz bidimensionnel d'électrons 2DEG à l'interface, comme illustré par la courbe de répartition de la densité d'électrons représentée en pointillé sur la figure. Dans ce puits, la densité d'électrons n_s y est maximum. C'est le principe du gaz 2D lié à l'hétérojonction.

La présence de la couche BGaN 5 sous le canal C de la structure selon l'invention, se traduit en outre dans le diagramme de bandes par la création de deux pics d'énergie 11 qui correspondent aux bandes de valence et de conduction du BGaN : ces pics forment une barrière électrostatique qui rend plus difficile la fuite des électrons en dehors du puits. Le confinement des électrons dans le puits de potentiel QW à l'interface 10 est ainsi amélioré. Cette barrière est dans cet exemple assez étroite, correspondant à la faible épaisseur, 1nm dans l'exemple, de la couche BGaN 5.

La couche BGaN a un autre effet, celui d'augmenter la résistivité de la structure sous le canal, empêchant la fuite des électrons vers le substrat.

Ainsi, la couche BGaN a deux effets qui tendent chacun à améliorer le confinement du gaz bidimensionnel d'électrons : d'une part parce que la couche BGaN modifie, en l'améliorant, le diagramme de bandes d'énergie ; et d'autre part parce que la couche BGaN augmente la résistivité de la structure sous le canal, empêchant les fuites d'électrons du canal vers le substrat.

Les figures 4 et 6 représentent deux autres exemples de structure selon l'invention, et les figures 5 et 7, leurs diagrammes de bandes d'énergie respectifs. Ces figures montrent que selon la concentration et l'épaisseur de la couche BGaN, on peut augmenter et/ou élargir la barrière électrostatique

créée par la couche BGaN, améliorant le confinement du gaz bidimensionnel d'électrons.

Sur la figure 4, la couche BGaN est plus épaisse, de l'ordre de 50nm (contre 1nm dans l'exemple illustré sur la figure 2), mais avec une concentration en bore qui est abrupte, ou graduée en marches d'escalier : la concentration en bore est nulle à l'interface avec la couche 2b, et va croissante vers le canal (dans la couche 2a), par exemple jusqu'à 4%. La figure 5 du diagramme des bandes correspondant montre un effet barrière électrostatique 12 accentué et plus large. L'utilisation d'un gradient de concentration de bore sur une plus grande épaisseur de couche permet ainsi de former une barrière électrostatique plus distinctive qui va limiter davantage le mouvement des électrons en dehors du puits de potentiel.

Sur la figure 6, la couche BGaN est encore plus épaisse, de l'ordre de 100nm, mais avec une très faible concentration en bore, de l'ordre de 1% ($B_{0,01}Ga_{0,99}N$). La figure 7 du diagramme des bandes correspondant montre que l'on obtient une barrière électrostatique 13 encore plus large, en lien avec la plus grande épaisseur de la couche. Cette structure est très intéressante car on sait facilement produire une telle couche à faible concentration de bore. Et même à ces faibles concentrations de bore, les effets de barrière électrostatique et d'augmentation de la résistivité de la structure sous le canal sont observés.

En pratique, les couches de BGaN utilisées conformément à l'invention sont caractérisées par une concentration moyenne en Bore, d'au moins 0,1 %.

L'épaisseur de la couche va de préférence de 1 nanomètre à plusieurs centaines de nanomètres environ.

L'invention qui vient d'être décrite dans un exemple de structure à hétérojonction AlGaN/GaN, prévoit ainsi l'insertion d'une couche BGaN dans la couche tampon, sous le canal, pour obtenir un double effet de modification favorable du diagramme de bandes avec formation d'une barrière électrostatique d'autant plus large que la couche BGaN est large, et d'augmentation de la résistivité de la structure sous le canal.

L'invention s'applique notamment plus généralement à toutes les structures à hétérojonction obtenues avec des couches choisies parmi les binaires de nitrures d'éléments III, c'est-à-dire AlN, GaN, InN, BN, et les

ternaires, quaternaires ou quintenaires formés à partir de ces binaires. Elle s'applique plus généralement à des structures de transistor HEMT à base de matériaux semi-conducteur à grande largeur de bande interdite, comprenant les matériaux semi-conducteur III-V, le diamant ou l'oxyde de zinc (et tout autre matériau cité plus haut). Le premier matériau M1 sera de préférence un nitrure d'éléments III, sous forme binaire, typiquement AlN, ou d'un alliage ternaire ou quaternaire formé à partir d'un binaire de la liste suivante : AlN, GaN, InN, BN. Ce peut aussi être du diamant ou un oxyde de zinc ZnO. Le deuxième matériau M2 peut être un nitrure d'élément III, et notamment un binaire (AlN, GaN, InN, BN), ou un alliage ternaire ou un quaternaire formé à partir d'un binaire de la liste AlN, GaN, InN, BN.

En pratique, la couche BGaN sur la couche tampon 2a peut être obtenue de différentes manières, en utilisant l'éventail des techniques de croissance de ce matériau disponible à l'heure actuelle, c'est-à-dire typiquement : les techniques d'épitaxie par jet moléculaire (MBE), ou en phase vapeur ; la technique des organo-métalliques (MOCVD) ou hybride (HVPE) ; les techniques d'implantation de bore dans une couche de GaN, et les techniques de diffusion, avec phases de dépôt et recuit. Ces techniques permettent en outre de manière connue de former la couche BGaN de différentes manières. Notamment :

-la couche BGaN peut être formée avec une concentration homogène, uniforme, de bore dans le volume, comme dans l'exemple illustré sur la figure 1.

-la couche BGaN peut aussi être formée avec une concentration abrupte ou graduée en marches d'escalier, partant de 0, et croissant en allant vers le canal, jusqu'à une concentration supérieure, par exemple 4%, comme schématiquement illustré sur la figure 4.

-la couche de BGaN peut être aussi réalisée sous forme d'un super-réseau (*super lattice* en anglais) formé d'une alternance de couches très fines, par exemple une alternance de couches BGaN et GaN, comme illustré schématiquement dans la structure de la figure 8, sur une épaisseur de structure déterminée, dans l'exemple 50 nm, pour atteindre une concentration moyenne équivalente. On peut aussi envisager une alternance de couches BGaN et AlN.

-la couche BGaN peut encore être réalisée en formant une couche GaN ou BGaN, avec des incorporations localisées en volume de BGaN plus concentrées en bore, formant des petits volumes ou "clusters" 20 dans la couche tampon environnante, comme schématiquement illustré sur la figure 9. L'épaisseur de la couche environnante et la densité des clusters et les concentrations respectives de la couche environnante et des clusters 20 sont déterminées pour obtenir la concentration moyenne recherchée. Lorsque la couche tampon 2a est une couche de GaN (GaN ou alliage de GaN avec d'autres éléments de la colonne III), ces clusters peuvent être réalisés directement dans la couche tampon. La couche environnante dans laquelle sont réalisés les clusters BGaN peut aussi être une couche insérée dans la couche tampon 2 de la structure.

Dans l'invention, on propose en outre de perfectionner la structure de transistor HEMT décrite précédemment, en utilisant les propriétés électriques, notamment résistives, et les qualités structurales des couches BGaN à d'autres niveaux dans la structure, améliorant encore les performances électriques du transistor HEMT.

La figure 10 illustre ces perfectionnements dans un exemple de structure à hétérojonction AlGaN/GaN.

Un premier perfectionnement consiste à utiliser une couche BGaN à faible concentration de bore à l'interface entre le substrat et la couche tampon, pour une utilisation comme couche de nucléation 6 pour la croissance de la couche tampon. Cette couche de BGaN déposée sur le substrat 1, dans une épaisseur pouvant aller jusqu'à 2µm, agit alors comme filtre de dislocation favorable pour obtenir une couche tampon 2 ayant de très bonnes qualités structurales. Dans ce cas, cette couche 6 de nucléation sera de préférence réalisée par la technique des clusters présentée à la figure 9.

Un deuxième perfectionnement consiste à utiliser une couche BGaN à faible concentration de bore, pour réaliser la couche 4 de passivation de surface pour ses propriétés résistives, la couche de passivation ayant pour fonction de réduire les éventuels pièges en surface de la structure. Dans ce cas, cette couche BGaN 4 de passivation sera de préférence réalisée avec une concentration uniforme en bore, ou en super-réseau. En alternative au BGaN, on peut aussi utiliser du BN, qui offre des

propriétés résistives aussi intéressantes, pour cette couche 4 de passivation de surface.

Un troisième perfectionnement consiste à utiliser une couche BGaN ou BN, pour favoriser la dissipation thermique de la structure HEMT. Favoriser la dissipation thermique dans la structure est en effet un aspect important dans toutes les applications de puissance. Or le BGaN et le BN sont de bons conducteurs thermiques, notamment ils sont meilleurs conducteurs thermiques que le SiN ou le SiO_2 utilisés couramment pour la couche 4, pour la passivation de la structure.

On propose ainsi avantageusement de réaliser une couche BGaN ou BN, en surface de la structure, dans le but de réduire le pont thermique avec un radiateur éventuel placé au-dessus de la structure. Puisqu'on a vu précédemment qu'une telle couche BGaN ou BN pouvait aussi être utilisée pour la passivation, deux variantes de réalisation sont envisageables :

-réaliser une couche BGaN ou BN en surface de la structure pour former la couche de passivation 4, et ainsi à la fois réaliser la passivation de la structure et réduire le pont thermique entre la zone active en dessous d'elle, et un radiateur éventuel placé au-dessus.

-réaliser une couche BGaN ou BN sur une couche de passivation 4, par exemple SiN. On a alors la superposition couche de passivation 4/couche 7 BGaN ou BN comme illustré sur la figure 10.

On peut aussi envisager un refroidissement par le bas de la structure et réaliser une couche BGaN ou BN sous la couche tampon, telle la couche 6 illustrée sur la figure 10. Il faut alors prévoir un report de la structure sur un substrat 1 adéquat (ex : SiC, diamant, avec une interface et/ou un collage compatible thermiquement) pour améliorer la conductivité thermique dans le volume et la résistance thermique totale. La couche 6 peut alors servir de couche de nucléation dans le processus de fabrication de la structure, puis de couche favorisant la dissipation thermique, après report sur un substrat adéquat.

Les différents perfectionnements décrits peuvent être utilisés séparément ou en combinaison, selon les qualités et performances recherchées pour le transistor HEMT réalisé avec cette structure.

Les figures 11 à 17 mettent en évidence les résultats de simulation obtenus pour trois structures formées selon l'invention, et d'illustrer les effets de confinement des porteurs de charge à l'interface couche barrière/couche tampon d'une structure de transistor HEMT avec une couche de BGaN insérée dans la couche tampon selon l'invention, et d'augmentation de la résistivité sous le canal. Elles permettent de montrer que ces effets sont remarquables même avec une faible concentration de bore, qui dans l'exemple de la simulation est de 1%, ainsi que l'évolution notable de ces effets avec l'épaisseur de couche BGaN insérée.

Plus précisément, les trois structures HEMT simulées sont des structures AlGaN/GaN comprenant un matériau BGaN inséré selon l'invention. Dans ces structures, la couche barrière 3 est une couche AlGaN, choisie avec une concentration en Al de 32% et une épaisseur de 13 nanomètres. La couche BGaN 5 est insérée selon l'invention dans la couche tampon GaN, en sorte qu'une partie 2b de la couche tampon se retrouve entre la couche barrière AlGaN 3 et la couche BGaN 5. Dans l'exemple cette partie 2b de couche tampon a une épaisseur de 40 nanomètres.

Dans la structure représentée schématiquement sur la figure 11, la couche BGaN 5 est fine, avec une épaisseur de 5 nanomètres, et est à concentration uniforme de bore, de 1% dans l'exemple.

Dans celles des figures 12 et 13, la couche BGaN 5 est plus épaisse, avec une épaisseur de 80 nanomètres ($1nm=10^{-9}m$). Dans la structure de la figure 12, sa concentration en bore est uniforme, de 1%. Dans celle de la figure 13, elle est à gradient de concentration, partant de 0%, à la limite avec la partie 2a de la couche tampon sous la couche BGaN, dans la représentation de la figure où la couche barrière 3 est située au-dessus de la couche tampon, jusqu'à 1% à la limite avec la partie 2b de la couche tampon au-dessus de la couche BGaN. La "couche" tampon selon l'invention est ainsi formée dans la structure par la séquence GaN 2b/ BGaN 5/ GaN 2a.

La figure 14 illustre les courbes de niveau d'énergie de la bande de conduction et de concentration de porteurs suivant l'épaisseur Y de la structure de la figure 11, en partant de la couche barrière 3 vers la couche tampon, épaisseur qui est représentée par l'axe Y. L'épaisseur est donnée en angströms ($1 Å=10^{-10}$ m). Sur la figure (comme sur les figures suivantes 15 à 17) on a indiqué la position des couches dans leur succession dans la

structure suivant l'axe Y, soit : AlGaN/GaN/BGaN/GaN. On a également représenté le niveau de fermi, noté NF. La fenêtre supérieure (a) de la figure 14 illustre la courbe de niveau d'énergie (en électro-volt "eV") de la structure, repérée par le symbole fb. Elle montre la courbe qui serait obtenue pour la même structure, mais sans la couche BGaN selon l'invention (toutes choses égales par ailleurs) : cette courbe est repérée par le symbole no-b. La fenêtre inférieure (b) illustre la courbe de concentration de porteurs (en cm^{-3}): celle repérée par le symbole fb, correspondant à la structure de la figure 11, et celle repérée par le symbole no-b, correspondant à cette même structure mais sans la couche BGaN 5. La figure 15 représente les courbes correspondantes, mais obtenues :

-pour la structure de la figure 12, avec une couche de BGaN épaisse, 80 nm dans l'exemple contre 5 nm dans la structure de la figure 11, et une concentration uniforme de bore : les courbes correspondant à cette structure sont repérées par le symbole ub ;

-pour la structure de la figure 13, également à couche de BGaN épaisse, 80 nm dans l'exemple, mais à concentration graduelle de bore : les courbes correspondant à cette structure sont repérées par le symbole gb.

Les courbes repérées par le symbole no-b correspondant à une structure identique mais sans couche de BGaN, sont également représentées.

La figure 16 permet de comparer les différentes courbes de niveaux d'énergie de bande de conduction de toutes ces structures, et de manière similaire, la figure 17 permet de comparer les différentes courbes de concentration de porteurs de toutes ces structures, et les effets induits par la couche BGaN insérée selon l'invention : amélioration du confinement par l'effet barrière électrostatique, réduction des fuites des électrons vers le substrat par l'effet barrière résistive.

Ces différentes figures mettent clairement en évidence l'influence de la concentration en bore et de l'épaisseur de la couche BGaN insérée selon l'invention. Le pic d'énergie dans la bande de conduction, à l'interface GaN/BGaN (couche 2b/couche 5), noté respectivement E-fb pour la structure de la figure 11, E-ub, pour la structure de la figure 12 et E-gb, pour la structure de la figure 13 a ainsi une amplitude d'autant plus importante et la barrière électrostatique induite est d'autant plus large, que la couche BGaN

est plus épaisse. A égale épaisseur, l'amplitude du pic et la barrière électrostatique sont plus importantes pour une concentration uniforme à 1% de bore (courbe "ub", pic E-ub) que pour un gradient 0%-1% de concentration (courbe "gb", pic E-gb). La largeur de la base du puits de potentiel triangulaire à l'interface AlGaN/GaN, respectivement noté W-fb, W-ub et W-gb, est aussi dépendante de la concentration en bore et de l'épaisseur de la couche BGaN, comme très bien montré par la figure 17 : la plus étroite pour la courbe ub, la plus large pour la courbe fb. Ces courbes sont à rapprocher des explications déjà données dans l'exposé de l'invention en relation avec la figure 3.

L'invention qui vient d'être décrite permet de réaliser des transistors HEMT très performants, avec des propriétés électriques améliorées.

REVENDICATIONS

1. Structure électronique de transistor HEMT, comprenant

-au moins une première couche dite tampon (2), d'un premier matériau semi-conducteur à large bande interdite Eg_1 (M1), et une deuxième couche (3) d'un deuxième matériau semi-conducteur à large bande interdite Eg_2 (M2), avec une largeur de bande interdite Eg_2 supérieure à celle Eg_1, et

-un gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) qui circule dans un canal (C) délimité dans la première couche (2) à l'interface (10) entre la première couche et la deuxième couche,

la structure étant caractérisée en ce qu'un matériau BGaN avec une concentration moyenne en bore d'au moins 0,1% est inséré dans la couche tampon (5), sous forme d'au moins une couche (5) sous le canal (C), modifiant le diagramme des bandes d'énergie par création d'une barrière de potentiel électrostatique favorisant le confinement du gaz bidimensionnel d'électrons.

2. Structure électronique selon la revendication 1, dans laquelle la couche BGaN (5) sous le canal a une épaisseur comprise entre 1 nanomètre et une centaine de nanomètres.

3. Structure électronique selon la revendication 1 ou 2, comprenant une couche BGaN (6) à l'interface entre la couche tampon (2) et un substrat (1) de la structure, comme couche de nucléation, formant filtre de dislocation lors de la croissance de la couche tampon (2).

4. Structure électronique selon la revendication 1 ou 2, comprenant une couche BGaN ou BN (6) à l'interface entre la couche tampon (2) et un substrat (1) de la structure pour favoriser la dissipation thermique du transistor HEMT.

5. Structure électronique selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, comprenant une couche BGaN ou BN (4) en surface de la structure, sur la couche barrière (3), ladite couche BGaN ou BN servant de couche de passivation de surface, et permettant une dissipation thermique par le dessus de la structure.

6. Structure électronique selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, comprenant une couche de passivation (4) formée sur la couche barrière (3), et une couche BGaN ou BN (7) sur la couche de

passivation (4) permettant une dissipation thermique par le dessus de la structure.

7. Structure électronique selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans laquelle la couche BGaN (5) sous le canal est à concentration en volume uniforme de bore.

8. Structure électronique selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans laquelle la couche BGaN (5) sous le canal est à concentration en bore graduée ou en marches d'escalier, croissante dans la direction du canal.

9. Structure électronique selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans laquelle la couche BGaN (5) sous le canal est un super-réseau alternant des couches BGaN avec des couches GaN ou avec des couches AlN.

10. Structure électronique selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans laquelle la couche BGaN (5) sous le canal est formée d'une couche environnante de GaN ou BGaN, incorporant localement du BGaN en volume en différentes zones (20) dites "clusters", avec une teneur en bore supérieure à celle de la couche environnante.

11. Structure électronique selon la revendication 3, dans laquelle la couche BGaN (6) réalisée comme couche de nucléation à l'interface entre la couche tampon (2) et le substrat (1) de la structure est à incorporation locale en volume de BGaN en différentes zones (20) dites "clusters".

12. Structure électronique selon l'une quelconque des revendications précédentes dans laquelle lesdits premier et deuxième matériaux sont des nitrures d'élément III.

13. Structure électronique selon la revendication 12, dans laquelle le premier matériau est un binaire GaN, ou un alliage de ce binaire avec un ou des éléments III ou V, et le deuxième matériau est un alliage ternaire AlGaN ou un alliage de ce ternaire avec des éléments III ou V.

14. Dispositif électronique comprenant au moins un transistor HEMT avec une structure électronique selon l'une quelconque des revendications précédentes.

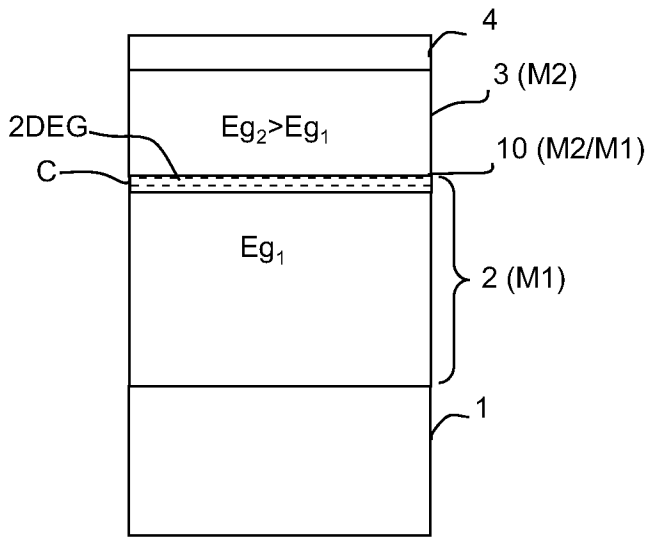

4
3 (M2)
2DEG
$Eg_2>Eg_1$
10 (M2/M1)
C
Eg_1
2 (M1)
1

Fig. 1

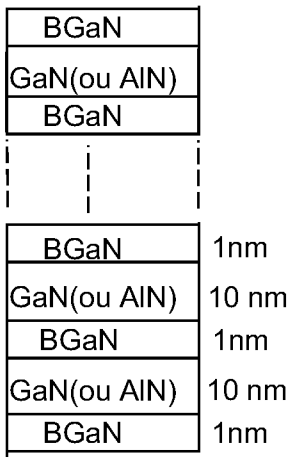

BGaN
GaN(ou AlN)
BGaN
BGaN
1nm
GaN(ou AlN)
10 nm
BGaN
1nm
GaN(ou AlN)
10 nm
BGaN
1nm

Fig. 8

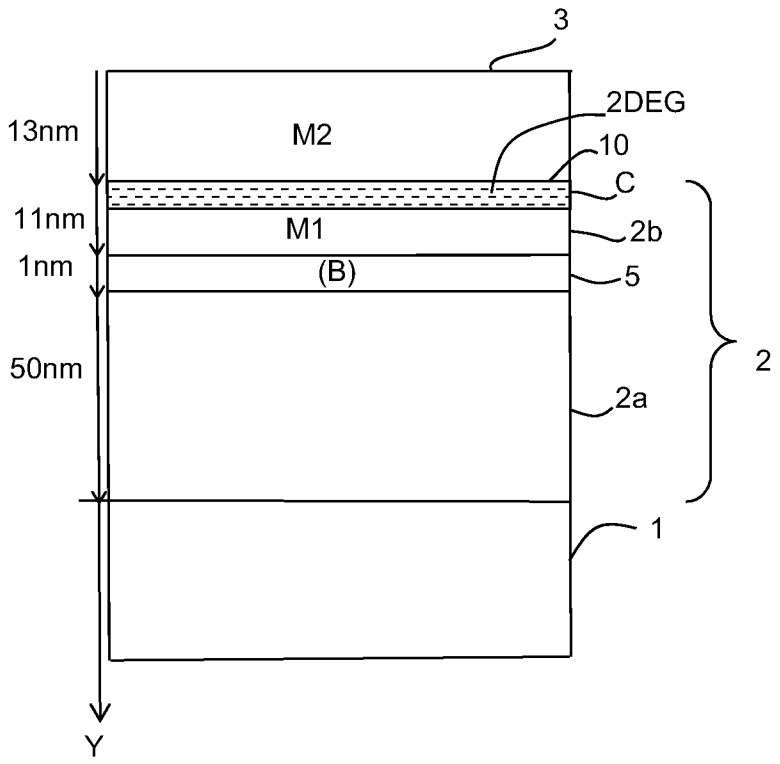
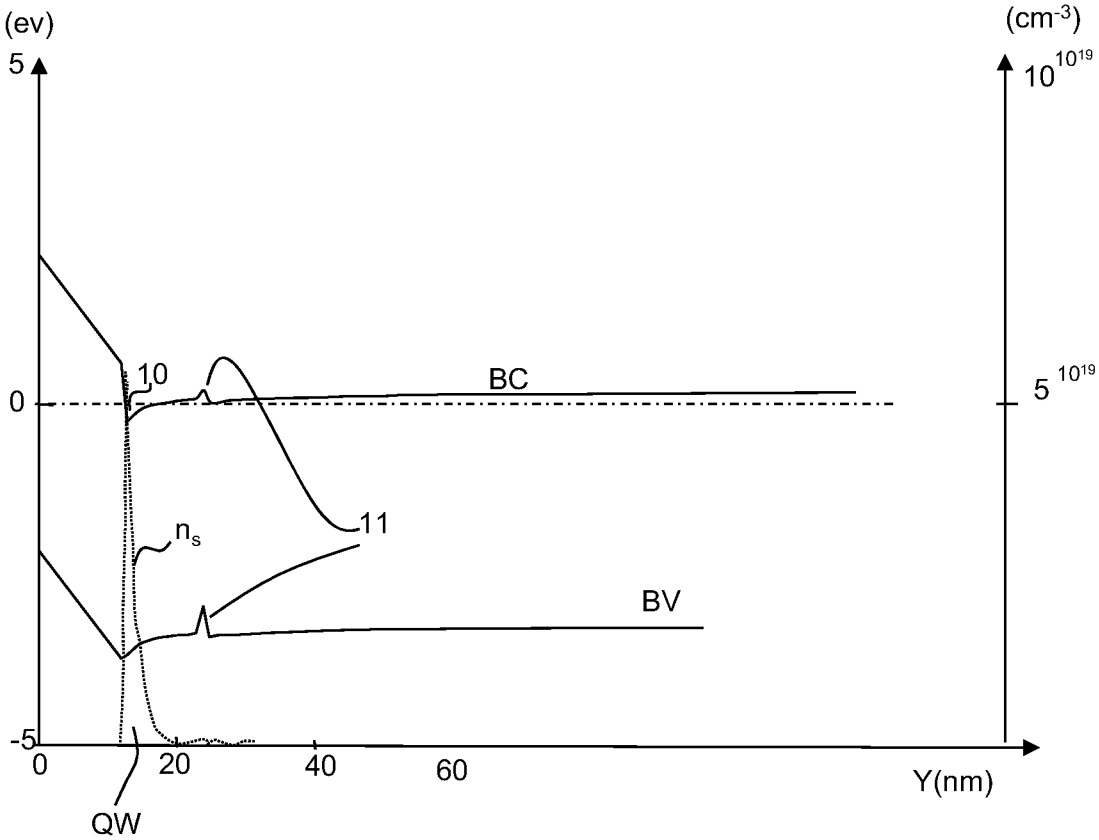

3
2DEG
13nm
M2
10
C
11nm
M1
2b
1nm
(B)
5
50nm
2
2a
1
Y

Fig. 2

Fig. 3


(ev)
5
0
-5
10
BC
11
n_s
BV
0
20
40
60
QW
Y(nm)
(cm^{-3})
$10^{10^{19}}$
$5\ ^{10^{19}}$

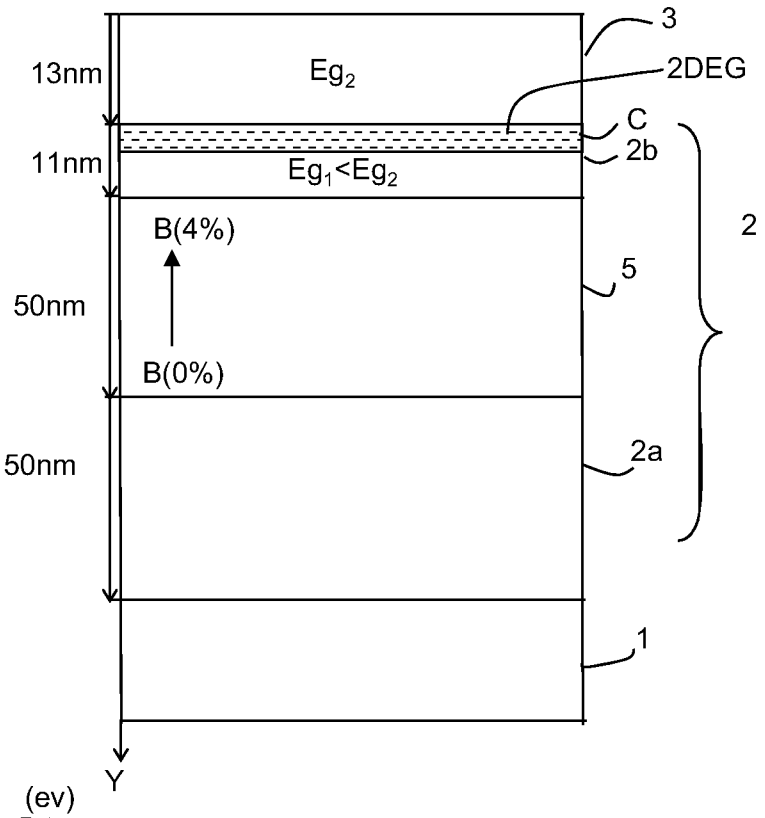

13nm
Eg2
3
2DEG
C
2b
11nm
Eg1<Eg2
B(4%)
2
5
50nm
B(0%)
50nm
2a
1
Y

Fig. 4

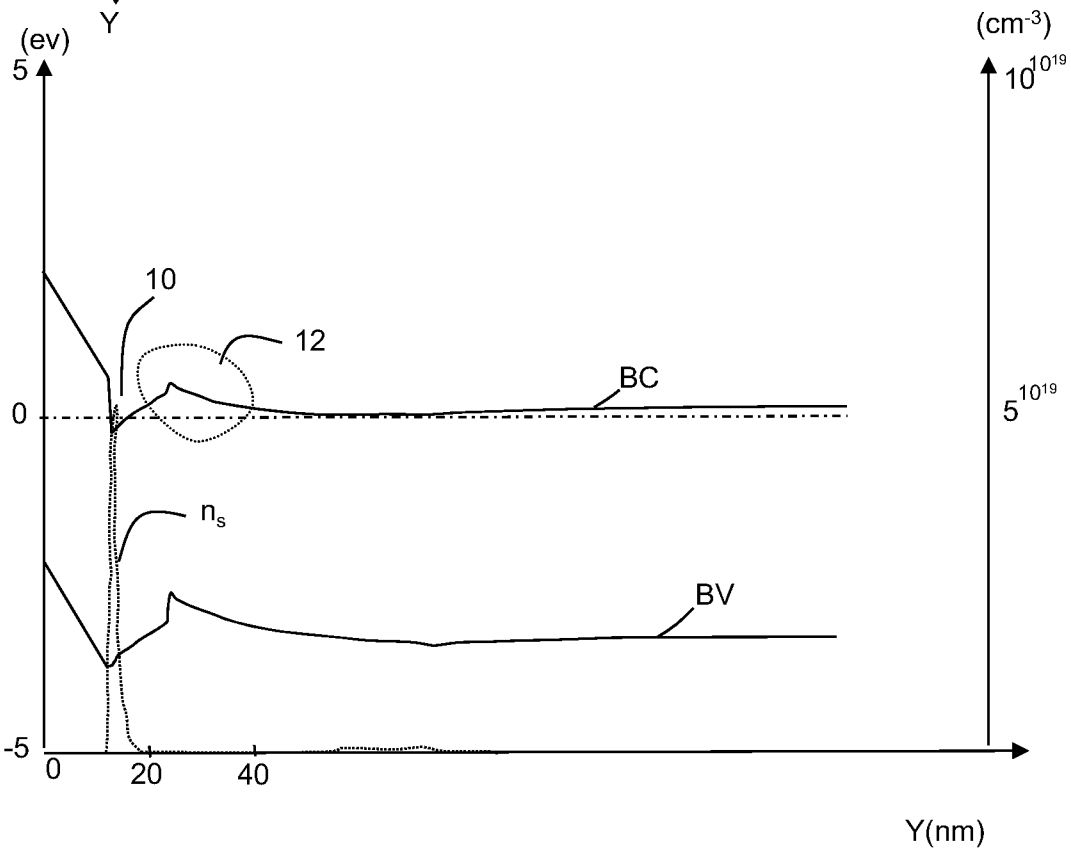

(ev)
5
0
-5
0
20
40
Y(nm)
10
12
BC
ns
BV
(cm-3)
10^19
5^19

Fig. 5

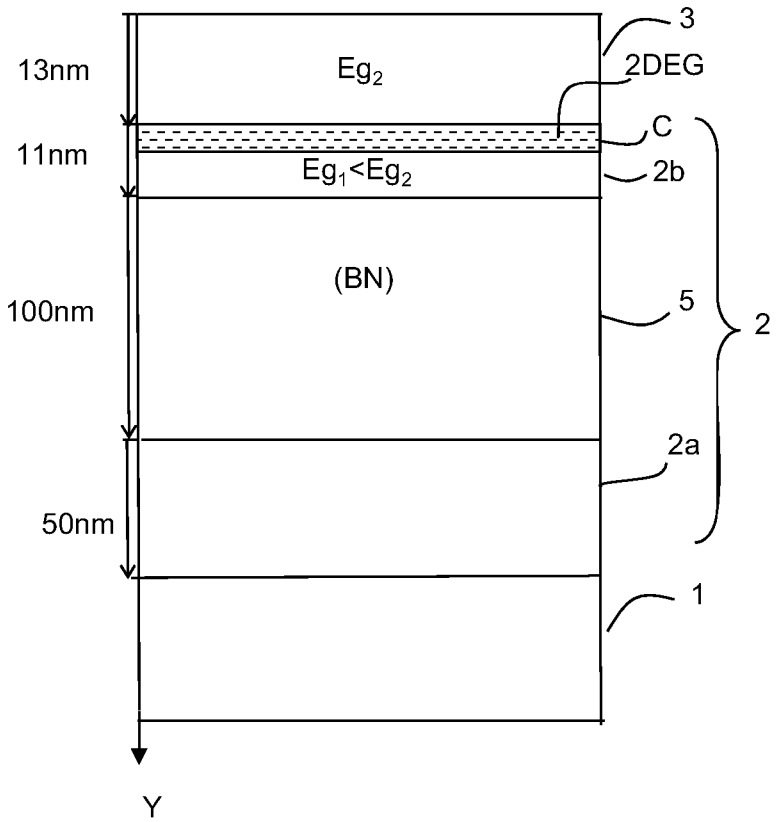
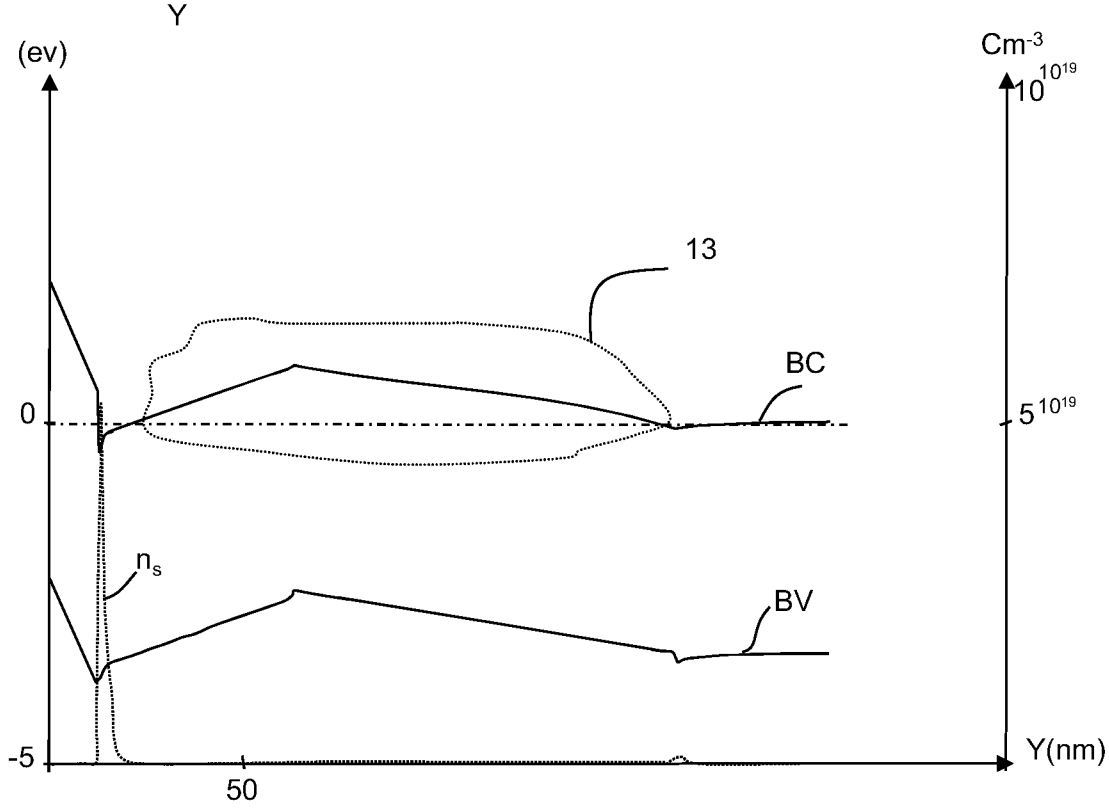

13nm
11nm
100nm
50nm
Eg_2
$Eg_1<Eg_2$
(BN)
3
2DEG
C
2b
5
2
2a
1
Y

Fig. 6

Fig. 7


(ev)
Cm^{-3}
10^{19}
13
BC
0
$5^{10^{19}}$
n_s
BV
-5
50
Y(nm)

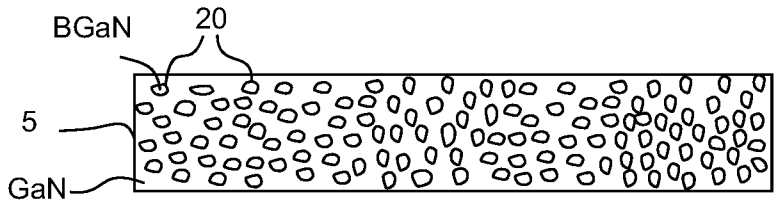


Fig. 9

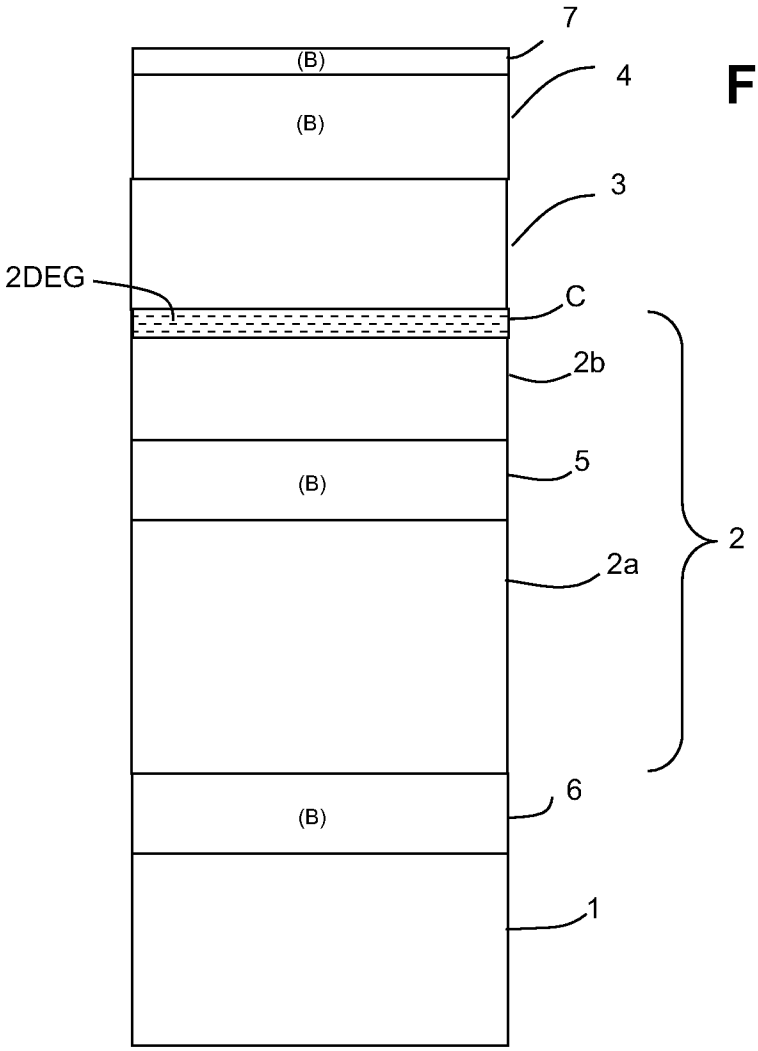


Fig. 10

Fig.11

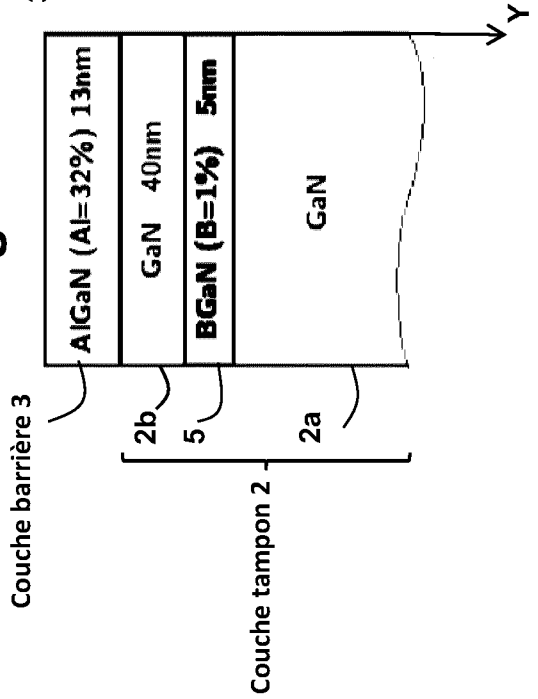


Fig.12

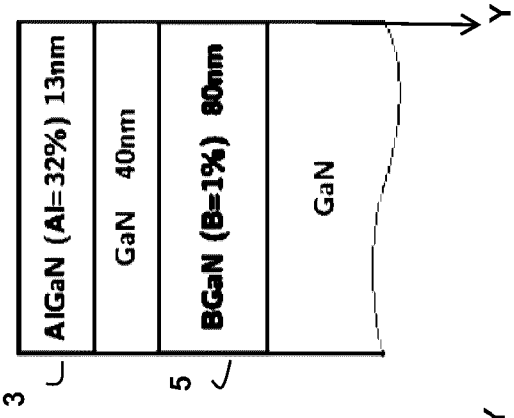


Fig.13

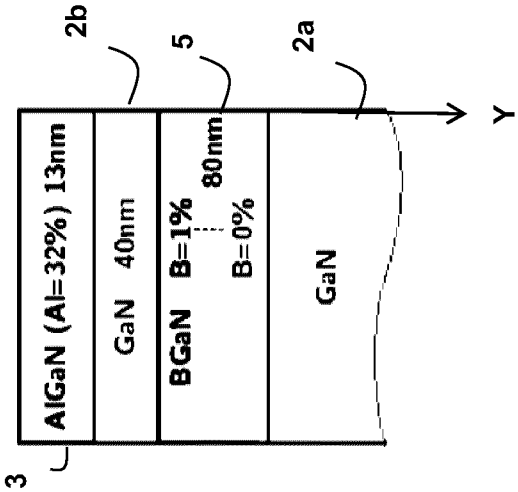


Fig. 14

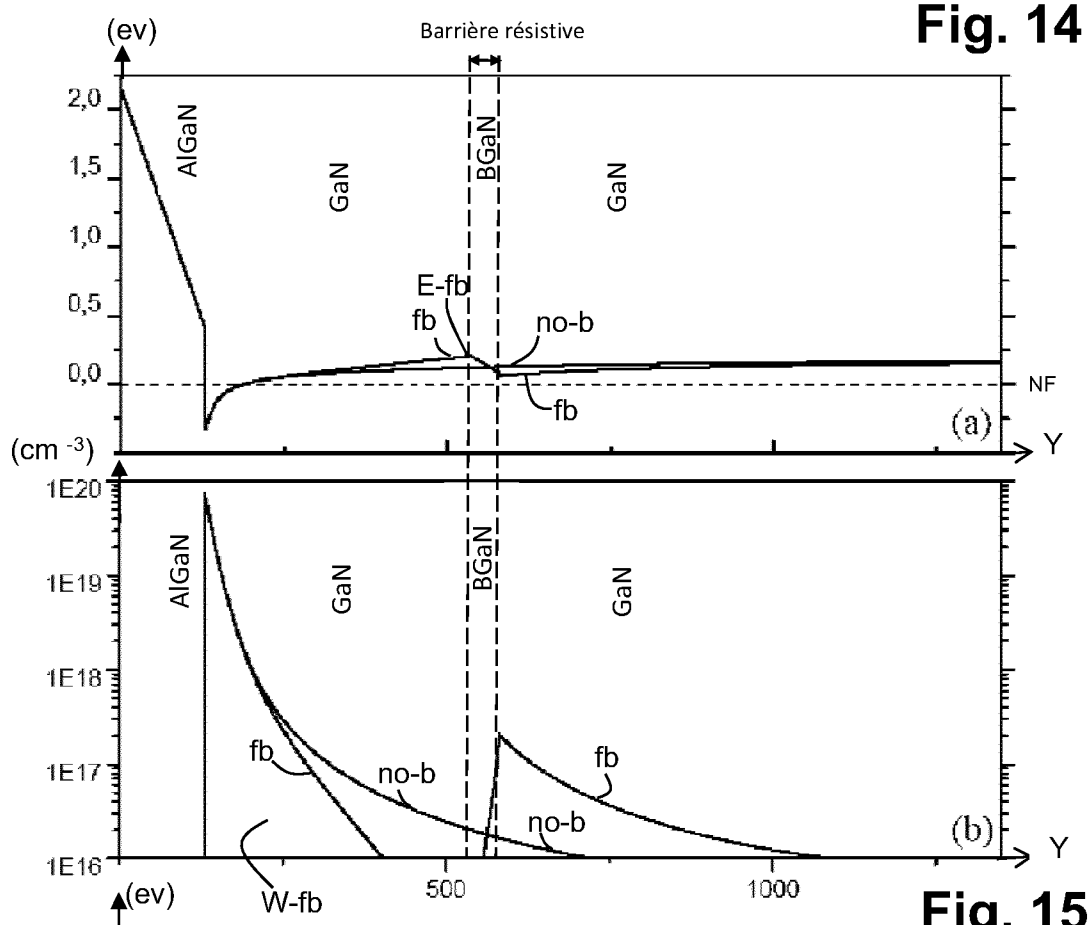

(ev)
Barrière résistive
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
AlGaN
GaN
BGaN
GaN
E-fb
fb
no-b
fb
NF
(a)
Y
(cm -3)
1E20
1E19
1E18
1E17
1E16
AlGaN
GaN
BGaN
GaN
fb
no-b
fb
no-b
(b)
Y
W-fb
500
1000

Fig. 15

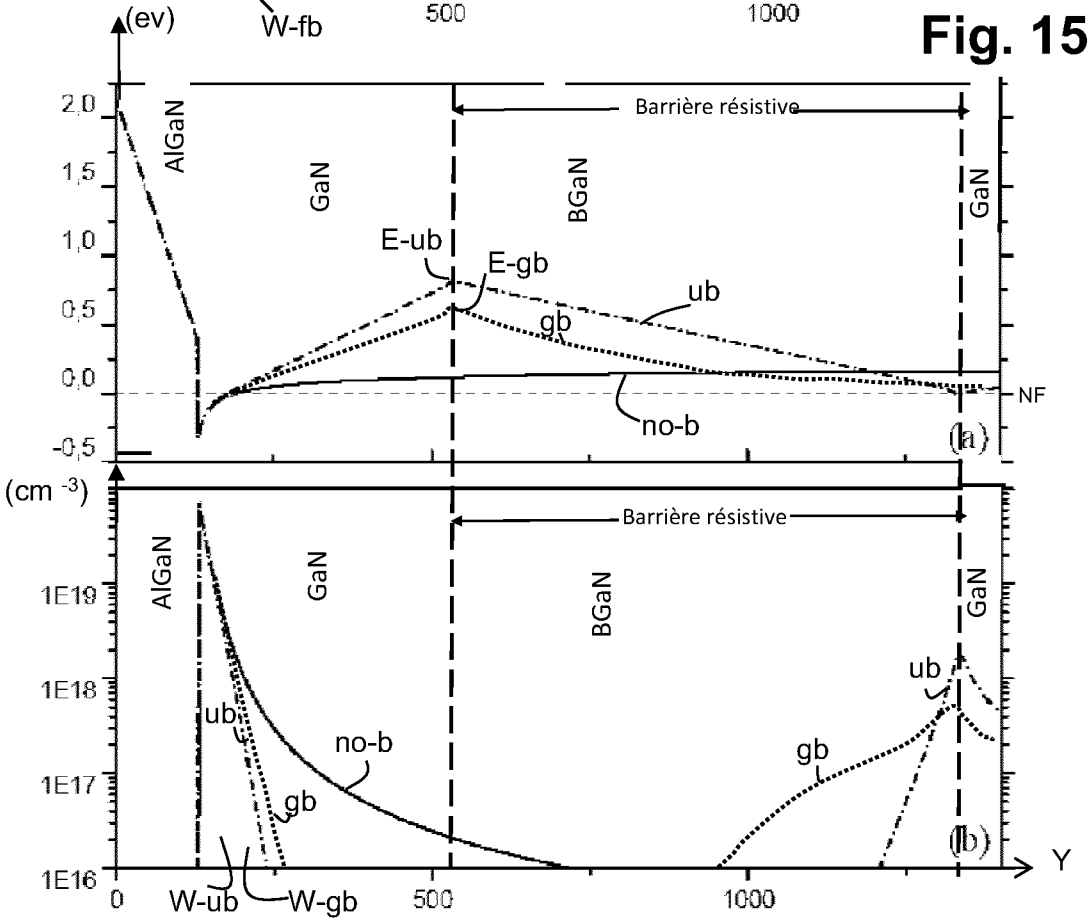

(ev)
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
-0,5
AlGaN
GaN
Barrière résistive
BGaN
GaN
E-ub
E-gb
ub
gb
no-b
NF
(a)
(cm -3)
1E19
1E18
1E17
1E16
AlGaN
GaN
Barrière résistive
BGaN
GaN
ub
ub
no-b
gb
gb
(b)
Y
0
W-ub
W-gb
500
1000

Fig. 16

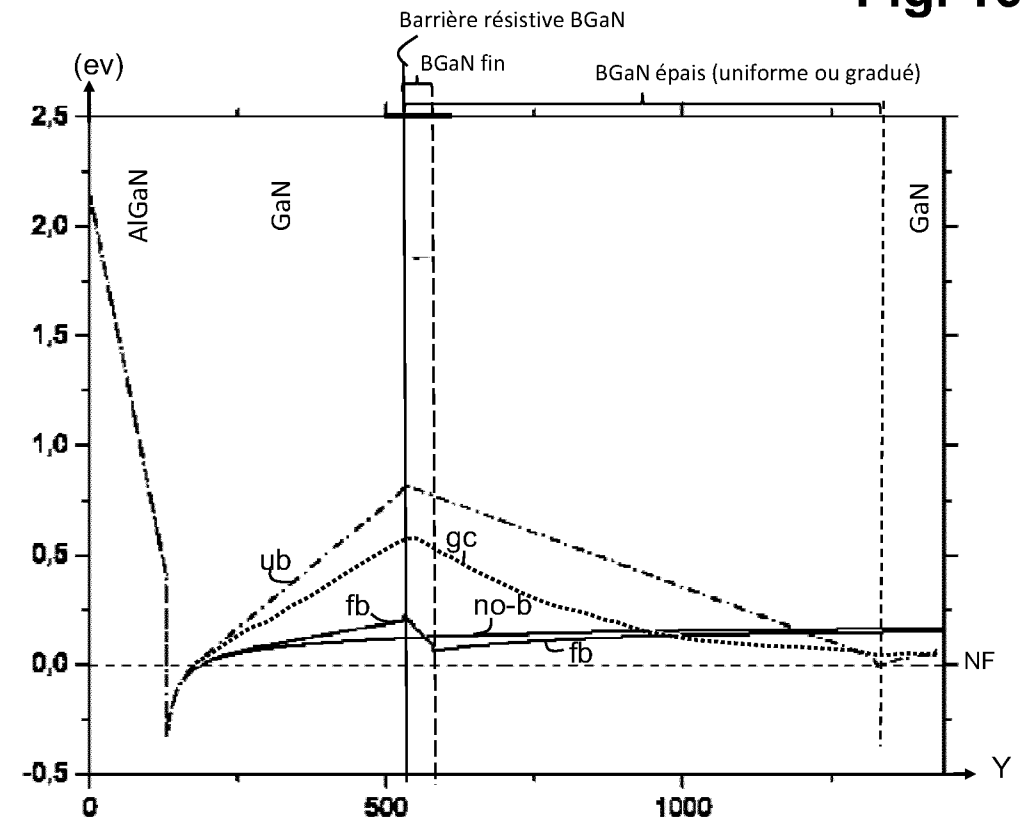
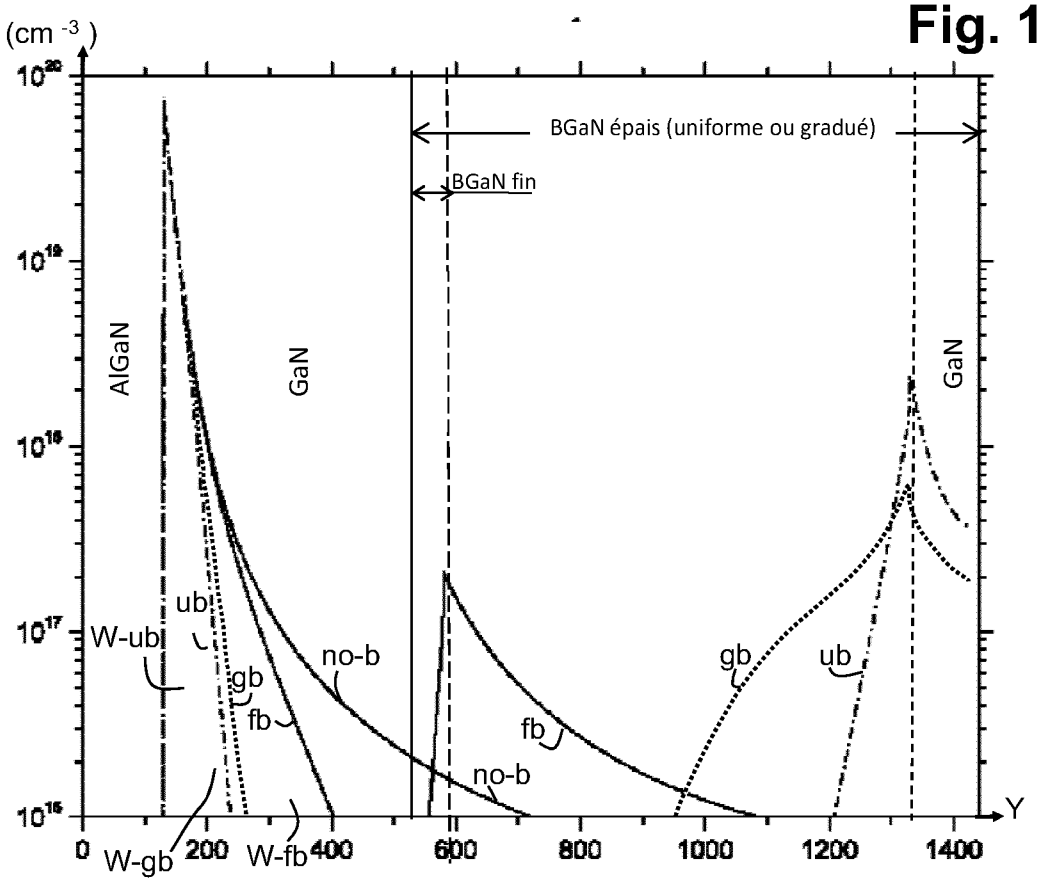

Barrière résistive BGaN
BGaN fin
BGaN épais (uniforme ou gradué)
(ev)
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
-0,5
AlGaN
GaN
GaN
ub
gc
fb
no-b
fb
NF
Y
0
500
1000

Fig. 17


(cm -3)
BGaN épais (uniforme ou gradué)
BGaN fin
AlGaN
GaN
GaN
W-ub
ub
gb
fb
no-b
W-gb
W-fb
gb
ub
fb
no-b
Y
0
200
400
600
800
1000
1200
1400

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2012/056945

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. H01L29/778 H01L29/201
ADD. H01L23/29 H01L29/15 H01L29/205 H01L29/04

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
H01L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data, COMPENDEX, INSPEC, IBM-TDB

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2006/118824 A1 (OTSUKA KOJI [JP] ET AL) 8 June 2006 (2006-06-08) figure 1 et texte associé	1-14
X	FR 2 924 270 A1 (PICOGIGA INTERNAT SOC PAR ACTI [FR] PICOGIGA INTERNAT [FR]) 29 May 2009 (2009-05-29) figure 3 et texte associé	1-14
X	US 2002/096692 A1 (NAKAMURA FUMIHIKO [JP] ET AL) 25 July 2002 (2002-07-25) figures 1, 10 et texte associé	1-14

-/--

[X] Further documents are listed in the continuation of Box C.

[X] See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
4 June 2012	26/06/2012

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Moehl, Sebastian

1

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (April 2005)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2012/056945

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	A. OUGAZZADEN ET AL: "Progress on new wide bandgap materials BGaN, BGaAlN and their potential applications", PROCEEDINGS OF SPIE, vol. 6479, 1 January 2007 (2007-01-01), pages 64791G-64791G-7, XP055007153, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.717640 cited in the application page 6479; figure 7	1-14
A	US 2006/108606 A1 (SAXLER ADAM W [US] ET AL SAXLER ADAM WILLIAM [US] ET AL) 25 May 2006 (2006-05-25) figures 3, 6 et texte associé	5,6
A	BAHAT-TREIDEL E ET AL: "Punchthrough-Voltage Enhancement of AlGaN/GaN HEMTs Using AlGaN Double-Heterojunction Confinement", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, IEEE SERVICE CENTER, PISACATAWAY, NJ, US, vol. 55, no. 12, 1 December 2008 (2008-12-01), pages 3354-3359, XP011238094, ISSN: 0018-9383, DOI: 10.1109/TED.2008.2006891 abstract page 3355; table I	8
A	US 2008/296616 A1 (LI TINGKAI [US] ET AL) 4 December 2008 (2008-12-04) paragraph [0043]; figure 10	10,11

1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/EP2012/056945

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2006118824 A1	08-06-2006	JP 4530171 B2	25-08-2010
		US 2006118824 A1	08-06-2006
		WO 2005015642 A1	17-02-2005
FR 2924270 A1	29-05-2009	CN 101878532 A	03-11-2010
		DE 112008002817 T5	27-01-2011
		FR 2924270 A1	29-05-2009
		JP 2011505064 A	17-02-2011
		KR 20100087022 A	02-08-2010
		US 2010258898 A1	14-10-2010
		WO 2009068571 A1	04-06-2009
US 2002096692 A1	25-07-2002	JP 2002057158 A	22-02-2002
		KR 20020013450 A	20-02-2002
		KR 20080065266 A	11-07-2008
		TW 554530 B	21-09-2003
		US 2002096692 A1	25-07-2002
US 2006108606 A1	25-05-2006	CA 2588114 A1	01-06-2006
		CN 101107713 A	16-01-2008
		EP 1817798 A2	15-08-2007
		JP 2008521248 A	19-06-2008
		KR 20070091629 A	11-09-2007
		US 2006108606 A1	25-05-2006
		US 2009042345 A1	12-02-2009
		WO 2006057686 A2	01-06-2006
US 2008296616 A1	04-12-2008	NONE	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/EP2012/056945

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. H01L29/778 H01L29/201
ADD. H01L23/29 H01L29/15 H01L29/205 H01L29/04

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
H01L

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal, WPI Data, COMPENDEX, INSPEC, IBM-TDB

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 2006/118824 A1 (OTSUKA KOJI [JP] ET AL) 8 juin 2006 (2006-06-08) figure 1 et texte associé	1-14
X	FR 2 924 270 A1 (PICOGIGA INTERNAT SOC PAR ACTI [FR] PICOGIGA INTERNAT [FR]) 29 mai 2009 (2009-05-29) figure 3 et texte associé	1-14
X	US 2002/096692 A1 (NAKAMURA FUMIHIKO [JP] ET AL) 25 juillet 2002 (2002-07-25) figures 1, 10 et texte associé	1-14

-/--

[X] Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

[X] Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale
4 juin 2012	26/06/2012

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale	Fonctionnaire autorisé
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Moehl, Sebastian

1

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	A. OUGAZZADEN ET AL: "Progress on new wide bandgap materials BGaN, BGaAlN and their potential applications", PROCEEDINGS OF SPIE, vol. 6479, 1 janvier 2007 (2007-01-01), pages 64791G-64791G-7, XP055007153, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.717640 cité dans la demande page 6479; figure 7	1-14
A	US 2006/108606 A1 (SAXLER ADAM W [US] ET AL SAXLER ADAM WILLIAM [US] ET AL) 25 mai 2006 (2006-05-25) figures 3, 6 et texte associé	5,6
A	BAHAT-TREIDEL E ET AL: "Punchthrough-Voltage Enhancement of AlGaN/GaN HEMTs Using AlGaN Double-Heterojunction Confinement", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, IEEE SERVICE CENTER, PISACATAWAY, NJ, US, vol. 55, no. 12, 1 décembre 2008 (2008-12-01), pages 3354-3359, XP011238094, ISSN: 0018-9383, DOI: 10.1109/TED.2008.2006891 abrégé page 3355; tableau I	8
A	US 2008/296616 A1 (LI TINGKAI [US] ET AL) 4 décembre 2008 (2008-12-04) alinéa [0043]; figure 10	10,11

1

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°
PCT/EP2012/056945

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2006118824 A1	08-06-2006	JP 4530171 B2	25-08-2010
		US 2006118824 A1	08-06-2006
		WO 2005015642 A1	17-02-2005
FR 2924270 A1	29-05-2009	CN 101878532 A	03-11-2010
		DE 112008002817 T5	27-01-2011
		FR 2924270 A1	29-05-2009
		JP 2011505064 A	17-02-2011
		KR 20100087022 A	02-08-2010
		US 2010258898 A1	14-10-2010
		WO 2009068571 A1	04-06-2009
US 2002096692 A1	25-07-2002	JP 2002057158 A	22-02-2002
		KR 20020013450 A	20-02-2002
		KR 20080065266 A	11-07-2008
		TW 554530 B	21-09-2003
		US 2002096692 A1	25-07-2002
US 2006108606 A1	25-05-2006	CA 2588114 A1	01-06-2006
		CN 101107713 A	16-01-2008
		EP 1817798 A2	15-08-2007
		JP 2008521248 A	19-06-2008
		KR 20070091629 A	11-09-2007
		US 2006108606 A1	25-05-2006
		US 2009042345 A1	12-02-2009
		WO 2006057686 A2	01-06-2006
US 2008296616 A1	04-12-2008	AUCUN	