

SIMULATION BIDIMENSIONNELLE DES CARACTERISTIQUES I-V DU TRANSISTOR MESFET GaAs

Reçu le 05/11/2003 – Accepté le 31/12/2004

Résumé

Dans cet article, nous présentons un modèle de calcul des caractéristiques courant-tension I-V d'un transistor à effet de champ à barrière Schottky à l'Arséniure de Gallium, dit MESFET GaAs. Ce modèle physique est basé sur l'analyse bidimensionnelle de l'équation de Poisson dans la zone active sous la grille. Dans ce cadre, nous avons élaboré un logiciel de simulation basé sur des expressions analytiques que nous avons établi précédemment. Les résultats théoriques obtenus sont discutés et comparés avec ceux de l'expérience.

Mots clés: MESFET, GaAs, Barrière de Schottky, propriétés bidimensionnelles.

Abstract

In this paper we present a computing model of the current-voltage I-V characteristics of a Gallium arsenic Schottky barrier field effect transistor called GaAs MESFET. This physical model is based on the bi-dimensional analysis of the Poisson equation in the active region under the gate. In this frame, we elaborated a simulation software based on analysis expressions which we have previously set up. The obtained theoretical results are discussed and compared to the experimental ones.

Keywords: MESFT, AsGa, Schottky barrier, two-D properties.

N. MERABTINE

Electronics department
Faculty of engineering
University Mentouri
Constantine (Algeria)

S. KHEMISSI

Technology department
University of Khenchela
Khenchela (Algeria)

C. KENZAÏ

Département de physique
Faculté des Sciences
Université Mentouri
Constantine (Algérie)

Le transistor à effet de champ à barrière Schottky à l'Arséniure de Gallium noté MESFET GaAs est un des composants majeur utilisé dans les dispositifs électroniques. Dans ce travail, nous allons proposer un modèle de calcul des caractéristiques courant tension I-V des transistors MESFET GaAs à grille courte, en prenant en considération la résolution bidimensionnelle de l'équation de Poisson sous la zone de charge d'espace ainsi que l'effet des éléments parasites. Dans ce qui suit, nous avons élaboré un logiciel de simulation permettant de résoudre le système d'équations différentielles et de tracer les différentes séries de courbes.

1- Position du problème

La plupart des modèles physiques actuels [1], [2], [3] sont basés sur la résolution bidimensionnelle de l'équation de Poisson. Cette équation connue en physique des semiconducteurs est utilisée dans tous les modèles pour expliquer les différents phénomènes physiques spécifiques du MESFET GaAs.

Mais le problème principal pour ces modèles réside dans le couplage des équations différentielles, partielles et non-linéaires qui nécessitent d'être résolues simultanément. La difficulté de poser des hypothèses valables pour les conditions limites aux interfaces libres nécessite le recours à des approximations et la négligence d'un certain nombre de termes qui agit négativement sur l'exactitude du modèle.

Nous présentons ici un modèle analytique qui associe la description des phénomènes physiques et la simplicité des équations mathématiques.

2- Détermination de la tension bidimensionnelle dans la zone active

Le traitement mathématique bidimensionnel des équations différentielles à l'aide de la technique de Green donne une distribution

ملخص

قمنا في هذا المقال بصياغة نموذج لحساب الخصائص الستاتيكية تيار – توتر لصمام العبور ذو الأثر الحقلية بوصلة شونكي على زرنيخ الغاليوم آخذين بعين الاعتبار التحليل الثنائي لمعادلة بواسون. قمنا في هذا الإطار بصياغة برنامج محاكاة اعتمادا على العبارات الرياضية المحسوبة أنفا. نوقشت وقورنت النتائج النظرية المأخوذة مع النتائج التجريبية.

الكلمات المفتاحية: خواص بعدين، حاجز Schottky، AsGa، MESFET

bidimensionnelle du champ électrique sous la région de la zone de charge d'espace (ZCE).

L'équation générale de Poisson à deux dimensions s'écrit :

$$\Delta V_c(x, y) = \frac{\partial^2 V_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_c}{\partial y^2} = \frac{-\rho(x, y)}{\varepsilon} \quad (1)$$

Pour calculer la tension sous la grille, la zone de charge d'espace est divisée en deux régions principales comme montré dans la figure 1 [4]:

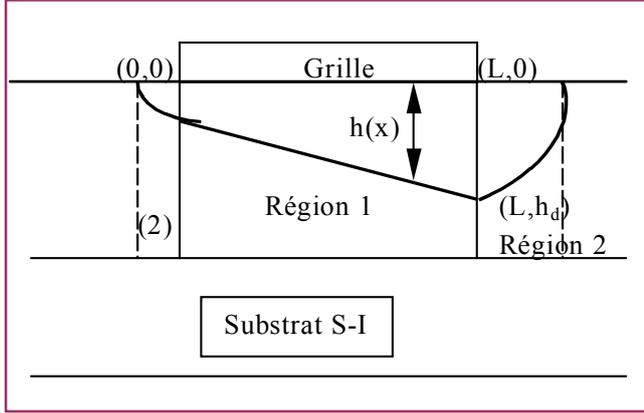


Figure 1: Régions de déplétion (1) contrôlée par la grille, (2) non contrôlée par la grille.

♦ La région (1) directement au-dessous de la grille, est dite région contrôlée par la grille. Nous utilisons l'approximation unidimensionnelle pour calculer la composante de la relation de tension $V_q(x, y)$ spécifique à cette région.

♦ La région (2), en dehors de la première région, est dite région non contrôlée par la grille.

La tension bidimensionnelle du canal sous la grille s'écrit comme suite :

$$V_c(x, y) = V_q(x, y) + V_1(x, y) \quad (2)$$

où :

$$V_q(x, y) = \int_0^y \frac{eNd(x, y)}{\varepsilon} y dy + y \int_0^{h(x)} \frac{eNd(x, y)}{\varepsilon} dy + V_{bi} - V_g \quad (3)$$

et

$$V_1(x, y) = \left[A_1^s \frac{\text{Sinh}(k_1(L-x))}{\text{Sinh}(k_1L)} + A_1^d \frac{\text{Sinh}(k_1x)}{\text{Sinh}(k_1L)} \right] \text{Sin}(k_1y) \quad (4)$$

$$\text{avec : } A_1^s = \frac{2}{a} \int_0^a [V_c(0, y) - V_q(0, y)] \text{Sin}(k_1y) dy \quad (5)$$

$$\text{et : } A_1^d = \frac{2}{a} \int_0^a [V_c(L, y) - V_q(L, y)] \text{Sin}(k_1y) dy \quad (6)$$

A_1^d et A_1^s : sont des coefficients de Fourier pour la tension supplémentaire de grille côté drain et source respectivement [4].

$$\text{et : } k_1 = \frac{\pi}{2a}$$

A partir de (3) et (4), l'expression de la tension totale devient :

$$V_c(x, y) = \int_0^{h(x)} \frac{eNd(x, y)}{\varepsilon} y dy + V_1(x, y) - V_g + V_{bi} \quad (7)$$

3- Caractéristiques courant- tension I-V

Pour calculer l'expression du courant de drain en fonction de la tension de grille, nous utilisons les hypothèses suivantes:

- On néglige le courant dans le sens y ; cette approximation est valable pour les composants à grille courte.
- On suppose la mobilité des électrons constante.
- On divise le canal en trois régions selon la valeur du champ électrique (Fig. 2) [5].

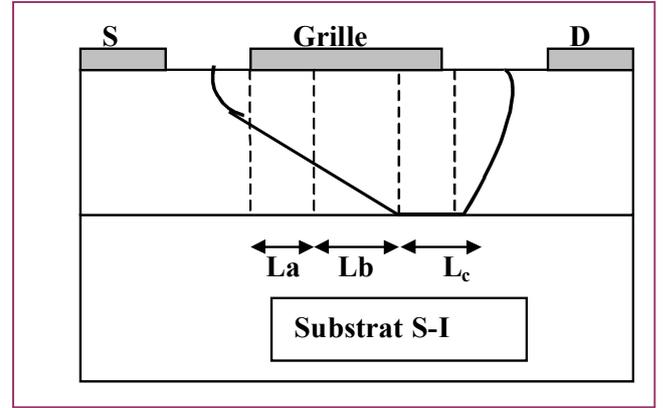


Figure 2: Répartition de la zone active selon la variation du champ électrique.

4- Détermination de l'équation générale du courant

Pour calculer l'équation générale du courant de drain, nous avons utilisé l'approximation unidimensionnelle pour simplifier les expressions mathématiques.

On utilise aussi les expressions suivantes :

$$\vec{J}_x = -e\mu_n Nd(y) E_x = -e\mu_n Nd \frac{dV}{dx} \quad (8)$$

L'expression du courant de drain s'écrit:

$$I_d = - \int_{(s)} J_x ds = -Z \int_{h(x)}^a J_x dy \quad (9)$$

En utilisant des intégrales simples, l'expression de courant est obtenue par la relation:

$$I_d = \frac{(eNd)^2 Z \mu_n}{\varepsilon L} \left[\frac{a}{2} (h_d^2 - h_s^2) - \frac{1}{3} (h_d^3 - h_s^3) \right] \quad (10)$$

$$\text{où : } h_s = \left[\frac{2\varepsilon}{eNd} (V_{bi} - V_g) \right]^{1/2} \quad (11.a)$$

$$h_d = \left[\frac{2\varepsilon}{eNd} (V_d + V_{bi} - V_g) \right]^{1/2} \quad (11.b)$$

sont les largeurs de la zone de charge d'espace (ZCE) côté source et côté drain respectivement.

En définissant le courant de pincement par :

$$I_p = \frac{(eNd)^2 Z\mu a^3}{2\varepsilon L} \quad (12)$$

et la tension de pincement V_p par :

$$V_p = \frac{eNd}{2\varepsilon} a^2 \quad (13)$$

l'expression générale du courant dans le canal I_d devient :

$$I_d = I_p \left[\frac{V_d}{V_p} - \frac{2}{3} \left(\frac{V_d + V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{3/2} + \frac{2}{3} \left(\frac{V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{3/2} \right] \quad (14)$$

5- Effet de la loi de mobilité

L'hypothèse de mobilité constante et indépendante du champ électrique dans le GaAs de type N ne peut traduire les phénomènes physiques.

L'expression analytique des variations de la mobilité avec le champ électrique que nous utilisons est une relation simplifiée [6] donnée comme suit :

* Pour le domaine des champs électriques faibles où $E < E_0$:

$$\mu = \mu_0 \quad (15.a)$$

* Pour le domaine des champs électriques élevés au-delà de E_0 ($E \geq E_0$) :

$$\mu = \frac{\mu_0}{\left[1 + \left(\frac{E - E_0}{E_s} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (15.b)$$

Cette loi de mobilité permet d'obtenir les différentes expressions du courant de drain dans différents régimes de fonctionnement.

Les caractéristiques $I_d(V_d, V_g)$ du transistor MESFET GaAs correspondant à des régimes de fonctionnement différents, sont régis par les équations suivantes :

❖ **Régime linéaire** : Ce régime existe tant que L_a occupe tout le canal; il correspond au domaine des champs faibles où la mobilité est égale à μ_0 .

L'expression du courant de drain dans ce régime s'écrit :

$$I_d = I_{pl} \left[\frac{V_d}{V_p} - \frac{2}{3} \left(\frac{2}{3} \frac{V_d + V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{3/2} + \frac{2}{3} \left(\frac{V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{3/2} \right] \quad (16)$$

$$\text{où : } I_{pl} = \frac{e^2 N d^2 Z \mu_0 a^3}{2 \varepsilon L_a}$$

❖ **Régime de pincement** : Quand la tension de drain augmente, le champ électrique dans le canal augmente au-delà de E_0 . Le canal sous la grille présente alors deux régions : l'une, de longueur L_a dans laquelle le champ est inférieur à E_0 et la mobilité des électrons est constante, donnée par $\mu = \mu_0$. L'autre, de longueur L_b ($L = L_a + L_b$) dans laquelle le champ est supérieur au champ E_0 mais inférieur au champ E_m , et la mobilité des électrons est donnée par l'expression (15.b).

1^{ere} Région : Pour : $E < E_0$ et $0 < x < L_a$

$$L_a = \frac{I_{pl} L}{I_d} \left[\frac{V_d}{V_p} - \frac{2}{3} \left(\frac{V_d + V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{3/2} - \frac{2}{3} \left(\frac{V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{3/2} \right] \quad (17)$$

2^{eme} Région : Pour : $E_0 < E < E_m$ et $L_a < x < L$

$$L_b = \frac{I_{ps} L}{I_d} \left[\frac{V_d - V_d a}{V_p} - \frac{2}{3} \left(\frac{V_d + V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{3/2} + \left(\frac{V_d + V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{3/2} \right] \quad (18)$$

$$\text{où : } I_{ps} = \frac{I_p}{\left[1 + \left(\frac{E - E_0}{E_s} \right)^2 \right]^{1/2}}$$

❖ **Régime de saturation** : Dans ce cas, le canal sous la grille est divisé en trois régions L_a , L_b et L_c où :

$$L = L_a + L_b + L_c.$$

$$L_a = \frac{I_{pl} L}{I_d} \left[\frac{V_d}{V_p} - \frac{2}{3} \left(\frac{V_d + V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{3/2} - \frac{2}{3} \left(\frac{V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{3/2} \right] \quad (19)$$

$$L_b = \frac{I_{ps} L}{I_d} \left[\frac{V_{dm} - V_d}{V_p} - \frac{2}{3} \left(\frac{V_{dm} + V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{3/2} + \frac{2}{3} \left(\frac{V_d + V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{3/2} \right] \quad (20)$$

$$L_c = \frac{I_{ps} L}{I_d} \left[\frac{V_d - V_{dm}}{V_p} - \frac{2}{3} \left(\frac{V_d + V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{3/2} + \frac{2}{3} \left(\frac{V_{dm} + V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{3/2} \right] \quad (21)$$

où : V_{da} et V_{dm} sont les tensions maximales des régimes linéaire et pincement successivement.

6- Effet de la tension $V_l(x, y)$

L'effet de la tension $V_l(x, y)$ est pris en considération dans les expressions de la tension de drain et de grille suivantes :

$$V_d \rightarrow V_d + V_{ld} \quad \text{et} \quad V_g \rightarrow V_g + V_{ls} \quad (22)$$

où V_{ls} et V_{ld} sont des composantes de $V_l(x, y)$ côtés source et drain respectivement; elles sont calculées à partir des équations suivantes :

$$V_{ls} = V_l(0, h_s) = A_1^s \text{Sin} \left(\frac{h_s \pi}{2a} \right) \quad (23.a)$$

$$V_{ld} = V_l(L, h_d) = A_1^d \text{Sin} \left(\frac{h_d \pi}{2a} \right) \quad (23.b)$$

Les expressions des coefficients A_1^s et A_1^d sont très complexes [5]. Elles sont liées essentiellement aux tensions de polarisations V_d et V_g , et aux tensions V_{bi} et V_p .

$$A_1^s = Vp \left[a_1 + b_1 \left(\frac{Vbi - Vg - Vl}{Vp} - c_1 \right)^{1/2} \right] \quad (24.a)$$

$$A_1^d = Vp \left[a_1 + b_1 \left(\frac{Vd + Vbi - Vg - Vl}{Vp} - c_1 \right)^{1/2} \right] \quad (24.b)$$

Pour un dopage uniforme, les coefficients a_1, b_1, c_1 et Vl sont des constantes.

7- Effet des éléments parasites

Les caractéristiques que nous avons présentées sont celles des grandeurs internes ou intrinsèques (Id, Vd, Vg). Pour obtenir les caractéristiques externes ou extrinsèques du composant (Ids, Vds, Vgs), il suffit de prendre en considération l'effet des résistances parasites d'accès de source Rs et de drain Rd , ainsi que l'effet de la résistance Rp parallèle au canal sur les valeurs des tensions de polarisations (Fig. 3).

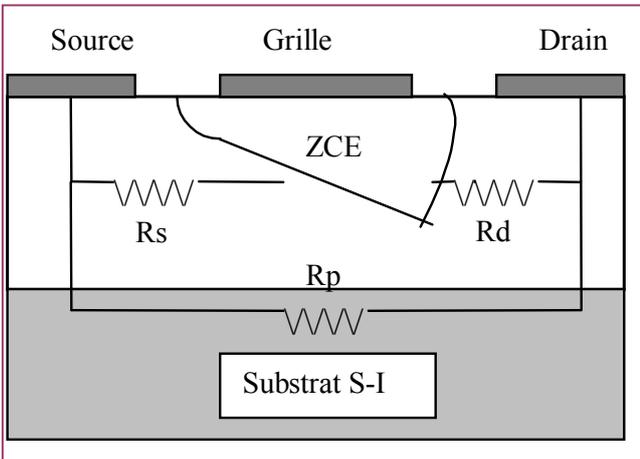


Figure 3 : Résistances parasites dans le MESFET GaAs.

Pour obtenir les expressions réelles des caractéristiques $Ids(Vds, Vgs)$, il suffit de remplacer les termes intrinsèques par les termes extrinsèques dans toutes les relations précédentes.

Donc :

$$Vd = Vds + Vld - (Rs + Rd) Id \quad (25.a)$$

$$Vg = Vgs + Vls - Rs Id \quad (25.b)$$

$$Id = Ids - (Vd / Rp) \quad (25.c)$$

8- Résultats et discussions

Afin de valider les caractéristiques $I-V$ du transistor MESFET GaAs établies précédemment, un logiciel de simulation, basé sur les diverses formules et les équations est présenté, ainsi que les résultats obtenus et leurs discussions.

Le calcul numérique du courant de drain en fonction des tensions de polarisations fait appel aux expressions (16) à

(21) établies précédemment.

L'étude a été effectuée sur deux transistors le MESFET N°1 et le MESFET N°2 [5] dont les paramètres sont regroupés dans le tableau 1.

Pour calculer les tensions Vld et Vls (expressions 23.a et 23.b), les valeurs des paramètres a_1, b_1, c_1 et Vl/Vp utilisés sont regroupés dans le tableau 2.

Tableau 2: Valeurs des paramètres a_1, b_1, c_1 et Vl/Vp pour le calcul de Vld et Vls .

MESFET N°	a_1	b_1	C_1	Vl/Vp
1	-0,10	0,10	0,04	0,01
2	-0,14	0,10	0,03	0,01

Afin d'examiner la validité de notre modèle, nous avons comparé les résultats théoriques avec ceux expérimentaux pour les deux transistors précédents [MESFET1 et MESFET2].

Sur la figure 4? nous avons présenté respectivement la comparaison de la caractéristique $Ids(Vds, Vgs)$ mesurée et calculée à l'aide de la simulation pour le MESFET1 et MESFET2.

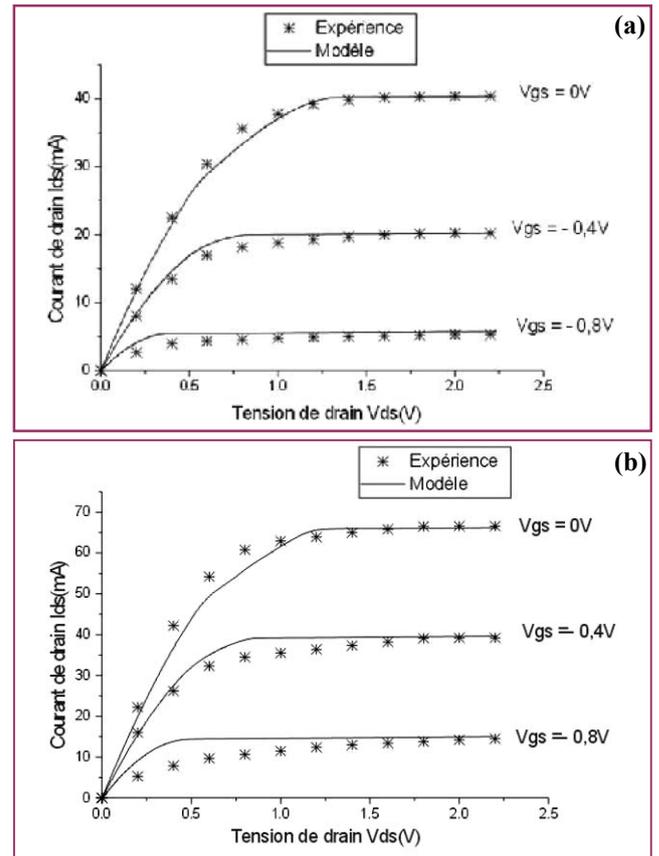


Figure 4: Comparaison de la caractéristique I-V mesurée et calculée à l'aide de la simulation : (a) pour le MESFET N°1, (b) pour le MESFET N°2.

Tableau 1: Paramètres des transistors MESFET N°1 et MESFET N°2.

Trans	L(μm)	a(μm)	Z(μm)	μo(m²/Vcm)	Nd(10²³/m)	Vs(m/s)	Vbi(V)	Vp(V)
MESFET 1	1	0.153	300	0.4000	1.17	3.6.10⁵	0.85	1.93
MESFET2	0.5	0.1435	300	0.4000	1.31	7.3.10⁵	0.85	1.95

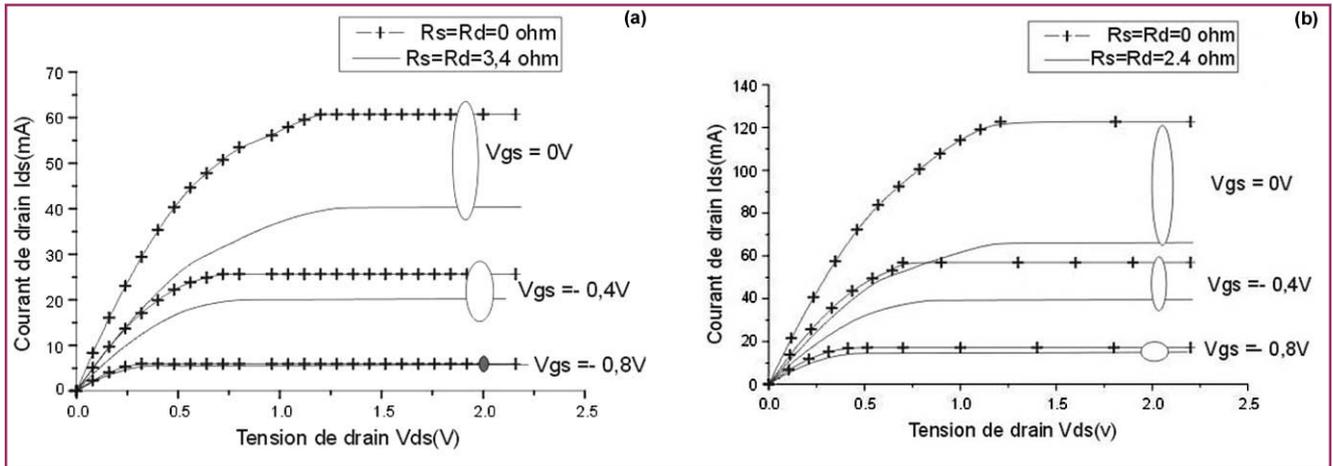


Figure 5: Effet des résistances parasites sur les caractéristiques I-V.

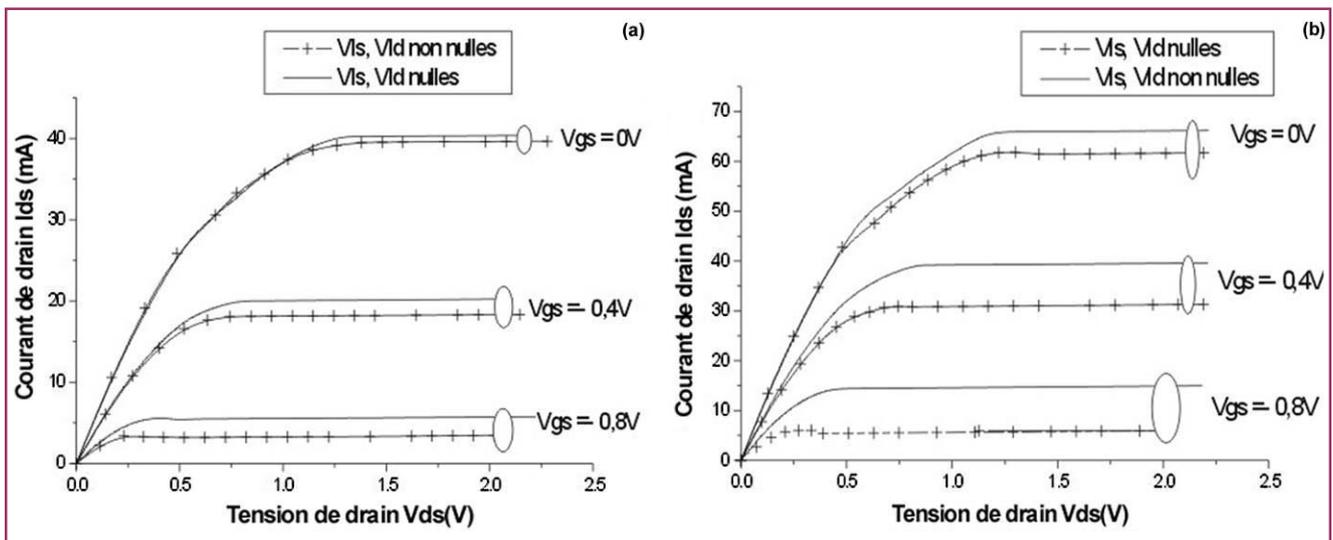


Figure 6: Effet des tensions de bord V_{ls} et V_{ld} sur les caractéristiques I-V.

En régime linéaire, c'est-à-dire à faible tension de polarisation de drain, nous remarquons un bon accord entre les valeurs expérimentales et celles de la simulation pour les deux transistors.

Lorsque la tension de drain augmente et devient plus importante, nous remarquons un certain écart entre les valeurs expérimentales et les résultats de la simulation qui augmente au fur et à mesure, jusqu'à saturation. Cet écart est principalement dû aux approximations faites dans le modèle mathématique et dans le logiciel de simulation, à l'effet des paramètres géométriques ainsi qu'à l'existence des phénomènes quantiques parasites que nous n'avons pas pris en considération.

En régime de saturation, lorsque la tension de drain devient importante, nous avons remarqué que les résultats théoriques sont en bon accord avec ceux de l'expérience.

En conclusion, nous remarquons également que les résultats théoriques et ceux de l'expérience ont le même comportement envers la tension de drain et coïncident bien, notamment aux valeurs élevées de la tension V_{ds} . Ceci montre le bien fondé de la méthode.

- Effet des résistances parasites de source et de drain

Dans le but de mettre en évidence les effets des résistances parasites de source R_s et de drain R_d sur les caractéristiques I-V du MESFET GaAs, nous présentons sur la figure 5, et dans le cas des deux transistors précédents, les variations du courant de drain en fonction de la tension de drain avec et sans les résistances parasites.

On constate clairement que les effets de ces résistances ne peuvent être négligés, et sont d'autant plus importants que le courant de drain I_{ds} est élevé.

- Effet de la tension $V_l(x,y)$

La résolution bidimensionnelle de l'équation de Poisson doit prendre en considération deux tensions existant aux bords du canal conducteur V_{ls} côté source et V_{ld} côté drain. Ces tensions, malgré leurs valeurs très faibles, influent sur les caractéristiques statiques I-V du transistor. Sur la figure 6, nous présentons l'effet de ces tensions de bord pour les deux structures que nous avons étudiées.

CONCLUSION

Nous avons proposé une étude analytique des caractéristiques $I-V$ du transistor MESFET GaAs, à partir d'un modèle physique basé sur l'analyse bidimensionnelle de l'équation de Poisson, par la technique de Green. L'influence des éléments parasites et des tensions de bord Vls et Vld sur l'expression du courant de drain I_{ds} a été établie.

Cette étude nous a donc permis d'effectuer une synthèse sur l'importance de l'analyse bidimensionnelle pour réaliser un modèle analytique valable des caractéristiques statiques du composant MESFET GaAs.

REFERENCES

- [1]- Nowden S. et Pantoja, *IEEE Tran. El. Dev.*, Vol. 36, N°9, (1989).
- [2]- Tran H. *et al.* , *IEEE Tran. El. Dev.*, Vol. 39, N°9, (1992).
- [3]- Janiguez B. *et al.*, *IEEE Tran. El. Dev.*, Vol.46, N°8, (1999).
- [4]- Chin S.P., We C.Y., *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 40, N°4, (1993).
- [5]- Shin K.M., Klamer D.P., Lion J.I., *Solid Stat Electronics*, Vol. 35, N°11, (1992).
- [6]- Chang C.S., Day D.Y., *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 36, N°2, (1989). □