



INFLUENCE DE LA POLARISATION PIEZOELECTRIQUE SUR LES TRANSISTORS CONVENTIONNELS HFET Metal/AlGaIn/GaN ET SUR LES TRANSISTORS HFET A DOUBLES COUCHES Metal/GaN/AlGaIn/GaN

N.Mokdad, K.Zitouni, A.Kadri

Laboratoire d'Etude des Matériaux Optoélectroniques et Polymères,

Téléphone/Fax : 041 514080 / e-mail : kadri.lemop.uo@mail.com

Département de Physique, Université d'Oran (Es-Senia)

Reçu le : 01/07/2007

Accepté le : 08/10/2007

Résumé :

Dans cet article, nous présentons une étude de l'influence de l'introduction d'une couche de GaN dans le transistor conventionnel Metal/AlGaIn/GaN entre le contact métal et la couche de la barrière AlGaIn. L'introduction de cette couche modifie la hauteur de la barrière de Schottky et, par conséquent, les caractéristiques du transistor et, en particulier, la caractéristique courant-tension via la polarisation piézo-électrique. Nous calculons la densité de charges induite dans les HFET (High Mobility Field Effect Transistor) conventionnels : Metal/AlGaIn-300Å/GaN et dans les transistors à double couches Metal/GaN -75 Å/AlGaIn-225 Å/GaN. Ensuite, nous calculons la hauteur de la barrière de Schottky effective dans la structure à double couche en fonction de l'épaisseur de la couche introduite de GaN pour différentes concentrations en Al, ainsi que la caractéristique courant-tension pour les deux transistors. Ces résultats montrent que l'augmentation de la hauteur de la barrière de Schottky dans la structure à double couche via la polarisation piézo-électrique réduit le courant source-drain dans ce type de transistors.

Mots clés : Transistors HEMT, GaN, AlGaIn, Polarisation Spontanée, Polarisation Piézo-électrique, 2DEG, Caractéristiques I-V.

1. Introduction :

Les progrès réalisés dans les techniques de croissance ont permis d'élaborer des structures à base de nitrures Würtzite[1] de très bonne qualité cristalline.

Ces matériaux semi-conducteurs III-N [2,3] : GaN, AlN, InN] ainsi que leurs composés ternaires et quaternaires présentent de grandes largeurs de bandes interdites ($1.9\text{eV} < E_G < 6\text{eV}$), ce qui correspond au spectre du rayonnement couvrant une large gamme de longueurs d'ondes allant de l'infrarouge (IR) à l'ultraviolet (UV).

Ces matériaux qui possèdent la symétrie Würtzite, sont non centro-symétriques, i.e. ils sont caractérisés par un grand facteur d'ionicté de leur liaison covalente.

Ces matériaux suscitent un grand intérêt par leurs applications potentielles dans les composants fonctionnant à haute température et à haute fréquence. Ils sont utilisés dans la réalisation des diodes émettrices de la lumière bleue avec l'alliage InGaIn, les diodes lasers et les transistors à effet de champ.

La structure Würtzite du nitrure de gallium est thermodynamiquement stable et polaire (elle ne possède pas de centre d'inversion). Les deux directions [0001] et [000-1] ne sont pas équivalentes et définissent des surfaces (0001) et (000-1) de type différentes qui sont respectivement des faces Gallium (polarité Ga) et des faces Azote (polarité N). Cette polarité Ga ou N

joue un rôle important dans la polarisation globale des couches, avec deux types : la polarisation spontanée et la polarisation piézo-électrique[4]. Ces polarisations sont définies suivant deux directions différentes en respectant la polarité du cristal : face A ou face B.

Nous présentons d'abord les effets de polarisation et de polarité sur les densités de charges dans les hétérostructures Wurtzite **AlGaIn/GaN**. Nous calculons ensuite la densité de charges qui forme le gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) dans l'hétérostructure HEMT **n-AlGaIn/GaN**. Ce calcul est réalisé suivant la face Ga en fonction de l'épaisseur de couche pour différentes compositions de Al. Nous présentons enfin l'influence de la couche de **GaN** introduite dans le transistor conventionnel **Metal/AlGaIn/GaN** entre le contact métal et la couche barrière **AlGaIn**. Nous montrons que l'introduction de cette couche modifie la hauteur de la barrière de Schottky et par, conséquent les caractéristiques du transistor et en particulier, la caractéristique courant-tension via la polarisation piézo-électrique.

2. Effets de polarisation dans les transistors à effet champ (HFET) :

Le transistor HFET est constitué d'une couche de **AlGaIn** d'épaisseur d , dont le gap est supérieur à celui de **GaN**. L'électrode de contrôle est de type Schottky, sa tension de polarisation met la couche de **AlGaIn** en déplétion totale. Cette couche déposée sur **GaN**, en phase hexagonale présente un champ électrique intense provenant de la superposition des effets de polarisations piézoélectrique et spontanée. Ceci provoque l'apparition de densités de porteurs qui sont transférés dans **GaN** non dopé pour former un 2DEG à l'interface de l'hétérojonction ($n \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ [5,6]). Ce 2DEG forme le canal du transistor. Ces électrons qui ont une grande mobilité en raison de l'absence d'ions donneurs, sont mis à profit dans les transistors HEMT (High Electron Mobility Transistor), dont la structure est représentée en Figure 1(a).

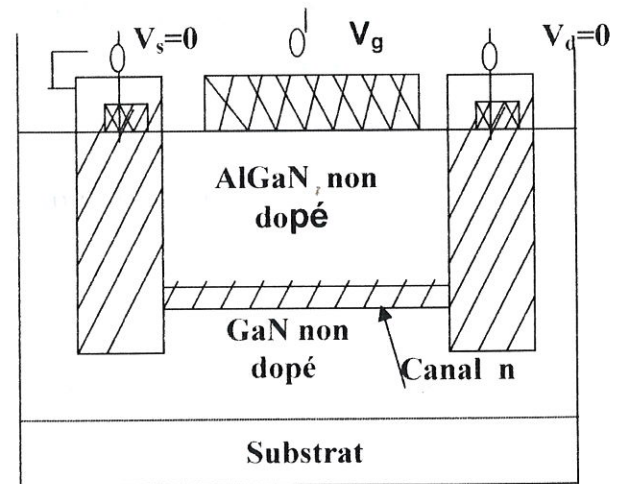


Fig. 1(a) : Schéma de principe du HFET

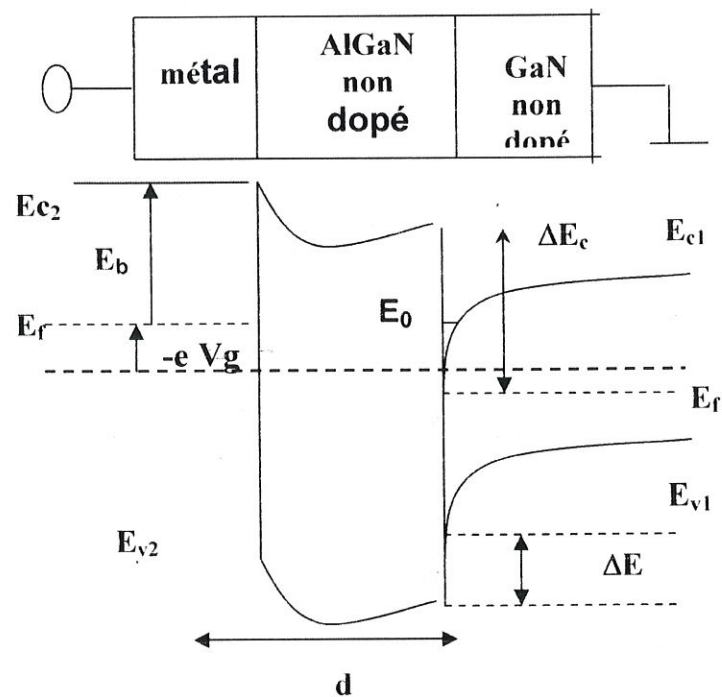


Fig. 1(b) : Diagramme énergétique correspondant

Sous la triple action des différences des travaux de sortie métal-AlGa_xN, et AlGa_xN-GaN et de la tension de polarisation V_g du métal, la diode Schottky métal-AlGa_xN et l'hétérojonction AlGa_xN-GaN sont polarisées. La structure de bande du dispositif est représentée en Figure 1(b). L'hétérostructure AlGa_xN/GaN en phase hexagonale possède un champ électrique intense (superposition de effets piézoélectriques et polarisation spontanée), on a la formation de gaz 2DEG. Cette densité de porteurs est calculée numériquement en résolvant l'équation [7,8] :

$$e \Phi_b + e \Delta E_{\text{total}} + (E_0 - E_v) + (E_f - E_0) = 0; \quad (1)$$

où :

- Φ_b est la hauteur de la barrière de Schottky métal-AlGa_xN.
- ΔE_c et ΔE_v sont les discontinuités de bandes de conduction et de valence de l'hétérojonction AlGa_xN/GaN et
- E_f et E_0 sont le niveau de fermi et la première sous bande d'énergie.

Lorsque la couche de AlGa_xN est dopée de type n, le champ total est donné par la somme de deux contributions : le champ de polarisation et le champ dû aux donneurs ionisés :

$$E_{\text{total}} = E_{\text{polar}} + \frac{en_{2\text{DEG}}}{\epsilon_{\text{couche}} \epsilon_0}$$

Où : E_{polar} est le champ de polarisation et ϵ_{couche} est la constante diélectrique de la couche AlGa_xN.

Dans l'approximation du puits triangulaire la différence d'énergie est par l'approximation de Frang Howard [9] :

$$E_0 - E_v = \left[\frac{3}{8} \right]^{2/3} \left[\frac{1}{2} \right]^{1/3} \left[\frac{3}{2} \frac{e^2 \hbar n_{2\text{DEG}}}{\epsilon_{\text{couche}} \epsilon_0 \sqrt{m^*}} \right]^{2/3}$$

$$E_f - E_0 = \frac{\pi \hbar^2}{m^*} n_{2\text{DEG}}$$

Nous considérons l'hétérostructure de AlGa_xN non dopé déposé sur du GaN qui constitue le canal utilisé du transistor HEMT où : S est la source, G est la grille métallique (contact de Schottky) et D est le drain.

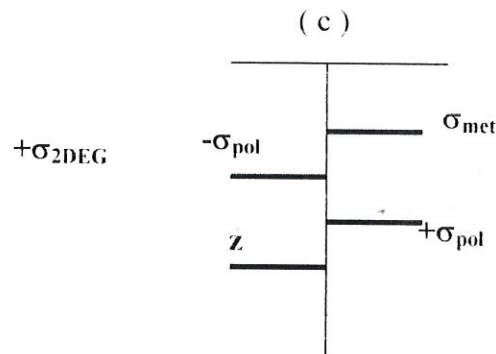
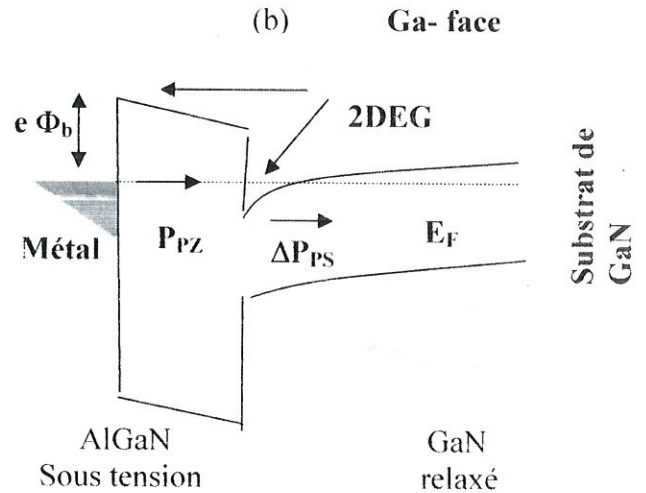
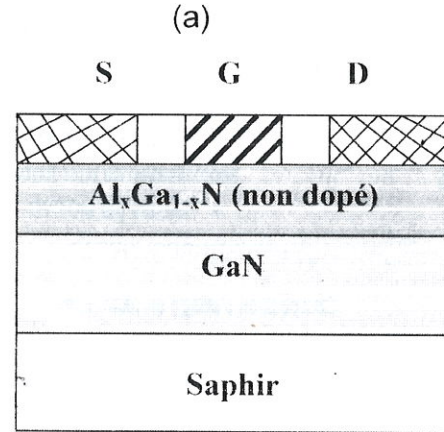


Fig. 2: (a)- Structure d'un HEMT Al_xGa_{1-x}N/ GaN ; (b)- Diagramme de bande énergétique correspondant; (c)- Diagramme de densité de charge.

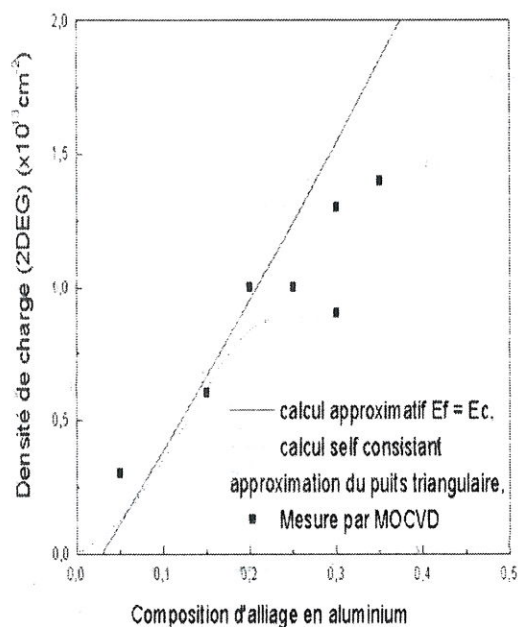


Fig.3 : Variation de la densité de charges 2DEG en fonction de la composition d'alliage AlGaIn dans le HEMT AlGaIn/ GaN [10].

Sur la Figure 3, nous représentons la variation de la densité de charges calculée en utilisant l'approximation $E_f = E_c$ et en utilisant un calcul self consistant[10] l'approximation du puits triangulaire. Nous avons représenté en rectangles les résultats obtenus par les mesures de Hall[11] pour un HFET constitué d'une couche de AlGaIn de 300Å qui joue le rôle d'une barrière sur le substrat de GaN, la croissance de cette hétérostructure AlGaIn/GaN se fait par MOCVD.

Nous remarquons que pour des concentrations d'aluminium inférieures à 20%, les résultats théoriques obtenus pour $E_f = E_c$ et le calcul self consistant sont proches des résultats expérimentaux ceci est due à la contribution des deux effets la

polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique.

Pour des concentrations d'aluminium supérieures à 20%, nous remarquons que les valeurs calculées et expérimentales sont différentes du fait que plusieurs effets contribuent : La présence de l'oxygène dans la couche AlGaIn favorise la formation de centres DX[12, 13], les défauts sont compensés dans la couche de AlGaIn [14] et enfin on a la relaxation de la contrainte dans la couche de AlGaIn [15] pour des épaisseurs $200\text{Å} < d < 400\text{Å}$, d'où une réduction de la composante piézoélectrique de la polarisation.

Nous considérons maintenant l'hétérostructure : $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($N_d = 10^{18}\text{ cm}^{-3}$) sur GaN (canal2DEG) qui est utilisée dans les transistors à effet champ (HEMT)

Sur la Figure 4, nous représentons la variation de la densité de charge 2DEG en fonction de l'épaisseur de AlGaIn pour différente composition d'alliage d'aluminium.

Nous remarquons que pour des concentrations Al inférieures à 20% les valeurs calculées par les deux approximations : $E_f = E_c$ et le calcul self consistant sont proches.

Lorsque la concentration d'aluminium augmente l'approximation du puits triangulaire n'est plus valable. Nous remarquons également que la densité de charge (2DEG) dépend faiblement de l'épaisseur de la couche de AlGaIn et augmente en augmentant la concentration d'aluminium. Par conséquent, on obtient un accroissement de la barrière AlGaIn qui est en contact avec la grille métallique (elle joue le rôle d'une barrière Schottky), ce qui provoque une diminution importante des pertes de courant dans la grille.

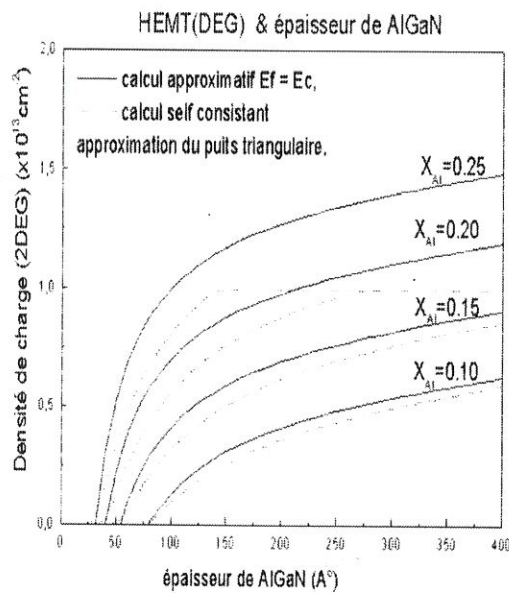


Fig. 4 : Variation de la densité de charge 2DEG en fonction de l'épaisseur de AlGaIn pour différentes compositions d'alliage en Al.

3. Effets de polarisation sur les transistors HFET a double couches Metal/GaN/AlGaIn/GaN :

Dans la partie précédente, nous avons étudié un transistor conventionnel à base de nitrure Metal/AlGaIn-type n /GaN, où nous avons étudié les effets de polarisation de charge. Nous allons maintenant considérer l'influence de l'introduction d'une couche de GaN dopé de type n dans le transistor conventionnel Metal/AlGaIn/GaN entre le contact métal et la couche de la barrière AlGaIn . Nous remarquons ensuite dans les résultats numériques que l'introduction de cette couche va modifier la hauteur de la barrière Schottky et par conséquent les caractéristiques du transistor et en particulier la caractéristique courant-tension via la polarisation piézo-électrique.

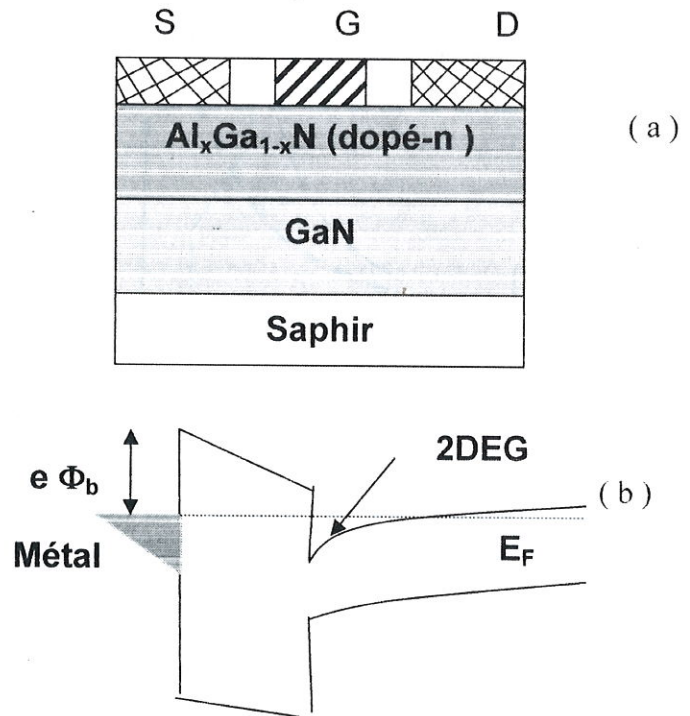


Fig. 5: Structure (a) & diagramme de bande (b) du HEMT conventionnel de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$,

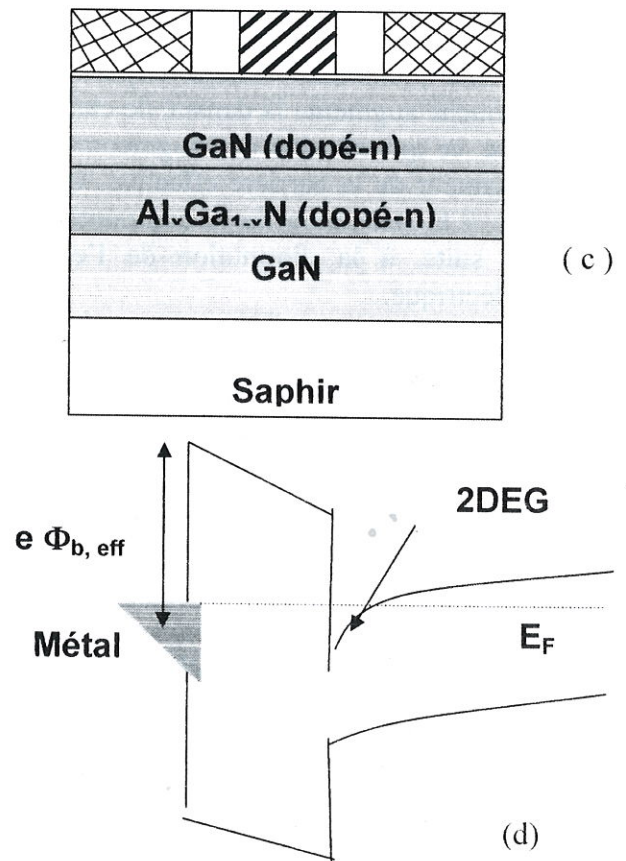


Fig. 6 : Structure (c) & diagramme de bande (d) d'un HEMT de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ avec Buffer GaN

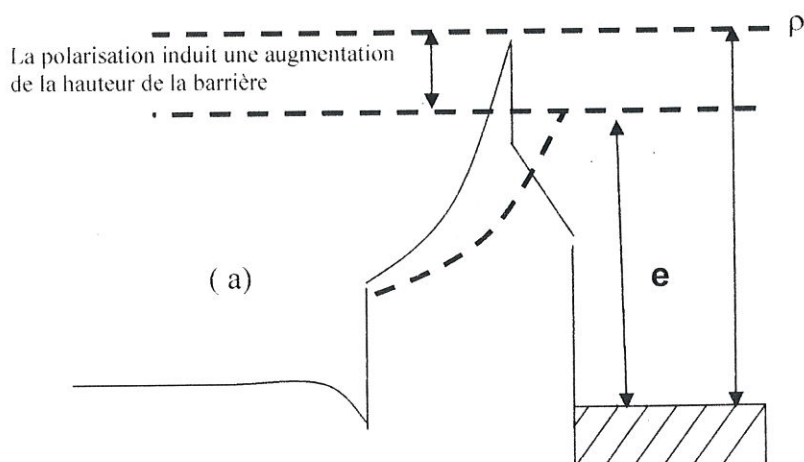


Fig. 7 (a) : Comparaison du diagramme de bande énergétique d'un HEMT conventionnel $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ et d'un HEMT à barrière à double couche $GaN/Al_xGa_{1-x}N/GaN$.

Sur la Figure 8 et 9 nous représentons la variation de la densité de charge et de la hauteur de la barrière effective de Schottky dans le transistor à double couches Metal/GaN/AlGaIn-225Å/GaN en fonction de l'épaisseur de la couche de GaN pour différentes concentration Al. Nous remarquons que lorsque l'épaisseur de la couche augmente la densité de charge diminue, ce qui entraîne une augmentation de la hauteur de la barrière effective. Ceci est due à la relaxation de la contrainte et par la suite, à la diminution de l'effet piézoélectrique.

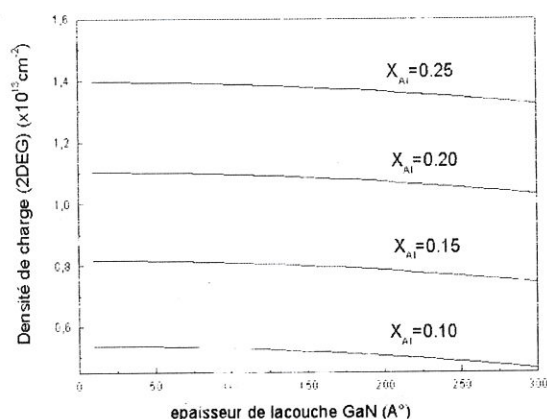


Fig.8: variation la densité de charge en fonction l'épaisseur de couche de GaN dans le HEMT double couche Metal/GaN/AlGaIn/GaN.

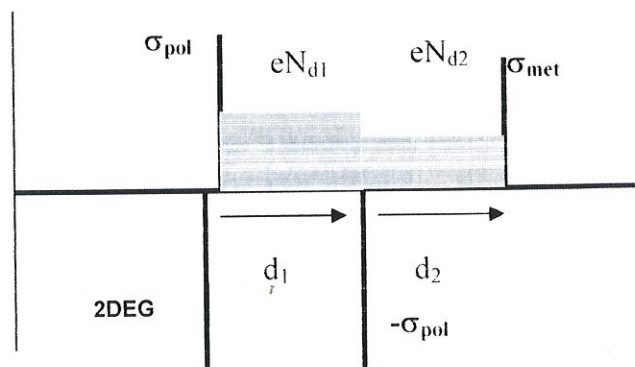


Fig.7(b) : Diagramme de densité de charge d'un HEMT à base de GaN/ $Al_xGa_{1-x}N/GaN$.

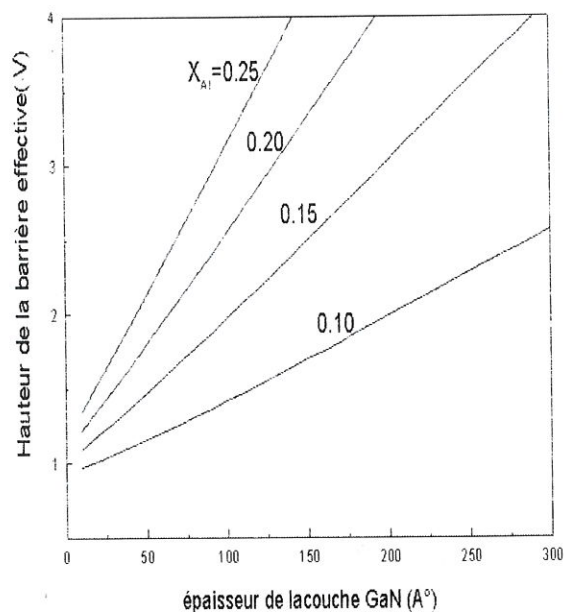


Fig.9 : variation de la hauteur de la barrière effective en fonction de l'épaisseur de la couche de GaN dans le transistor HEMT double couche Metal/GaN/AlGaIn-225 Å/GaN.

Sur la Figure 10, nous représentons la caractéristique courant-tension pour les deux transistors. Ces résultats montrent que le courant source-drain dans le transistor à double couches est plus faible



que celui d'un transistor conventionnel ceci est due à l'augmentation de la hauteur de la barrière de Schottky dans la structure à double couche via la relaxation de la contrainte qui réduit l'effet piézo-électrique.

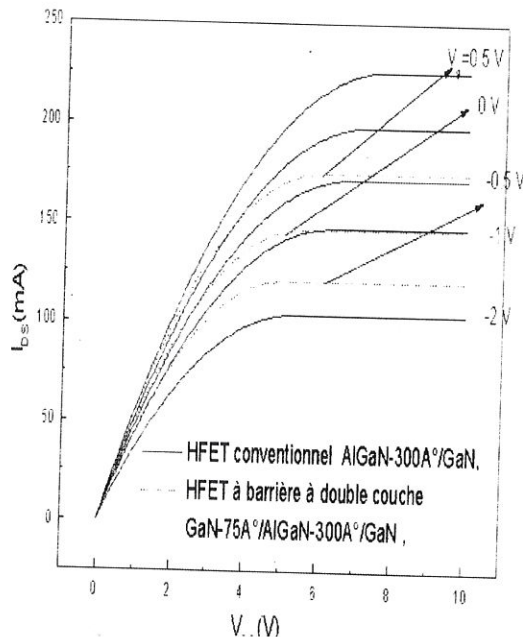


Fig.10: Caractéristiques courant -tension
-En traits pleins du HFET conventionnel AlGaIn-300Å/GaN
-En traits discontinus du HFET à barrière à double couche GaN-75Å/AlGaIn-300Å/GaN.

Conclusion :

Nous avons montré que dans le transistor à effet de champ HEMT n-GaAlN/ GaN, on obtient un accroissement de la densité de charge (2DEG) en fonction de la concentration d'Al de l'alliage GaAlN, ce qui provoque une augmentation de la hauteur de la barrière Schottky et donc une diminution importante des pertes de courant dans la grille.

Pour une polarité N, nous obtenons la formation d'un gaz 2DEG dans les hétérostructures InGaIn/GaN. Ce 2DEG forme le canal dans InGaIn.

Nous observons également la formation d'un gaz de trous dans AlGaIn/GaN polarisé face N.

Nous avons montré que le transistor à base InGaIn/GaN face N est plus intéressant du fait que la densité de charge d'électron est plus importante et par conséquent la hauteur de la barrière Schottky est plus importante.

Nous avons aussi montré l'influence de l'introduction d'une couche de GaN dans le transistor conventionnel Metal/AlGaIn/GaN entre le contact métal et la couche de la barrière AlGaIn. Nous montrons que cette couche modifie la hauteur de la barrière Schottky et par conséquent, les caractéristiques du transistor et en particulier, la caractéristique courant-tension via la polarisation piézo-électrique. Nous avons montré qu'une densité de charge est induite dans les HFET conventionnel Metal/ AlGaIn-300 Å/GaN et dans le transistor à double couches Metal/GaN(75Å)/AlGaIn(225Å)/GaN.

Ensuite, nous avons calculé la hauteur de la barrière de Schottky effective dans la structure à double couches en fonction de l'épaisseur de la couche introduite GaN pour différentes concentration Al, et la caractéristique courant-tension pour les deux transistors.

Ces résultats montrent que l'augmentation de la hauteur de la barrière de Schottky dans la structure à double couche via la polarisation piézo-électrique réduit le courant source-drain dans ce type de transistor à double couche.

**REFERENCE:**

- [1] S.Nakumara and G.Fasol, the blue GreenDiode(springer, Berlin,1997)
- [2] S.H.Park, and S.L.Chuang, Phys.Rev B. vol. 59,4725,1999.
- [3] S.L.Chuang, Physics of OptoElectronic Devices(Wiley, New York,1995), Chap4.
- [4] F.Bernardini, .Fiorontini,D.Vanderbilt, Phys. Rev B. vol. 56, p. 10024,1997
- [5] G. Martin, A. Botchkarev, A. Rockett, and H. Morkoç, Appl. Phys. Lett. vol. 68, p. 2541 1996.
- [6] E. T. Yu, G. J. Sullivan, P. M. Asbeck, C. D. Wang, D. Qiao, and S. S. Lau, Appl. Phys. Lett, vol. 71, p. 2794, 1997.
- [7]Th.Gessmann, J.W.Graff,Y .-L.Li, E.L.Waldron, and E.F.Schubert, J.Apply.Phys. vol.92, p.3740,2002.
- [8] Th.Gessmann, Y .-L.Li, E.L.Waldron, J.W.Graff, E.F.Schubert and J.K.Sheu, Apply. Phys. Letter. Vol.80,2002.
- [9] F.Fang and W.E.Howard, Phys.Rev.Lett.16, p.797, 1966.
- [10]N.Mokdad, thèse de doctorat, 2006
- [11] C. H. Park and D. J. Chadi, Phys. Rev. B, vol. 55, p. 12995, 1997.
- [12] C. H. Park and D. J. Chadi, Phys. Rev. B, vol. 55, p. 12995, 1997.
- [13] C. G. Van de Walle, Phys. Rev. B, vol. 57, p.R2033, 1998.
- [14] C. Stampfl and C. G. Van de Walle, Appl. Phys. Lett.vol.72, p. 459, 1998.
- [15] A. D. Bykhovski, R. Gaska, and M. S. Shur, Appl. Phys. Lett. vol. 73, p. 3577, 1998.