

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention de diplôme

Master

En

Télécommunication

Option :

Systemes de télécommunication

Titre :

**Etude par simulation des propriétés électriques des
composants HEMTs à base d'hétérostructure
ALGaAs/GaAs**

Réalisé par :

Moussaoui Islam

Rahmoune Abderrahmene

Encadré par :

Mr Kaddeche Mourad

Année Universitaire 2014/2015

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions ALLAH, le tout puissant, l'omnipotent, pour le courage et la volonté qu'il nous a inspiré.

Nous exprimons toute notre gratitude à monsieur Kaddeche Mourad le directeur de cette mémoire pour ces conseils éclairés et attentionnés, sa disponibilité et d'avoir guidé pendant toute cette recherche en incitant à développer plus d'effort. Grâce à la confiance qu'il a témoignée nous, nous pu mener à bout ce travail, qu'il trouve ici l'expression de toute ma reconnaissance et mes remerciements.

Nous exprimons ma profonde reconnaissance à monsieur Benrebaya Mohammed professeur à l'université Djillali Bounaama de Khemis Miliana, d'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

adresse nos sincères remerciements à monsieur Boussaha Aek professeur à l'université Djillali Bounaama de Khemis Miliana, membre de notre jury pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.

Nous tiens à remercier sincèrement, tous les membres de la faculté de Technologie et aussi tous mes collègues de poste de maîtrise Télécommunication pour leurs encouragements sans oublier nos amis et nos familles.

TABLE DES MATIERES

Remerciement	I
Tableaux de matière	II
Liste de figure	V
Liste de tableau	VI
Introduction générale	1
Chapitre I : Propriétés physiques et structurales d'arséniure de Gallium (GaAs)	
I .Introduction	3
I.1. L'Arséniure de Gallium (GaAs)	3
I.1.1. Structure cristalline d'Arséniure de Gallium (GaAs)	3
I.2. Propriétés électriques et physiques du GaAs	4
I.2.1 . La polarisation	4
I.2.1.1. La polarisation spontanée	5
I.2.1.2. La polarisation piézoélectrique	5
I.3. Propriétés thermiques	5
I.3.1 Conductivité thermique	6
I.3.2 Chaleur spécifique	6
I.3.3 Dilatation thermique	6
I.3.4 Température de debye	7
I.4 Avantages et inconvénients du GaAs	7
I.6 Hétérojonction	8
I.6.1. Définition	8
I.6.2. Les différents types d'hétérojonctions	8
I.6.3. Hétérojonction à l'équilibre thermique	9
I.7. Les substrats adéquats pour le GaAs hexagonal	12
I.7.1. Le silicium (Si)	13
I.7.2. Le diamant	13
I .8. Conclusion	13
Chapitre 02 : Les transistors HEMTs à base de l'hétérostructure (AlGaAs/GaAs)	
II.1.1. Historique	14
II.1.2.Introduction	14
II.2.Fonctionnement	15
II.3.Polarisation des transistors à effet de champ	15
II.4.Classification	15

II.5.Applications spécifiques des FET	17
II.5.1.Interrupteur analogique	17
II.6.les avantages et les inconvénients des FET	18
II.7.ETUDE DES TRANSISTEURS A EFET DE CHAMP.	19
II.7.1 TRANSISTORS à JONCTION (JFET)	19
II.7.1.1. Structure .	29
II.7.1.2. Fonctionnement	20
II.7.1.2.1. Etude expérimentale	20
II.7.1.2.2.Réseaux de caractéristiques	21
II.7.2. TRANSISTORS METAL OXYDE (MOSFET)	22
II.7.2.1.Structure	22
II.7.2.2.MOS à canal diffusé.	23
II.7.2.3 .Caractéristiques	24
II.7.2.4. MOS à canal induit	25
II.7.2.5. Utilisations des transistors MOS	25
II.7.6.Avantages et Inconvénients des transistors MOS	27
II.7.3.TRANSISTORS (MESFET) (MEtalSemiconductor Field Effect Transistor)	27
II.8.1. État de l'Art sur les Transistors MESFET GaAs	30
II.8.2.Le transistor a haute mobilité d'électron (HEMT)	30
II.8.3. Principe de fonctionnement du transistor HEMT	30
II.8.4. Contrôle linéaire de la charge	32
II.8.5. Transconductance et conductance de drain	39
II.8.6.CONCLUSION	41
Chapitre 03 : Simulation de transistor HEMT (GaAs) avec logiciel SILVACO ATLAS	
Partie I :Presentation de logiciel « Silvaco-Atlas »	42
III.I Introduction	42
III.I.1.Logiciel desimulation « Silvaco-Atlas ».	43
III.I.2.Utilisation du logiciel« Silvaco-Atlas »	43
III.I.2 .1.Réalisation	44
III.I.3 Structuredefichierd'entrée	45
III.I .4Spécification de lastructureétudiée.	46
III.I.4-aMaillage	46
III.I.4.b.Régions	47

III.I.4 .cElectrodes	49
III.I.4.dDopage	49
III.I.5Spécification dumodèle etdumatériau	50
III.I.6.Méthodes numériqueà sélectionner	52
III.I.7.Spécification deSolution	52
III.I.8. Analysedesrésultats	53
Partie II : Résultat et interprétation	55
III.II.1 Introduction	55
III.II.2Le transistor $Al_{0.23}Ga_{0.77}As/GaAs$ HEMT	55
III.II.2.1 Description de la structure hétérojonction	55
III.II.3.1 Les caractéristiques de transfert de $AlGaAs/GaAs$ HEMT	57
III.II.4L'influence des propriétés dumatériau	60
III.II.4.1L'effet de la fraction molaire sur les caractéristiques du transistrHEMT	60
III.II.4.2 épendance de la densité n_s sur les caractéristiques du transist HEMT	61
III.II.4.1. L'effet de la fraction molaire sur les propriétésélectriques du transistor HEMT	62
III.II.5 L'influence de la technologiestructurale sur les performnces du transistor	63
III.II.5.1 L'effet de la longueur de la grille sur les performanc du transistor	63
III.II.5.2L'effet de profondeur de la grille	65
III.II.5.3L'effet de la largeur de rigion $AlGaAs$ dope	66
III.II.6Conclusion	67
Conclusion générale	68
Bibliographie	
Résumé	

Liste des figures

Chapitre 01 :

Figure I.1 : Structure Cristalline du GaAs.....	05
Figure I.2: Diagramme schématisant deux types différents d'hétérojonction.....	10
Figure I.3: Diagramme d'énergie d'une hétérojonction anisotype GaAlAs(N)/GaAs(p) avant contact.....	11
Figure I.4: Diagramme d'énergie d'une hétérojonction anisotype AlGaAs(N)/GaAs(p).....	12

Chapitre 2 :

Figure II.1 : tension (V_{GS}, V_{ds}).....	18
Figure II.2 : un amplificateur alternatif conventionnel.....	18
Figure II.3 : transistor unipolaire	20
Figure II.4 : transistors canal P et N	20
Figure II.5 : le réseau expérimentale des FET	21
Figure II.6 : le réseau d'entrée JFET	22
Figure II.7 : le réseau de sortie JFET	22
Figure II.8 : la structure de MOS	23
Figure II.9 : le réseau de la jonction substrat-canal	24
Figure II.10 : MOS canal N	25
Figure II.11 : MOS canal induit	25
Figure II.12 : transistor MOS	26
Figure II.13 : Vue en coupe du MESFET GaAs	28
Figure II.14 : Jonction Schottky, $V_e = 0$ à l'équilibre	29
Figure II.15 : $V_e < 0$, équilibre à $(-V_e) + \emptyset$, (b): $V_e > 0$, diffusion des électrons	30
Figure II.16: Structure de principe d'un HEMT classique associée à son diagramme de bande d'énergie.	32
Figure II.17: Formation du gaz bidimensionnel à l'interface de deux matériaux à grande et à petite largeurs de bande interdite	34
Figure II.18: Variation du potentiel de Fermi en fonction de la densité surfacique de charge selon Drummond et al . L'approximation linéaire est donnée par les pointillés	37
Figure II.19: Effet HEMT GaAs parasite	41

Chapitre 3 :

Partie I

Figure III.1 : l'environnement de fabrication virtuel des plaquettes du logiciel « Silvaco »	43
Figure III.2 : Entrées et sorties du logiciel « Atlas »	44
Figure III.3 : Groupes de commandes	46
Figure III.4 : Maillage à deux dimensions (x,y)	47
Figure III.5 : Définition des régions	49
Figure III.6 : Les régions et les matériaux	49
Figure III-7 : Définition des électrodes	50
Figure III.8 : Types de dopage	51
Figure III.9 : Affichage graphique des résultats par « TonyPlot »	54

Partie II

Figure III.II.1: La structure du HEMT $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ simulé par Silvaco-ATLAS l'énergie de la bande de conduction le long de la structure et (b) les différents régions et le dopage net dans le HEMT	57
Figure III.II.2: La structure du HEMT $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ simulé par Silvaco-ATLAS (a) le chemin d'électron dans la bande de conduction de la structure et (b) la structure de maillage dans le HEMT	58
Figure III.II.3: Les caractéristiques courant de drain- tension de drain ($I_{ds}-V_{ds}$) pour les tensions de la grille-source allant de 0 Volt à -1.6 volt avec un pas de 0.2 Volt.	60
Figure III.II.4: La variation de la transconductance du transistor à effet de champ HEMT à base de GaAs en fonction de la tension de la grille pour $V_{ds}=0.5\text{Volt}$.	61
Figure III.II.5: La variation de la conductance de sortie du transistor à effet de champ HEMT à base de GaAs en fonction de la tension de la grille pour $V_{ds}=2\text{V}, 4\text{V}, 8\text{V}$ et 10Volt respectivement	62

Figure III.II.5: L'influence de fraction de molaire d'Aluminium sur la caractéristique de la Couche donneuse AlGaAs avec $X_{comp}=[0.1, 0.2, 0.3, 0.35, 0.4]$ 61

Figure III.II.6: L'influence de la densité de dopage delta-dopée (ND) sur la caractéristique de transfert ($I_{ds}-V_{ds}$) de transistor AlGaAs/GaAs HEMT à tensions de la grille $V_{gs}=0\text{V}$ 62

Figure III.II.7: L'effet de la longueur de la grille sur les performances du transistor pour $L_g=0.3 \mu\text{m}$, $0.4 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m}$, et $0.6 \mu\text{m}$

64

Figure III.II.8: La structure du HEMT $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ simulé avec une profondeur grille $P_g=0.01 \mu\text{m}$

65

Figure III.II.9 :L'effet de la profondeur de la grille sur les caractéristique ($I_{ds}-V_{ds}$) du transistor $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ HEMT

67

Figure III.II.10: L'effet de la largeur de région AlGaAs dopée $\text{AlGaAs}= 0.35 \mu\text{m}$, $0.40 \mu\text{m}$ et $0.45 \mu\text{m}$ avec deffernts

66

Introduction générale

Introduction générale

Le développement des nouvelles technologies pour les applications de télécommunications, de radionavigations et radars sont aujourd'hui d'un intérêt stratégique et commercial majeur. Plusieurs défis sont actuellement à relever dans ces domaines, le développement de réseaux hauts débits pour la numérisation des réseaux terrestres, télévision et radio à grande échelle, la mise au point de systèmes de radiocommunications mobiles, le développement des systèmes électroniques à hautes fréquences embarqués dans le secteur automobile ou encore les systèmes radars modernes . Ces marchés offrent aujourd'hui des perspectives commerciales importantes.

L'application de nouvelles filières de composants à effet de champ prend un formidable essor dans ces nouvelles technologies, la demande et la production de circuits intégrés à base de transistors à effet de champ sont très élevées. Ce développement spectaculaire conduit à une recherche robuste soit au niveau des composants plus en plus performants ou vers des nouvelles applications, entraînant une montée en fréquence et autorisant une amplification de puissance plus importante.

Les transistors à effet de champ sont toujours parmi les composants électroniques omniprésents dans notre vie quotidienne, ils jouent un rôle très important dans la nouvelle technologie des systèmes de télécommunication . Ils résident au cœur de la révolution qui a porté une grande part de développement technologique de très haut niveau.

Les premiers transistors à effet de champ ont été réalisés en silicium (Si). Ce semi-conducteur présente de nombreux avantages pour la réalisation de composants électroniques: structure cristalline simple, facile à réaliser, existence d'un oxyde de silicium isolant.

Cependant le silicium permet des fréquences d'utilisation maximales de l'ordre de quelques gigahertz. Afin de disposer de composants pouvant fonctionner à des fréquences plus élevées, le silicium a été remplacé par l'arséniure de gallium (GaAs), qui possède une mobilité électronique six fois plus élevée que le silicium.

L'arséniure de gallium s'impose comme matériau souvent utilisé dans la filière III-V. Il possède sur le silicium l'avantage d'avoir des électrons qui se déplacent plus rapidement sous l'action d'un même champ électrique accélérateur.

Cela mène à des composants électroniques plus rapides si l'on fonctionne à même tension logique, ou à une puissance électrique consommée plus faible à vitesse égale, grâce à la réduction possible de tension.

L'intensification des recherches sur les matériaux semiconducteurs III-V, déclenchée par l'essor des dispositifs optoélectroniques, et le développement simultané des techniques d'épitaxie ont permis de recenser des couples de matériaux susceptibles de constituer des hétérojonctions présentant des interfaces de qualité tout à fait acceptable. Parmi ceux-ci, l'association AlGaAs/GaAs qui cumule de nombreux avantages: largeur de bande interdite relativement importante qui autorise un fonctionnement à haute température, mobilité électronique élevée qui permet d'atteindre de bonnes performances, mailles cristallines assez proches qui minimisent les recombinaisons parasites. Beaucoup de composants ont bénéficié de ces performances notamment le transistor HEMT qui est apparu grâce au bon confinement des charges séparées de leurs donneurs.

Pour mieux exploiter les qualités de ces transistors (fréquences de fonctionnement élevées, niveau de puissance de sortie important,...) et avant toute réalisation, il est nécessaire de prédire les caractéristiques des dispositifs par la simulation avec des logiciels commerciaux qualifiés. Ainsi l'objectif de notre travail est de présenter une étude sur le transistor à effet de champ HEMT à base l'arséniure de gallium (GaAs) utilisant le logiciel ATLAS-SILVACO.

Ce travail comportera les chapitres suivants:

Le premier chapitre est consacré à une large présentation du matériau III.V (GaAs) et son alliage le AlGaAs en terme de ses propriétés structurales et électroniques.

Puis à une description générale sur les propriétés physiques des structures métal-semiconducteur. Une attention particulière est accordée au contact redresseur de type Schottky.

Dans le second chapitre, nous avons présentons l'aspect physique et électrique des différentes technologies existantes des composants FETs utilisés pour l'amplification de puissance tels que les JFET, MOSFET, MESFET, et la technologie HEMTs

Dans le troisième chapitre et dans une première partie, nous présentons le principe de fonctionnement du logiciel de simulation numérique bidimensionnelle ATLAS-SILVACO, pour l'étude des composants HEMT.

La deuxième partie, est consacrée à l'étude de la structure AlGaAs/GaAs HEMT et à la présentation des résultats obtenus à partir de la simulation numérique, en tenant compte les effets de la tension de grille et des paramètres technologiques et physiques sur les caractéristiques électriques du transistor HEMT à base d'hétérostructures AlGaAs/GaAs, est accomplie.

En fin de ce mémoire, nous donnerons une conclusion générale avec les perspectives.

Chapitre I : Propriétés physiques et structurales d'arséniure de Gallium (GaAs

I.Introduction :

Les semi-conducteurs III-V sont des matériaux composés d'un ou plusieurs éléments de la colonne III (bore, gallium, aluminium, indium, etc.) et de la colonne V (arsenic, antimoine, phosphore, etc.) du tableau périodique de Mendeleïev, tels que l'arséniure de gallium, arséniure d'indium, nitrure de gallium, antimoniure de gallium, phosphure de bore ou des alliages ternaires tels que $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (pour une liste plus complète, voir liste de matériaux semi-conducteurs). Ils présentent généralement une haute mobilité électronique et une bande interdite directe, et sont utilisés dans des applications optoélectroniques (diodes lasers, cellules solaires, etc.) ainsi qu'électroniques (transistors...). Après le Silicium, ce sont les deuxièmes matériaux semi-conducteurs les plus utilisés dans les transistors MESFETs en GaAs sont des composantes très important dans la réalisation descircuitsintégrés grâce à ces caractéristiques. Dans ce chapitre on va présenter un étatde l'art sur le matériau Arséniure de Gallium (GaAs) ces caractéristiques morphologique, électriques et physiques, les méthodes de préparation des déférents couches (substrat et canal), en suite une description détaillée sur les MESFETs fabriqués à base de GaAs.

I.1.L'Arséniure de Gallium (GaAs)

I.1.1.Structure cristalline d'Arséniure de Gallium (GaAs)

L'arséniure de gallium (GaAs) est un composé de la famille III-V. Il cristallise dans la structure du Zinc Blende (Figure I.1). son réseau cristallin peut se décomposer en deux sous-réseaux cubiques à faces centrées interpénétrés, l'un étant constitué des atomes de l'élément du groupe III (Ga), l'autre des atomes de l'élément du groupe V (As) ; Ces deux sous-réseaux sont décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale, c'est-à-dire d'une quantité de $a_0/4$ (1, 1, 1), a_0 étant le paramètre cristallin, où chaque atome se trouve donc au centre d'un tétraèdre régulier dont les sommets sont occupés par un atome de l'autre espèce



Figure I.1 : Structure Cristalline du GaAs

I.2. Propriétés électriques et physiques du GaAs

Les propriétés physiques et électriques de l'arséniure de gallium à la température ambiante (300K°) sont regroupées dans le tableau suivant [2]:

Propriétés du GaAs à 300K°	Valeur
Structure cristalline	Zinc blinde
Poids atomique	144,63 g/mole
Structure de la bande interdit	Directe
Chaleur spécifique	0.327 j/g.K
Largeur de bande interdit	Eg =1,424 eV
Permittivité	11,6pF/cm
Conductivité thermique	0.45 w/cm.k
Mobilité des électrons	8500 cm ² .v ⁻¹ .s ⁻¹
Mobilité des trous	400 cm ² .v ⁻¹ .s ⁻¹
Vitesse maximal des électrons	2 .10 ⁷ cm.s ⁻¹
Champ électrique de saturation	10 k.v/cm

Tableau I.1 caractéristiques du GaAs

I.2.1 . La polarisation

Les propriétés physiques originales des composés semi-conducteurs III-N de structure wurtzite, crû par épitaxie le long de la direction [0001], sont dues à la présence d'un champ de polarisation spontanée et piézoélectrique qui a des conséquences pour les applications électroniques. L'importance de la polarisation totale dans les composés nitrures présente un grand intérêt comparativement à d'autres semi-conducteurs composés III-V tel que le GaAs.

I.2.1.1. La polarisation spontanée

L'atome d'arséniure possède une électronégativité importante par rapport aux autres éléments du groupe V tels que le gallium et l'indium, cette propriété lui permet d'attirer plus fortement vers lui les électrons dans la liaison Ga-As. Le nuage électronique ne sera plus symétrique et le barycentre des charges électriques ne sera plus situé au centre des deux atomes (Ga, As). On dit d'une telle liaison qu'elle est polarisée car elle agit comme si elle possédait un pôle positif et un pôle négatif. Ce même effet existe pour le GaN et InP de structure zinc blende mais relativement faible parce que leurs liaisons ioniques sont faibles.

I.2.1.2. La polarisation piézoélectrique

Lorsqu'une maille cristalline du GaAs est soumise à une excitation extérieure ou bien à une contrainte, les positions des atomes changent les uns par rapport aux autres. La variation des distances interatomiques entraîne une modification des moments dipolaires entre les atomes qui est à l'origine d'une polarisation suivant l'axe "c" appelée piézoélectrique car sa valeur varie en fonction de la contrainte exercée.

La polarisation piézoélectrique peut être exprimée en fonction des coefficients piézoélectriques (e_{ij}) et les constantes élastiques (c_{ij}) suivant la relation suivante [3] :

$$P_{PZ} = 2 \frac{a - a_0}{a_0} \times \left(e_{31} - e_{33} \times \frac{c_{13}}{c_{33}} \right) \quad (I.1)$$

a : Constante de maille d'un matériau contraint.

a_0 : Constante de maille d'un matériau relaxé.

C_{13}, C_{33} : Constantes élastiques.

e_{33}, e_{31} : Coefficients piézoélectriques.

I.3. Propriétés thermiques

Dans les semi-conducteurs; les principales grandeurs physiques qui déterminent les propriétés thermiques sont la conductivité thermique, la dilatation thermique, la chaleur spécifique et la température de Debye.

I.3.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique d'un matériau traduit sa capacité à dissiper la chaleur. Or, la résistance thermique (notée R_{th}) est inversement proportionnelle à la conductivité thermique R_{th} ($W.K^{-1}$),

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{diss}} \quad (I.2)$$

Où ΔT est l'élévation la température en K, P_{diss} est la puissance dissipée en W.

On voit donc que la résistance thermique est directement liée à la puissance dissipée. Cela signifie qu'une forte conductivité thermique du matériau permet l'évacuation de la puissance dissipée (sous forme de chaleur) sans échauffement important de celui-ci. Dans le cas de l'amplification de puissance où les puissances délivrées sont importantes, l'élévation de température pour une puissance dissipée donnée sera bien plus faible dans des transistors à grand gap.

I.3.2 Chaleur spécifique

Dans un composant semi-conducteur, l'augmentation de la température entraîne une augmentation du nombre de phonons. La chaleur spécifique est le paramètre physique qui permet de relier les variations de la température du réseau au nombre de phonons présents dans le semi-conducteur, sa valeurs peut être calculée à partir de la relation de debye [4]:

$$C_p(T) = \frac{12\pi^4 R}{5} \left(\frac{T}{T_D} \right)^3 \quad (I.3)$$

Avec $R = 8.3144$ J/mol.K , T_D : température de Debye.

I.3.3 Dilatation thermique

En plus de la contrainte due au substrat, il apparaît une deuxième contrainte et par conséquent une deuxième déformation thermoélastique au cours du refroidissement après l'hétéroépitaxie. Cette contrainte est due à la différence entre les coefficients d'expansion thermiques linéaires des différentes couches déposées et du substrat. La croissance a lieu à haute température, elle dépend du substrat choisi pour l'hétéroépitaxie.

I.3.4 Température de Debye

La température de Debye T_D définit la valeur maximale des énergies des vibrations. Cette grandeur physique peut être déterminée à partir de la chaleur spécifique ou bien à partir des coefficients élastiques. Les valeurs les plus souvent données dans la littérature sont 700 K ou 650 K suivant les méthodes de calcul [4].

I.4 Avantages et inconvénients du GaAs

Même si le silicium reste le matériau de base le plus largement utilisé dans le secteur des semi-conducteurs, on constate l'émergence rapide de nouveaux marchés demandant des matériaux spécifiques. Le besoin de nouveaux composants pour les hyperfréquences, la logique rapide, l'optoélectronique a poussé le développement des matériaux III-V dont les propriétés de transport électronique et les propriétés optiques ne sont pas accessibles au silicium.

Le GaAs, dont les avantages par rapport au silicium résident en particulier dans la possibilité d'obtenir un matériau semi isolant et aussi dans une mobilité électronique plus élevée (sept fois plus grande que celle du silicium). Ces deux dernières propriétés étant favorables à un fonctionnement à fréquence élevée. Ces caractéristiques ont rendu ce matériau très prometteur pour répondre aux nouvelles exigences dans les domaines des hautes fréquences et de l'optoélectronique.

Dans le domaine des composants optoélectroniques, on utilise surtout les propriétés de sa structure de bande (gap direct) et celles de ses composés ternaires et quaternaires (GaAlAs, GaAsP, GaInAs et GaInAsP). Ainsi, le développement de la technologie de fibres optiques à faible perte et la maîtrise de l'élaboration de GaAs ont abouti à la réalisation d'ensembles de télécommunications optiques utilisant des émetteurs lasers à semi-conducteur GaAs et GaAlAs [5].

Un autre atout très important de ce matériau est la possibilité de l'obtenir sous forme semi-isolant; cet état de résistivité élevée est particulièrement favorable pour le développement d'une véritable technologie planaire de circuits intégrés sur GaAs. Aussi la largeur de sa bande interdite relativement importante qui autorise un fonctionnement à haute température.

L'inconvénient majeur du GaAs est son coût élevé. Par exemple, les circuits intégrés en arséniure de gallium sont beaucoup plus cher : le matériau ne s'obtient qu'en plaquettes de 3 à 4 pouces de diamètre (de 7,5 à 10 cm) au maximum, ce qui limite le nombre de circuits intégrés fabriqués ; sa physicochimie se prête moins bien que le silicium aux associations de matériaux (semi-conducteurs, isolants, métaux) requis par les circuits intégrés, ce qui rend les méthodes de fabrication plus délicates et les rendements de fabrication plus faibles. Ces handicaps limitent l'arséniure de gallium aux utilisations où il est indispensable, à savoir lorsque l'on veut des circuits fonctionnant à des fréquences supérieures à 1 gigahertz.

I.6 Hétérojonction

I.6.1. Définition

Une hétérostructure est une jonction formée par la juxtaposition de deux matériaux de natures différentes. Les hétérostructures semi-conductrices sont généralement des hétéroépitaxies car les deux semi-conducteurs mis en présence ont la même structure cristallographique (cubique faces centrées la plupart du temps) et un relatif accord de maille. Quand les deux Semi-conducteurs ont une conductivité du même type, l'hétérostructure est dite *isotype*. Dans le cas contraire elle est *anisotype*.

I.6.2. Les différents types d'hétérojonctions

Par définition, une hétérojonction est obtenue lorsque deux matériaux semi-conducteurs différents sont associés. Sa réalisation s'effectue par croissance cristalline d'un matériau sur l'autre et nécessite l'utilisation de semi-conducteurs ayant des propriétés cristallines voisines (la taille des atomes doit être notamment assez proche). Selon les matériaux utilisés pour les semi-conducteurs, on peut distinguer trois types d'hétérojonctions. Le schéma de la figure I.2 donne une description schématique des décalages de bandes de conduction et de valence pour trois types d'hétérojonction.

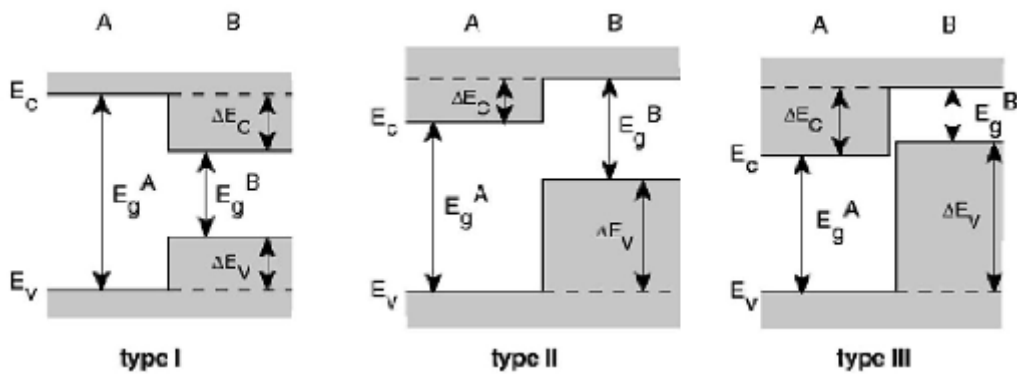


Figure I.2: Diagrammes schématiques montrant 3 types différents d'hétérojonction.

type I : la bande interdite E_g^B est entièrement dans E_g^A .

type II : Une des discontinuités est plus grande que $E_g^A - E_g^B$ mais inférieure à E_g^A .

type III : une des discontinuités est supérieure à E_g^A .

I.6.3. Hétérojonction à l'équilibre thermique

- Diagramme de bandes d'énergie

Soient SC_1 et SC_2 , deux semi-conducteurs, le premier de type (p), et le second de

type (n), caractérisés par les affinités électroniques χ_p et χ_n , les gaps (E_{gp}) et (E_{gn}), et les travaux d'extraction ϕ_p et ϕ_n . En l'absence de tout contact, les diagrammes énergétiques dans chacun des semi-conducteurs, sont représentés sur la Figure I-

3. Les deux semi-

conducteurs étant indépendants, la distribution des électrons dans chacun d'eux est indépendante de l'autre, de sorte que les distributions sont caractérisées par deux niveaux de Fermi différents

E_{Fp} et E_{Fn} .

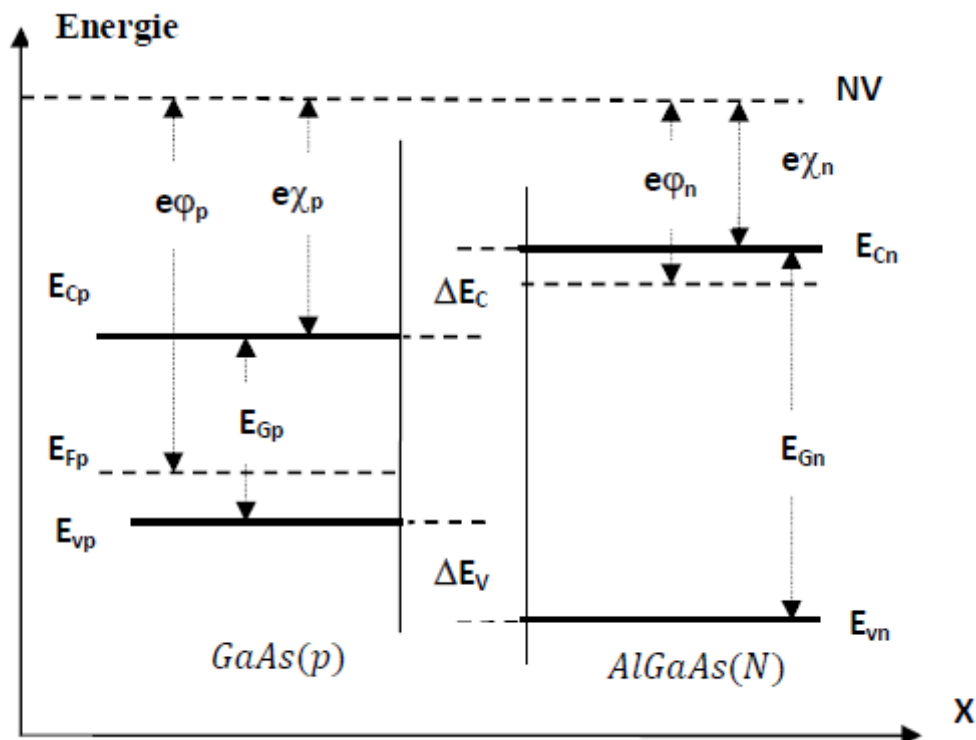


Figure I.3: Diagramme d'énergie d'une hétérojonction de type GaAlAs(N)/GaAs(p) avant contact

Lorsque les deux semi-conducteurs, sont mis en contact, il y a transfert des électrons du semi-conducteur à plus fort niveau de Fermi, vers le semi-conducteur à plus faible niveau de Fermi, de manière à réaliser l'alignement des niveaux de Fermi, cet échange se fait au voisinage de la jonction et fait apparaître une charge d'espace à laquelle est associée

une barrière de potentiel (la tension de diffusion V_d) qui arrête la diffusion des porteurs de charges et définit l'état d'équilibre, la figure (3) est donnée :

$$V_d = \phi_p - \phi_n \quad (I.4)$$

La différence d'énergie de bande de conduction E_c et de bande de valence E_v est donnée

par:

$$E_c = \chi \quad (I.5)$$

$$E_v = E_G - Lx \quad (I.6)$$

χ et E_G représentent respectivement les différences d'affinité électronique, et de bande interdite entre les deux semi-conducteurs.

Le schéma de bandes d'énergie d'hétérojonction AlGaAs/GaAs après le contact est représenté sur la figure (I.4).

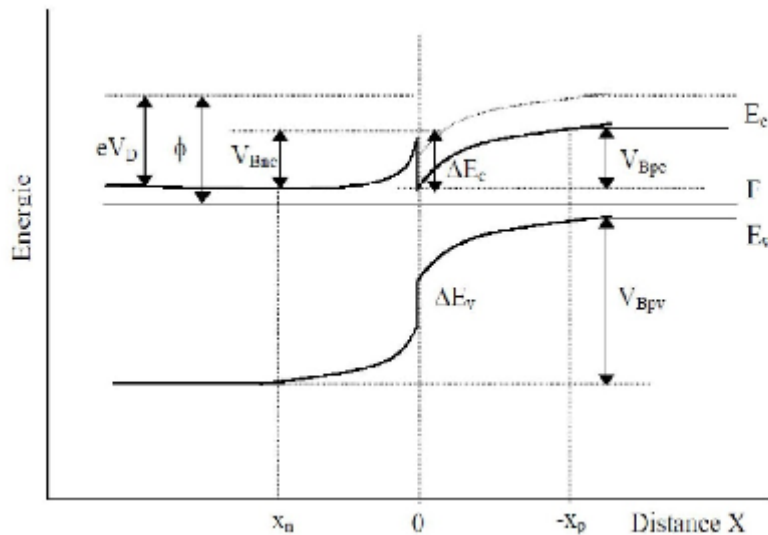


Figure I.4: Diagramme d'énergie d'une hétérojonction anisotype AlGaAs(N)/GaAs(p)

- Etude de la zone de transition

Le calcul de la distribution du potentiel au voisinage de l'interface se fait comme le cas de l'homojonction, par intégration de l'équation de Poisson. L'approximation de déplétion peut être appliquée à une hétérojonction NP et donne souvent une estimation adéquate du potentiel électrostatique.

Dans le cas où la charge d'espace résulte d'un régime d'accumulation, ce calcul devient compliqué, pour plusieurs raisons :

- 1- Le potentiel est fonction de la distribution des charges, et la distribution des charges est fonction du potentiel.
- 2- Compte tenu de la grande densité des porteurs dans la couche d'accumulation, il faut tenir compte des corrélations électron-électron.
- 3- Ces charges sont localisées très près de l'interface, il faut tenir compte de la potentielle image associée à ces charges.

Le calcul se fait, en supposant que la zone de déplétion est désert de porteurs. Considérons l'hétérojonction représentée sur la figure (I-3), nous supposons que les semi-conducteurs sont dopés de manière homogène.

I.7. Les substrats adéquats pour le GaAs hexagonal

La croissance des couches hexagonales de bonne qualité est conditionnée par le choix du substrat. En effet, le principal problème rencontré pour l'épitaxie du Nitrure de Gallium est qu'il n'existe pas de substrat accordé en maille pour ces matériaux. Les candidats susceptibles d'être utilisés pour l'hétérostructure AlGaAs/GaAs sont le saphir (Al_2O_3), le silicium (Si) et le carbure de silicium (SiC de type 4H). Les caractéristiques de ces substrats sont répertoriées dans le tableau I-2 [6].

Substrats	Structure cristalline	Paramètre de maille (Å)	Conductivité thermique ($W.cm^{-1}.k^{-1}$)	Coefficients de dilatation thermique α	
				$\frac{\Delta a}{a}(\times 10^{-1}k^{-1})$	$\frac{\Delta c}{c}(\times 10^{-1}k^{-1})$
Al_2O_3	Hexagonale	$a= 4.758$ $c=12.99$	0.5	7.5	8.5
4H-SiC	Wurtzite	$a=3.08$ $c=15.12$	3.3	4.2	4.68
Si (111)	Cubique	$a= 5.4301$	1.5	3.59	

Tableau I.2 : caractéristiques cristallographiques des substrats utilisés pour la croissance

Le désaccord de maille entre le substrat et la couche épitaxiée engendre une contrainte dans la couche. Cette contrainte crée une déformation de la maille dans la couche qui emmagasine de l'énergie élastique. À partir d'une épaisseur critique, la couche se relaxe en créant des dislocations néfastes pour la qualité du matériau. Afin de résoudre ce problème, une couche de nucléation ou tampon y est déposée, à l'intérieur de laquelle la contrainte est censée être complètement relaxée pour réaliser l'homoépitaxie des couches sans contrainte. Malgré l'utilisation d'un tel procédé, il y subsiste toujours une contrainte résiduelle. Son origine provient de la différence des coefficients de dilatation thermique entre la couche et le substrat.

I.7.1. Le silicium (Si)

Le substrat silicium est très attractif non seulement parce qu'il présente une bonne morphologie de surface et est disponible à coût bas, mais également parce qu'il permet une intégration des dispositifs à base de GaAs dans la microélectronique Silicium.

Contrairement aux substrats (Al_2O_3) et SiC, le silicium Si possède une maille plus importante que celle du GaAs. Par conséquent, le GaAs se trouve par définition en extension lorsqu'il est épitaxié sur le Si (111) engendrant la formation de dislocations et de craquelures. Une couche de nucléation plus complexe composée de plusieurs sous couches d'AlAs et de GaAs (super réseau) est alors réalisée dont les conditions de croissance sont différentes celles utilisées pour les substrats précédents.

La croissance de la couche de GaAs(buffer) est alors réalisée sur ce super réseau.

I.7.2. Le diamant

Le Diamant offre la meilleure conductivité thermique par rapport aux autres matériaux. La chaleur se disperse horizontalement dans le diamant pour ensuite se dissiper de manière transversale dans un autre substrat. Il y a également un intérêt en raison de sa faible conductivité électrique pour isoler électriquement la couche tampon du substrat [7].

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit le de L'Arséniure de Gallium matériau de base pour la réalisation des transistors à haute mobilité d'électrons HEMTs grâce à ces propriétés électriques, mécaniques et thermiques remarquables. Nous avons rappelé l'intérêt de la structure cristalline de GaAs qui donne lieu à des polarisations spontanée et piézoélectrique. Ces polarisations créent une densité de charge qui permet la formation du gaz électronique bidimensionnel (2DEG) à l'interface de l'hétérostructureAlGaAs/GaAs.

Chapitre II :
Les transistors HEMTs à
base de l'hétérostructure
(AlGaAs/GaAs)

II.1.1. Historique :

Le premier brevet sur le transistor à effet de champ a été déposé en 1925 par Julius E. Lilienfeld. Comme rien ne fut publié sur cette invention, elle resta ignorée de l'industrie.

De même, le physicien Oskar Heil déposa en 1934 un brevet pour une invention similaire 2, mais il n'existe pas de preuve que cet appareil ait été contre. Ce n'est qu'après la 2^{ème} guerre mondiale que le transistor à effet de champ sera redécouvert, d'abord le JFET en 1952 puis le MOSFET en 1960, par Kahng et Atalla.

II.1.2.Introduction :

Un transistor à effet de champ est un composant à trois broches : la Grille, le Drain et la Source. On considère que la commande du transistor se fait par l'application d'une tension V_{GS} négative dans le cas d'un type P, positive dans le cas d'un type N.

Les caractéristiques de sortie sont liées au rapport tension/courant admissible entre le drain et la source, représenté par une résistance équivalente R_D Son lorsque le transistor est passant.

L'un des modèles les plus connus est le modèle 2N3819, toujours vendu de nos jours. Donnons ses caractéristiques :

- puissance maximale dissipée : 0,36 W
- tension drain-source maximale : 15 V
- pente : 2 à 6,5 mS

Comme les transistors MOSFET et MESFET, les transistors à effet de champ sont plus fragiles que les transistors à jonction, notamment parce qu'ils peuvent claquer suite à une décharge d'électricité statique. C'est pourquoi on doit les protéger contre les surtensions d'origine statique ou dynamique afin d'éviter leur destruction.

- En court-circuitant les connexions externes pendant leur stockage, leur manipulation ou leur soudure.
- En les piquant dans des mousses conductrices .

II.2.Fonctionnement :

Un transistor à effet de champ est un transistor unipolaire: son fonctionnement est basé sur l'action d'un champ électrique sur un canal composé d'un seul type de porteurs de charges mobiles. Ce canal est un semi-conducteur avec un excédent d'électrons (dopage de type N), ou de trous (dopage de type P). La présence d'un champ électrique peut autoriser la conduction électrique dans ce canal (transistor à enrichissement, ou enhancement) ou la réduire (transistor à appauvrissement, ou depletion).

Par rapport à un transistor bipolaire (NPN ou PNP), il présente l'intérêt d'avoir une grande impédance d'entrée (supérieure au mégaohm), ce qui le rend intéressant dans certains montages (étage d'entrée d'un radiorécepteur, détecteur d'électricité statique...)[08].

Plus précisément, cette résistance d'entrée est la résistance de fuite de la jonction grille-source (GS) polarisée en inverse. La capacité d'entrée du transistor est faible (quelques picofarads). Cette résistance d'entrée élevée et cette faible capacité d'entrée donnent aux transistors à effet de champ des caractéristiques proches de celles des tubes à vide.

En réception radio, l'intérêt des transistors à effet de champ est :

- Une meilleure sélectivité des circuits associés.
- Un meilleur facteur de bruit (car la bande passante du circuit est réduite, du fait d'un amortissement moindre). C'est pourquoi on les trouve souvent dans les schémas de préamplificateurs d'entrée, d'oscillateurs, de mélangeurs.

II.3.Polarisation des transistors à effet de champ :

A cause de cette dispersion des paramètres, il est impossible de régler le point de fonctionnement en imposant le potentiel de grille car I_D peut varier de manière trop importante pour un V_{GS} donné.

II.4.Classification :

II.4.1. Les transistors JFET (Junction Field Effect Transistor):

Un transistor de type JFET (Junction Field Effect Transistor ou transistor à effet de champ à jonction) présente une grille reliée au substrat. Dans le cas d'un canal dopé N, le substrat et la grille sont fortement dopés P+ et physiquement reliés au canal. Le drain et la source sont des îlots très fortement dopés N+ dans le canal, de part et d'autre de la grille. Dans

le cas d'un canal dopé P, les dopages de chaque partie sont inversés, ainsi que les tensions de fonctionnement.

II.4.2. Le transistor MOSFET

Un transistor de type MOSFET (Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor) présente une grille métallique électriquement isolée du substrat par un diélectrique de type SiO₂.

II.4.3. Le transistor MESFET

Un transistor de type MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor) présente une grille métallique.

II.4.4. Le transistor MODFET ou HEMT

Un MODFET (modulated-doping field effect transistor) ou HEMT (High Electron Mobility Transistor) est un transistor à haute mobilité d'électrons connu sous le nom aussi de transistor à effet de champ à hétérostructure. Il est composé de deux semi-conducteurs de bande interdite différente (ex GaAlAs et GaAs) qui à leur frontière forment un puits quantique dans lequel les électrons sont confinés formant ainsi un gaz bidimensionnel d'électrons [9].

II.5.Applications spécifiques des FET

II.5.1.Interrupteur analogique

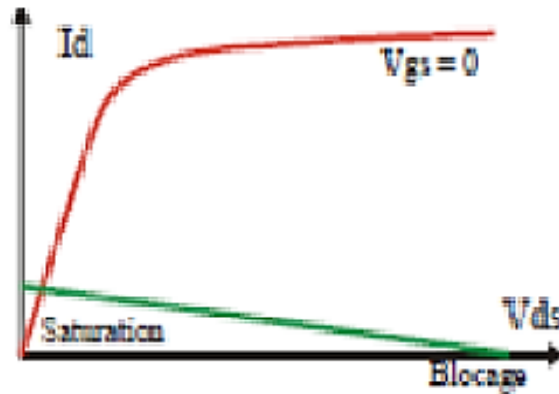


Figure II.1 : tension (V_{GS}, V_{ds})

On considère un FET dont la source est à la masse. Pour une tension V_{GS} nulle, le transistor étant saturé présente une résistance R_{DS} faible ($\approx 100 \Omega$). Si par contre V_{GS} est très négatif il est bloqué et la résistance R_{DS} est très grande. Cette propriété est très utilisée dans les interrupteurs analogiques qui permettent la commutation de signaux alternatifs.

On utilise soit la connexion « shunt » soit la connexion « série ». Dans les deux cas l'interrupteur n'est pas parfait et présente une résistance R_{DS} .

Le modèle série peut être utilisé comme « hacheur » de signal : les signaux lentement variables avec le temps sont difficiles à amplifier. On applique sur la grille une tension de commande rectangulaire variant entre 0 et la tension de blocage du FET. On transforme ainsi le signal d'entrée continu en un signal alternatif rectangulaire dont la fréquence est celle du générateur de commande. Il est alors possible d'utiliser un amplificateur alternatif conventionnel pour amplifier le signal. On effectue ensuite un redressement pour obtenir l'image amplifiée du signal original.

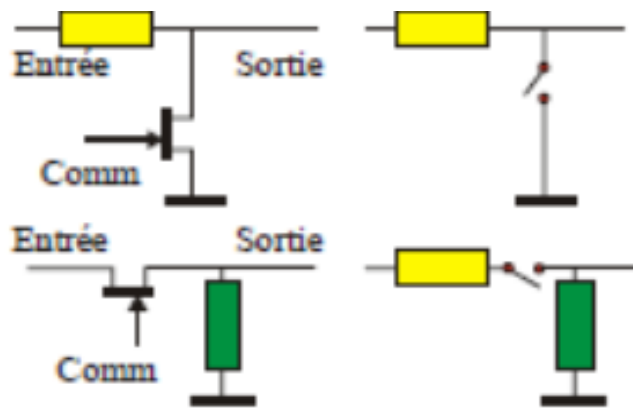


Figure II.2 : un amplificateur alternatif conventionnel

II.6. Les avantages et les inconvénients des FET

Il existe beaucoup d'analogies entre les montages amplificateurs réalisés soit avec des FET soit avec des transistors à jonction. Les montages source commune se comportent comme les montages à émetteur commun et les montages drain commun comme les montages à collecteur commun.

* Les avantages des FET sont :

- une grande résistance d'entrée
- le faible niveau de bruit lié au fait qu'il n'y a qu'un seul type de porteurs et donc pas de recombinaisons.

* Les inconvénients des FET sont :

- une faible pente
- le manque de linéarité
- la grande dispersion des caractéristiques
- la polarité opposée des tensions V_{DS} et V_{GS} qui interdit les liaisons directes entre étages.

Dans les montages amplificateurs, les FET seront principalement utilisés dans l'étage d'entrée. On profite de leur grande impédance d'entrée qui permet de ne pas perturber la source. Dans ce premier étage l'amplitude des signaux est petite et de ce fait l'influence de la non linéarité du transistor est minime si la polarisation est correcte. Pour les étages suivants, on utilisera des transistors bipolaires qui autorisent une plus grande dynamique au niveau de l'amplitude des signaux.

II.7. Etude des transistors a effet de champ

II.7.1 Transistor à jonction (JFET)

II.7.1.1. Structure :

Contrairement aux transistors bipolaires dont le fonctionnement repose sur deux types de porteurs les trous et les électrons, les transistors unipolaires fonctionnent avec un seul type de charges, les trous ou les électrons. Le transistor à effet de champ à jonction est un premier exemple de transistor unipolaire.

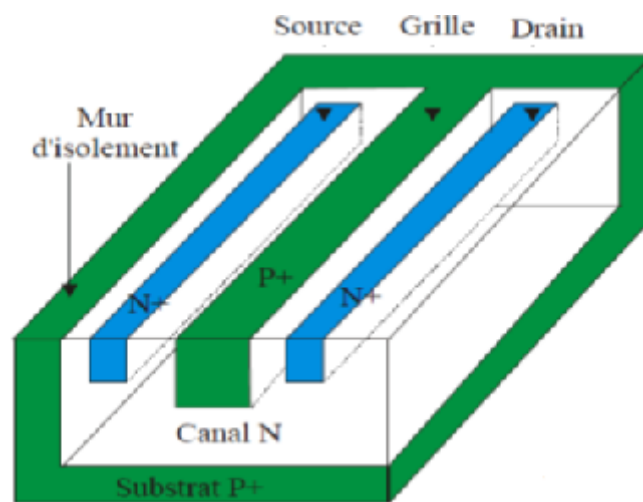


Figure II.3 : transistor unipolaire

Sur un substrat (P+) très fortement dopé, on diffuse une zone dopée N : le canal. Au centre du dispositif, on diffuse une grille nommée aussi porte ou gate, dopée P+ reliée au substrat et de part et d'autre de cette grille, deux îlots très fortement dopés N+ : la source (zone d'entrée des électrons dans le dispositif) et le drain (zone de sortie des charges). Il existe aussi des JFET (acronyme pour Junction Field Effect Transistor) ayant un canal P qui sont complémentaires des transistors canal N. Pour ces transistors canal P, toutes les tensions et les courants sont à inverser.

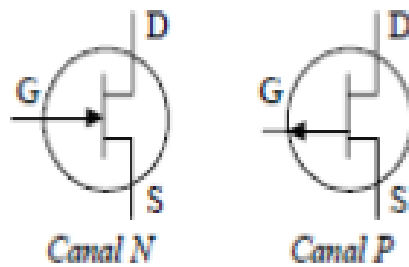


Figure II.4 : Transistors canal P et N

Le symbole utilisé pour les représenter est donné ci-dessous. Le trait qui correspond au canal est continu. La grille et le canal forment une jonction PN ; la flèche correspondante est orientée dans le sens passant de cette jonction. Sur les schémas, elle est parfois décalée du côté de la source.

II.7.1.2. Fonctionnement

II.7.1.2.1. Etude expérimentale

On procède au relevé des caractéristiques en utilisant le montage ci-après. En fonctionnement normal la jonction grille–canal est polarisée en inverse : le courant d'entrée I_G est très faible et les courants drain et source sont identiques.

Dans le réseau des caractéristiques de sortie $I_D = f(V_{DS})$, on observe quatre zones différentes. Une zone linéaire dite résistive, un coude, une zone de saturation ($I_D \approx \text{constant}$) et une zone d'avalanche.

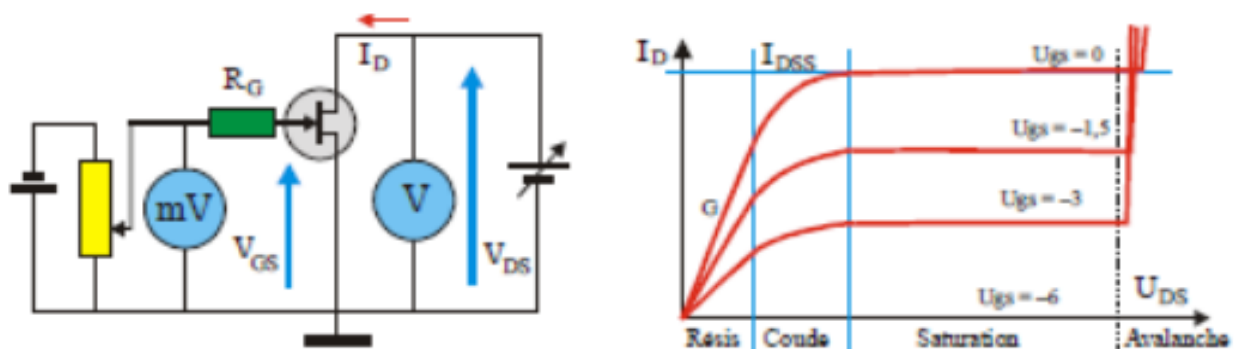


Figure II.5 : Réseaux expérimentale des FET

II.7.1.2.2. Réseaux de caractéristiques

- Réseau d'entrée:

Les transistors JFET doivent uniquement être utilisés avec des tensions V_{GS} négatives et inférieures à la tension de claquage inverse.

La caractéristique d'entrée est celle d'une diode polarisée en inverse. On a donc toujours [10]:

$$I_G = 0$$

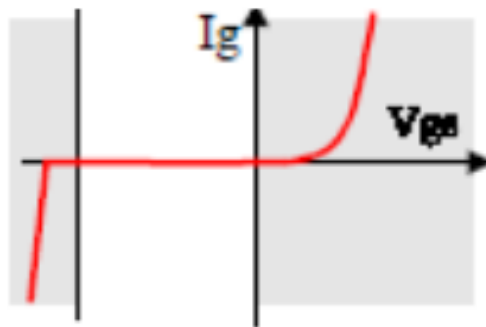


Figure II.6 : Réseaux D'entrée JEFT

- Réseau de sortie:

C'est le réseau des courbes $I_D = f(V_{DS})$ avec $V_{GS} = \text{Constante}$. Ce réseau est caractérisé par trois régions utiles :

- la région ohmique,
- la zone de coude,
- la zone de saturation.

Dans cette zone, on note une légère croissance de I_D avec V_{DS} car la longueur effective du canal diminue [10].

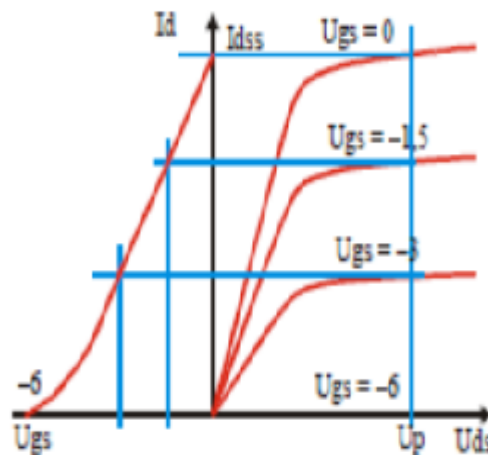


Figure II.7 : Réseaux de sortie JFET

II.7.2. TRANSISTORS METAL OXYDE (MOSFET) :

II.7.2.1. Structure :

MOSFET est un acronyme pour « Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor ». Les MOSFET ou transistors MOS sont des transistors à effet de champ dont la grille métallique est totalement isolée du canal par une mince couche isolante d'oxyde de silicium (SiO_2) d'épaisseur voisine de $0,1 \mu\text{m}$.

La grille, la couche de silice et le canal constituent un condensateur dont la polarisation peut modifier la conductivité du canal. Le changement peut résulter soit d'une modification de la concentration en porteurs majoritaires et l'on a des **MOS à canal diffusé** ou à **déplétion**, soit d'une modification de la concentration en porteurs minoritaires et l'on a alors des **MOS à canal induit** ou à **enrichissement**.

Pour ce type de transistors le courant d'entrée est nul puisque que la grille est isolée. La résistance d'entrée est toujours supérieure à $10^{10} \Omega$.

II.7.2.2. MOS à canal diffusé
- Structure et fonctionnement

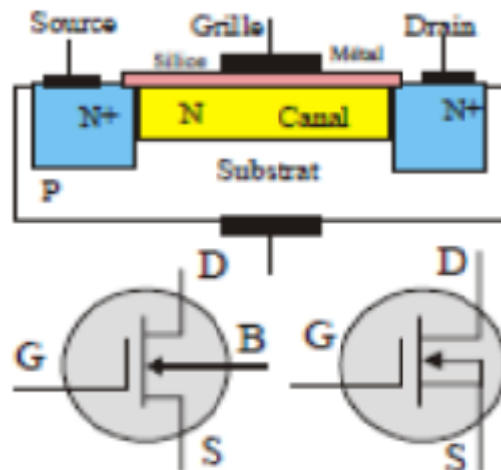


Figure II.8 : Structure de MOS

Sur un substrat (B) dopé P sont diffusées deux zones très dopées N⁺ formant le drain et la source reliées par un canal dopé N. Il existe également des MOS avec un canal P et qui fonctionnent avec des tensions et des courants opposés à ceux ayant un canal N.

Sur le symbole utilisé pour la représentation des MOS à canal diffusé, le canal est représenté par un trait continu. Une flèche figure la jonction substrat-canal, elle est orientée dans le sens passant de la diode. Les quatre électrodes peuvent être accessibles mais le substrat et la source peuvent être reliés en interne.

Pour un potentiel V_{GS} nul et sous l'action de la tension drain-source, un courant drain I_D circule dans le canal. Sa section diminue quand on se rapproche du drain. Si V_{GS} est négatif, on induit par effet capacitif des charges positives dans le canal et donc des recombinaisons : la population en électrons diminue et la conduction du canal diminue. Le potentiel du canal est d'autant plus positif que l'on se rapproche du drain. Au contraire, si V_{GS} est positif la zone appauvrie en porteurs régresse dans le canal et le courant drain augmente. Selon la valeur de la tension grille-source, le canal est plus ou moins conducteur.

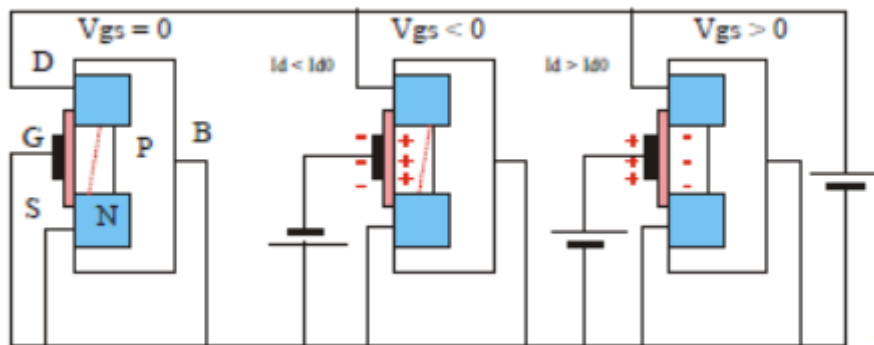


Figure II.9 : Réseaux de la jonction substrat-canal

II.7.2.3 Caractéristiques

Pour les tensions V_{GS} positives, il y a un accroissement du nombre de porteurs libres dans le canal (enrichissement) et pour les tensions V_{GS} négatives, on a un appauvrissement. L'expression du courant drain est comme pour un JFET donnée par :

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \quad (II.1)$$

Mais cette fois V_{GS} peut être positif ou négatif. La polarisation de ce type de transistor est particulièrement simple car on peut le polariser avec la grille à la masse ($V_{GS} = 0$). On peut également utiliser les mêmes méthodes de polarisation que pour les JFET. Les applications de ce type de transistor sont les mêmes que celles des transistors à effet de champ à jonction.

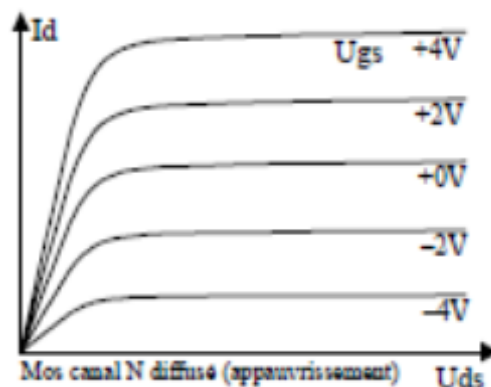


Figure II.10: MOS canal N

II.7.2.4. MOS à canal induit

– Structure et fonctionnement

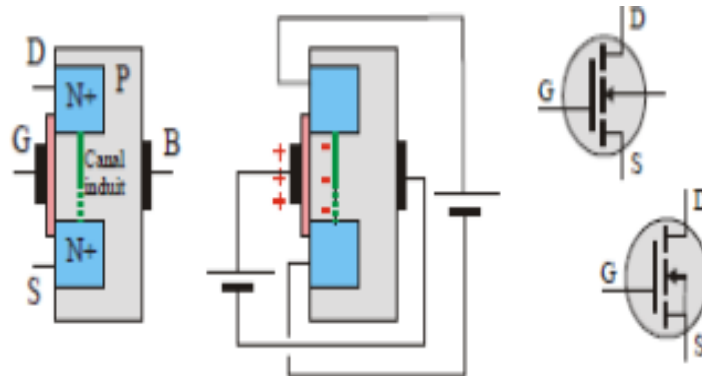


Figure II.11 : MOS canal induit

Pour ce type de transistor il n'y a pas de canal créé lors de la fabrication. Pour les tensions de grille V_{GB} négatives, la jonction drain-substrat est bloquée et le courant drain I_D est nul. Les seuls porteurs libres dans la zone P sont des électrons d'origine thermique. Si V_{GB} est assez positif, les charges négatives du matériau P se regroupent au voisinage de la grille et forment une couche conductrice entre le drain et la source. Cette couche se comporte comme une zone N qui est induite dans la zone P par inversion de la population des porteurs. La tension de seuil minimale pour induire un canal est notée V_{th} (th est mis pour threshold= seuil). Si V_{GB} croît au-delà du seuil, la section du canal augmente et I_D croît. Par construction le substrat est souvent relié à la source et V_{GB} est alors égal à V_{GS} . Sur le symbole des MOS à canal induit, le canal est représenté par un trait discontinu. Une flèche indique le sens pour lequel la jonction substrat-canal est passante. Il existe également des transistors complémentaires dans lesquels le canal induit est de type P [10].

II.7.2.5. Utilisations des transistors MOS

– Généralités

La couche de silice qui isole la grille de commande est tellement mince qu'elle sera détruite par une tension grille-source excessive. Le simple fait d'apporter des charges statiques sur la grille peut provoquer la destruction du dispositif. En effet la capacité du condensateur grille-silice-canal est si petite que même des quantités minimales d'électricité peuvent créer des champs électriques supérieurs au seuil de claquage de l'isolant. Ce claquage est irréversible et destructeur.

La manipulation des transistors MOS suppose quelques précautions telles que la mise à la masse des opérateurs, l'usage de conditionnements conducteurs, l'emploi de plans de travail conducteurs, l'utilisation d'anneaux conducteurs reliant les électrodes qui sont retirés après soudure du composant sur le circuit. Ces transistors sont souvent protégés par une diode Zener incorporée lors de la fabrication entre la source et la grille. L'inconvénient de cette protection très efficace est qu'elle diminue beaucoup la résistance d'entrée.

– Utilisations des transistors MOS

Ce sont les mêmes que celles des JFET : ils sont utilisés en amplification et en commutation. Avec des MOS dont les quatre électrodes sont accessibles on peut réaliser des commutateurs « série » performants

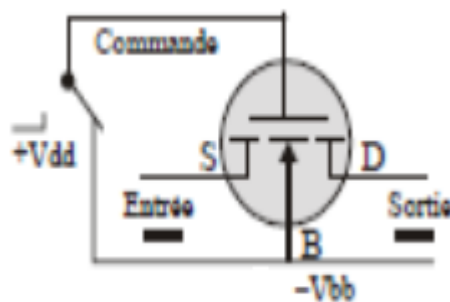


Figure II.12 : Transistor MOS

Si $U_{GB} = V_{BB0}$ le MOS est bloqué. La résistance R_{DS} est supérieure à $10^{10}\Omega$ ce qui correspond à un circuit ouvert.

Si $U_{GB} = V_{DD} > 0$ est grand, le MOS est conducteur et R_{DS} vaut quelques ohms.

Le transistor constitue un relais statique dont la puissance de commande est négligeable.

Ces commutateurs sont beaucoup utilisés dans les hacheurs de signaux et dans les multiplexeurs (circuits qui permettent de relier successivement plusieurs signaux à l'entrée d'un même dispositif). Les transistors MOS sont aussi très utilisés en commutation logique pour la réalisation de portes. Ils sont simples à fabriquer. La dissipation thermique et la consommation sont très faibles ce qui autorise une très forte intégration et la réalisation de systèmes alimentés avec des piles miniatures.

II.7.6. Avantages et Inconvénients des transistors MOS

*** Avantages des transistors MOS**

Leur principal avantage est la résistance d'entrée qui est très grande $R_e \approx 10^{12} \Omega$ Pour un transistor à effet de champ à jonction, la résistance d'entrée est de l'ordre de $10^8 \Omega$.

Le bruit intrinsèque est toujours très faible.

Ce type de transistor est simple à fabriquer et par suite peu onéreux.

La densité d'intégration autorisée par ce type de composant est très importante : on dépasse aujourd'hui le nombre de 10^7 transistors sur une seule puce.

*** Inconvénients des transistors MOS**

La vitesse de commutation est plus faible que celle des transistors bipolaires.

La pente est faible.

La dispersion des paramètres est élevée.

Il est nécessaire de prévoir une protection des entrées [10].

II.7.3. Le MESFET: (MEtal Semiconductor Field Effect Transistor) :

Ce type de transistor apparu en 1966 et fut le premier à être fabriqué à partir d'un composé III-V. Un MESFET est constitué par un barreau de semi-conducteur de type N sur lequel sont réalisés à ses deux extrémités les contacts ohmiques de source et de drain. Entre la source et le drain, un contact Schottky matérialise l'électrode de grille. Le transistor est réalisé sur un substrat semi-isolant de GaAs sur lequel on fait croître par épitaxie ou par implantation ionique la couche active avec des impuretés de type donneur ($N_D \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$). L'adjonction d'une couche fortement dopée ($N_D \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) permet l'accrochage des contacts ohmiques de source et de drain, ainsi que la diminution des résistances parasites de source et de drain.

Dans la technologie MESFETs auto-alignés, la couche active est directement implantée dans le substrat semi-isolant, la grille en métal réfractaire est déposée. Puis les zones N^+ sont implantées en se servant du métal comme d'un masque pour obtenir deux zones d'accès autoalignées sur la grille. Il est à noter que tous les MESFETs ne sont pas toujours auto-alignés [11].

La figure II.13 présente une coupe schématique d'un MESFET dans sa version la plus élaborée (implantée, auto-alignée). La structure présentée met en évidence les différentes couches utilisées pour sa réalisation. La couche active est généralement une couche du type N qui repose sur un substrat semi-isolant. Les contacts de source et de drain sont des contacts

ohmiques contrairement au contact Schottky de grille.

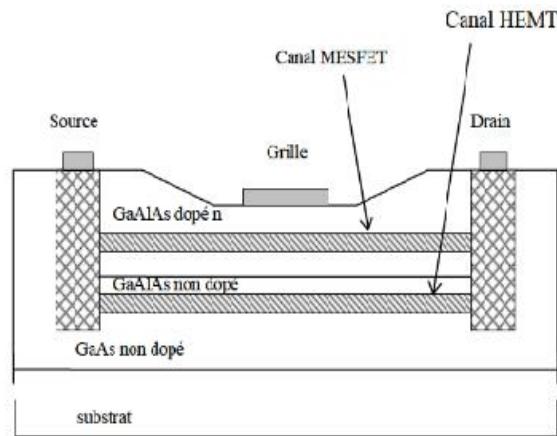


Figure II.13 : Vue en coupe du MESFET GaAs.

Le principe de base du MESFET repose sur les caractéristiques d'une jonction Schottky. Lorsqu'un métal (grille) est mis en contact avec un semi-conducteur (SC) de type N, les électrons du semi-conducteur au voisinage du métal diffusent dans ce dernier laissant ainsi une zone dépeuplée sous la grille sur une profondeur d . Perdant des électrons, le semi-conducteur devient de plus en plus positif par rapport au métal, ce qui donne naissance à un champ électrique E_i comme l'indique la figure II.14.

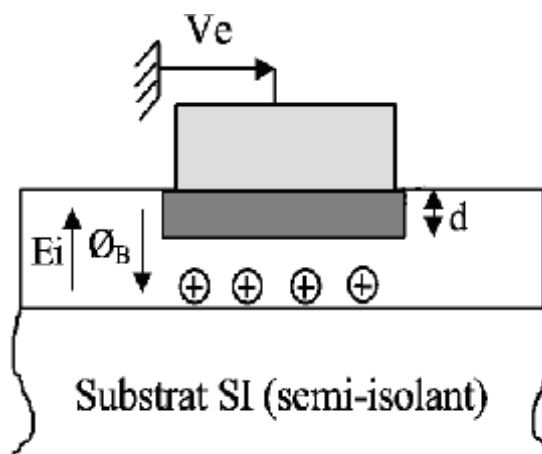


Figure II.14 : Jonction Schottky, $V_e = 0$ à l'équilibre.

Un équilibre s'établit lorsque le potentiel atteint une valeur ϕ_B appelée hauteur de barrière, par conséquent les électrons ne peuvent plus diffuser dans le métal.

Lorsque l'on applique une tension extérieure V_e négative entre le métal et le semi-conducteur, le champ électrique total augmente entraînant ainsi la reprise du processus de diffusion sur une profondeur $d' > d$. Un nouvel équilibre s'établit lorsque l'intégrale du champ atteint la valeur $(-V_e) + \phi_B$ et par conséquent aucun courant ne circule dans le circuit extérieur sauf un courant inverse de saturation de valeur négligeable.

Si la tension V_e est positive, le champ électrique total ($E_{ex} - E_{in}$) diminue et tend vers une valeur nulle lorsque V_e atteint ϕ_B . L'épaisseur d diminue et les électrons diffusent du semi-conducteur vers le métal donnant naissance à un courant I_e qui s'exprime

$$I_e = I_s \left[\exp \left(\frac{V_j}{n \times U_T} \right) - 1 \right] \quad (II-3)$$

- U_T est le potentiel thermodynamique (25 mV à 300 °K),
- n est le facteur d'idéalité de la diode compris entre 1 et 2,
- V_j est la tension intrinsèque appliquée à la jonction.

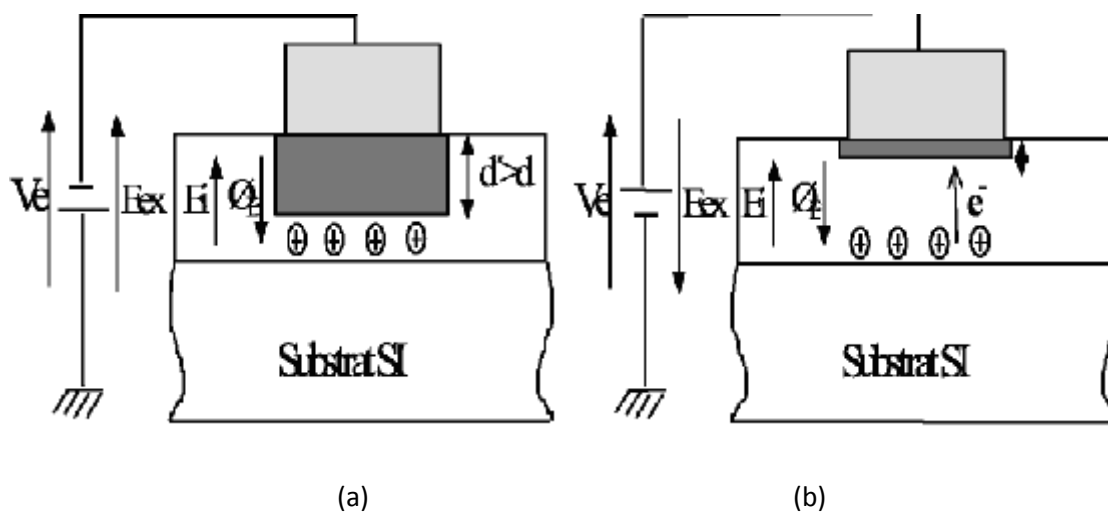


Figure II.15 : $V_e < 0$, équilibre à $(-V_e) + \phi_B$, (b): $V_e > 0$, diffusion des électrons

II.8.1. État de l'Art sur les Transistors MESFET GaAs

Les transistors HEMTs en GaAs sont des composants très importants dans la réalisation des circuits intégrés grâce à ces caractéristiques. Dans ce chapitre on va présenter un état de l'art sur le matériau Arséniure de Gallium (GaAs) ces caractéristiques morphologique, électriques et physiques, les méthodes de préparation des différents couches (substrat et canal), en suite une description détaillée sur les HEMTs fabriqués à base de GaAs.

II.8.2. Le transistor à haute mobilité d'électron (HEMT)

Comme le transistor à effet de champ MESFET (Metal-Semiconductor Field Effect Transistor), le HEMT est caractérisé par trois contacts: le contact métal-semi-conducteur qui est le contact Schottky pour la grille et les deux contacts ohmiques pour les électrodes de source et de drain. Le HEMT apparaît comme une évolution du MESFET.

En effet, il apporte une amélioration afin de palier au problème de transport électronique dans un matériau dopé. Il présente une hétérojonction, une jonction entre deux matériaux ayant des énergies de bande interdite différentes. La conséquence de cette hétérojonction est la création d'un canal très fin dans le matériau non dopé de très faible résistance, entraînant une mobilité d'électrons élevée (origine du nom HEMT). Cette couche est appelée gaz d'électrons à deux dimensions (origine du nom TEGFET).

Les propriétés de transport de ce gaz d'électrons sont considérablement supérieures à celles des électrons libres dans un MESFET classique puisque le canal se situe dans une zone non dopée à très forte mobilité. De plus, les collisions entre électrons n'ont que rarement lieu en raison de défauts peu nombreux.

Dans le HEMT, la tension de grille affecte la position énergétique de la bande de conduction sous la grille par rapport au niveau de Fermi. D'où, l'effet fondamental est lié au phénomène de variation de la densité de porteurs de ce gaz bidimensionnel d'électrons sous l'influence d'une tension appliquée à l'accès grille du composant; cet effet est en opposition au principe du MESFET dans lequel une tension appliquée sur la grille contrôle la largeur du canal de conduction entre le drain et la source.

II.8.3. Principe de fonctionnement du transistor HEMT :

Le transistor à haute mobilité d'électrons fonctionnant lui aussi suivant le principe de la modulation de la densité de charge, le TEGFET (Two-dimensional Electron Gas Field Effect Transistor), MODFET (Modulation Doped Field Effect Transistor), ou HFET (Hétérojonction Field Effect Transistor) est souvent désigné par HEMT (High Electron Mobility Transistor). Ce transistor est apparu grâce au bon confinement des porteurs qui sont séparés de leurs donneurs et qui se trouvent dans un canal séparé de la grille et de la couche donneuse par une couche intrinsèque appelée espaceur. Le principe de base consiste à mettre à profit les propriétés de haute mobilité d'un gaz bidimensionnel d'électrons formé à l'interface d'une hétérojonction. L'idée de base est de séparer spatialement les électrons libres, des donneurs ionisés dont ils proviennent. Le HEMT se compose, comme le montre la figure (Figure II.1) d'un empilement de plusieurs couches semi-conductrices. Le canal actif est formé à l'interface du GaAs et du AlGaAs (entre deux matériaux à petite et large bande interdite).

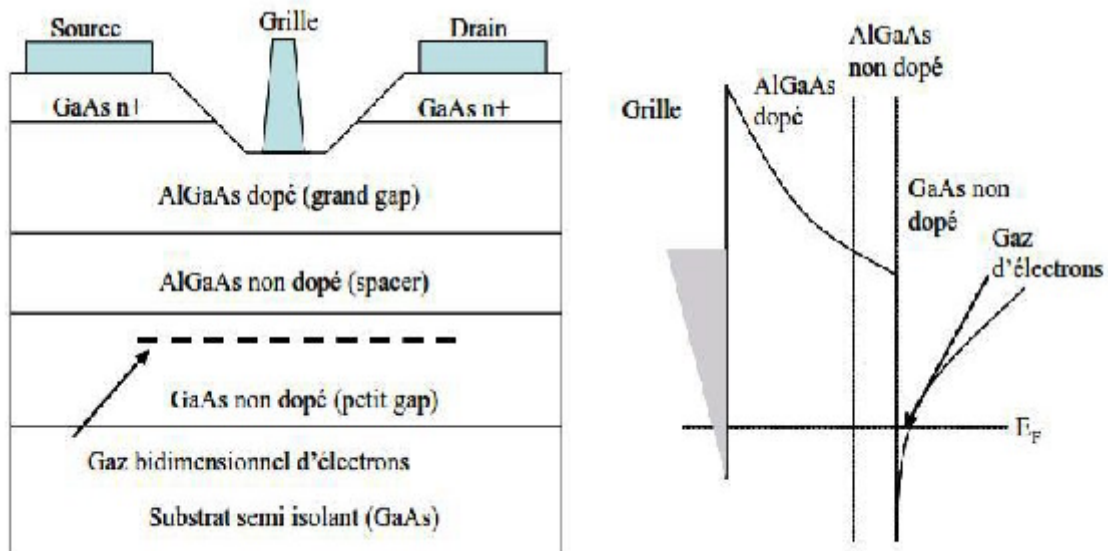


Figure II.16: Structure de principe d'un HEMT classique associée à son diagramme de bande d'énergie.

La couche donneuse n-AlGaAs fournit des électrons de conduction au canal. Ces électrons libres tombent dans le plus bas état d'énergie disponible du côté GaAs de l'hétérojonction. L'épaisseur de cette couche est de l'ordre de 100 Å. L'accumulation des électrons dans le canal GaAs et la présence des atomes donneurs ionisés dans la couche

AlGaAs séparée du canal par l'espaceur crée un champ électrique transversal $E_T \vec{}$. La dispersion des électrons dans la couche GaAs est empêchée par l'action du champ $E_T \vec{}$ qui ramène les électrons vers l'interface. La bande de conduction se courbe et devient un puits de potentiel dans lequel les électrons sont confinés. Ce système est connu sous le nom du gaz bidimensionnel d'électrons (gaz 2D). Les électrons se déplacent librement à l'interface de l'hétérojonction avec une énergie quantifiée selon la direction de la croissance. La présence d'une discontinuité de la bande de conduction ΔE_c entre les deux matériaux AlGaAs et GaAs d'environ 237 meV lorsque le taux d'aluminium x est de 30% forme une barrière de potentiel à l'interface de l'hétérojonction qui empêche le retour des électrons vers la couche donneuse. La présence de l'espaceur réduit l'interaction Coulombienne entre les électrons et les donneurs.

L'épaisseur de cette couche est choisie de telle sorte que la mobilité soit optimale tout en ayant une densité relativement importante de porteurs. La zone de confinement des électrons constitue le canal du transistor. Il est possible donc de contrôler la densité de ces porteurs par l'intermédiaire de la tension appliquée sur la grille. Lorsque la tension V_{gs} augmente, le puits de potentiel devient de plus en plus profond, permettant à un nombre plus grand d'électrons de diffuser dans le canal GaAs. Comme pour les autres FETs, la tension V_{ds} crée un champ électrique dans le canal qui entraîne les électrons de la source vers le drain, formant ainsi un courant I_{ds} (drain-source). Pour des tensions de grille suffisamment négatives, la densité de porteurs dans le canal devient négligeable et aucun courant significatif ne circule entre la source et le drain. Le HEMT est alors considéré bloqué (très peu de courant circule entre le drain et la source). L'évolution du courant I_{ds} en fonction de la tension V_{ds} et pour différentes valeurs de la tension de grille est sensiblement la même que pour le MESFET. De plus, un effet de saturation de courant intervient également pour le HEMT. Il provient essentiellement de la saturation de la vitesse des porteurs .

Lorsque V_{ds} est suffisamment élevée ou la longueur géométrique de la grille est suffisamment courte, la composante longitudinale (dans la direction drain-source) du champ électrique dans la zone de quasi-pincement peut être suffisamment élevée pour que les porteurs atteignent leur vitesse de saturation. Le courant de saturation est dans ce cas un courant sous champ électrique (drift current) avec une vitesse maximale .

II.8.4. Contrôle linéaire de la charge :

Le diagramme de bandes d'énergie d'un transistor HEMT classique AlGaAs/GaAs est donné ci-après (Figure II.17), où qV_b est la hauteur de la barrière Schottky. d_d représente l'épaisseur de la couche donneuse AlGaAs dopée et d_i l'épaisseur de la couche AlGaAs non dopée (l'espaceur)

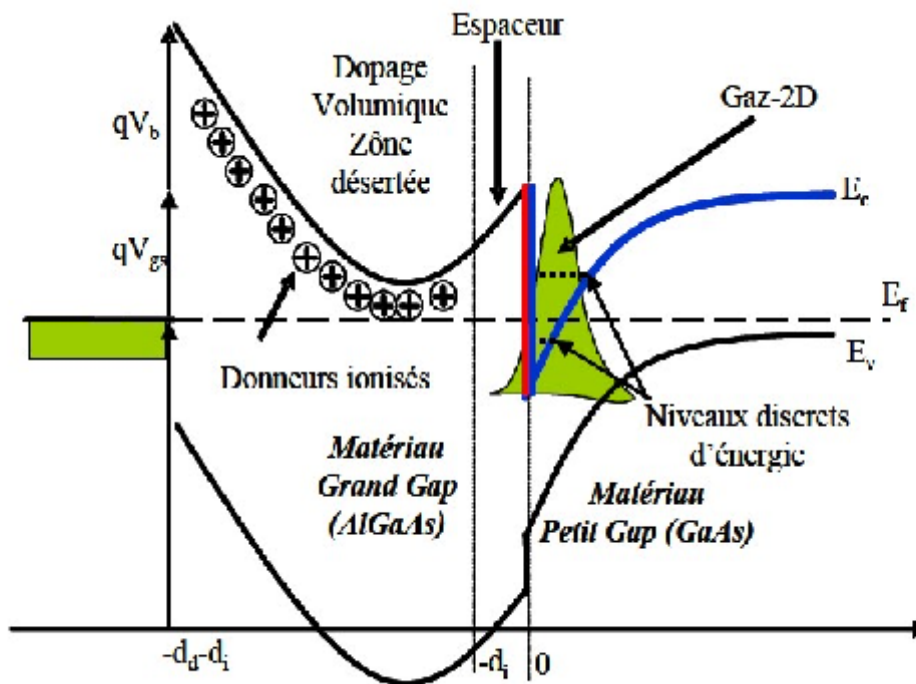


Figure II.17: Formation du gaz bidimensionnel à l'interface de deux matériaux à grande et à petite largeurs de bande interdite.

Nous supposons que la couche AlGaAs est de type n et que la couche GaAs est non intentionnellement dopée. La densité des porteurs dans le gaz bidimensionnel est contrôlée par la tension de grille V_{gs} appliquée à travers la jonction Schottky.

Le gaz 2D est localisé dans un puits de potentiel supposé triangulaire. Les effets quantiques introduisent une suite de sous-bandes E_0, E_1, E_i référencées par rapport au bas de la bande de conduction à l'interface comme le montre la figure (II.17).

La quantité de charges transférées à travers l'interface est déduite en faisant l'égalité entre la quantité de charges provenant de la couche AlGaAs et celle accumulée dans le puits de potentiel[15].

◆ Densité surfacique de charges provenant de la couche AlGaAs

En supposant que la couche donneuse AlGaAs est totalement désertée, la quantité de charges par unité de surface dans le canal est donnée par l'expression suivante

$$n_s = \frac{\epsilon}{q \times d} [V_{gs} - (b - V_d) + \frac{EF - \Delta E_c}{q}] \quad (II.4)$$

Cette équation, où $d = d_i + d_d$ est l'épaisseur totale entre le gaz 2D et la grille, relie la densité surfacique n_s du gaz 2D avec le niveau de Fermi EF et traduit sa variation avec les paramètres

technologiques de la structure tels que le dopage de la couche ternaire par l'intermédiaire de la tension de désertion $V_d = q \cdot N_d \cdot d_d^2 / 2\epsilon$ l'épaisseur de l'espaceur et la discontinuité de la bande de conduction ΔE_c .

◆ Niveaux énergétiques des sous-bandes du puits de potentiel et densité surfacique de charge du 2DG

L'énergie potentielle des électrons dans la direction perpendiculaire à l'interface et à l'intérieur de la couche GaAs est obtenue à partir de la résolution de l'équation de poisson prenant en compte la densité de charges $\rho(z)$ qui s'écrit .

$$\rho(z) = -q \times \sum_{i=0}^{\infty} n_i \times |\phi_i|^2 \quad (II.5)$$

Où ϕ_i est l'amplitude de la fonction d'onde solution de l'équation de Schrödinger et n_i la concentration d'électrons correspondant à chaque niveau quantique donnée par l'expression suivante:

$$n_i = (D_{stat} \times \frac{K_B \times T}{q}) \times \ln [1 + \exp(\frac{EF - E_i}{K_B \times T})] \quad (II.6)$$

Où D_{stat} est la densité d'état dans l'espace des énergies qui s'écrit dans le cas d'un système 2D

pour une sous-bande $D_{\text{état}} = \frac{q \times m_e}{\pi \hbar^2}$. Dans un système 2D, $D_{\text{état}}$ est une constante en fonction de l'énergie. E_i est l'énergie de la i ème sous-bande qui s'écrit dans le cas de l'approximation d'un puits triangulaire :

$$E_i = \left(\frac{\hbar^2}{2 \times m_0} \right)^{1/3} \times \left[\frac{2}{3} \times q \times E_s \times \pi \times \left(i + \frac{3}{4} \right) \right]^{2/3} \quad (\text{II.7})$$

E_s est le champ électrique de surface. La variation de E_s en fonction de la densité de porteurs n_s est donnée par le théorème de Gauss :

$$\varepsilon \times E_s = n_s \times q = q \times \sum_{i=0}^{\infty} n_i \quad (\text{II.8})$$

Il a été montré [11] qu'au moins 80% des électrons occupent les deux premières sous-bandes E_0 et E_1 . En combinant les deux dernières équations (II.7, II.8) les deux niveaux d'énergies E_0 et E_1 s'expriment comme suit

$$E_0 = A_0 \times (n_s)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{II.9})$$

$$E_1 = A_1 \times (n_s)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{II.10})$$

A_0 et A_1 sont des constantes qui dépendent du matériau. Pour une couche GaAs non dopée les valeurs de A_0 et A_1 sont respectivement

$$A_0 = 2,5 \cdot 10^{-12} \text{ (S.I)} \quad (\text{II.11})$$

$$A_1 = 3,5 \cdot 10^{-12} \text{ (S.I)} \quad (\text{II.12})$$

La densité surfacique de charges accumulées dans le puits de potentiel s'écrit alors :

$$n_s = D_s \cdot \frac{K_B \times T}{q} \cdot \left\{ \left[1 + \exp\left(\frac{E_F - E_0}{K_B \times T}\right) \right] \left[1 + \exp\left(\frac{E_F - E_1}{K_B \times T}\right) \right] \right\} \quad (\text{II.13})$$

La résolution de cette équation dans laquelle les niveaux énergétiques E_0 et E_1 sont liés à n_s par les relations des deux équations (II.10) et (II.9), conduit à une équation du second

degré en $\exp\left(\frac{EF}{k_B \times T}\right)$ La solution de cette équation permet de déterminer les valeurs de EF en fonction de n_s pour une température donnée .Ces résultats sont reportés sur la figure (FigII.18).

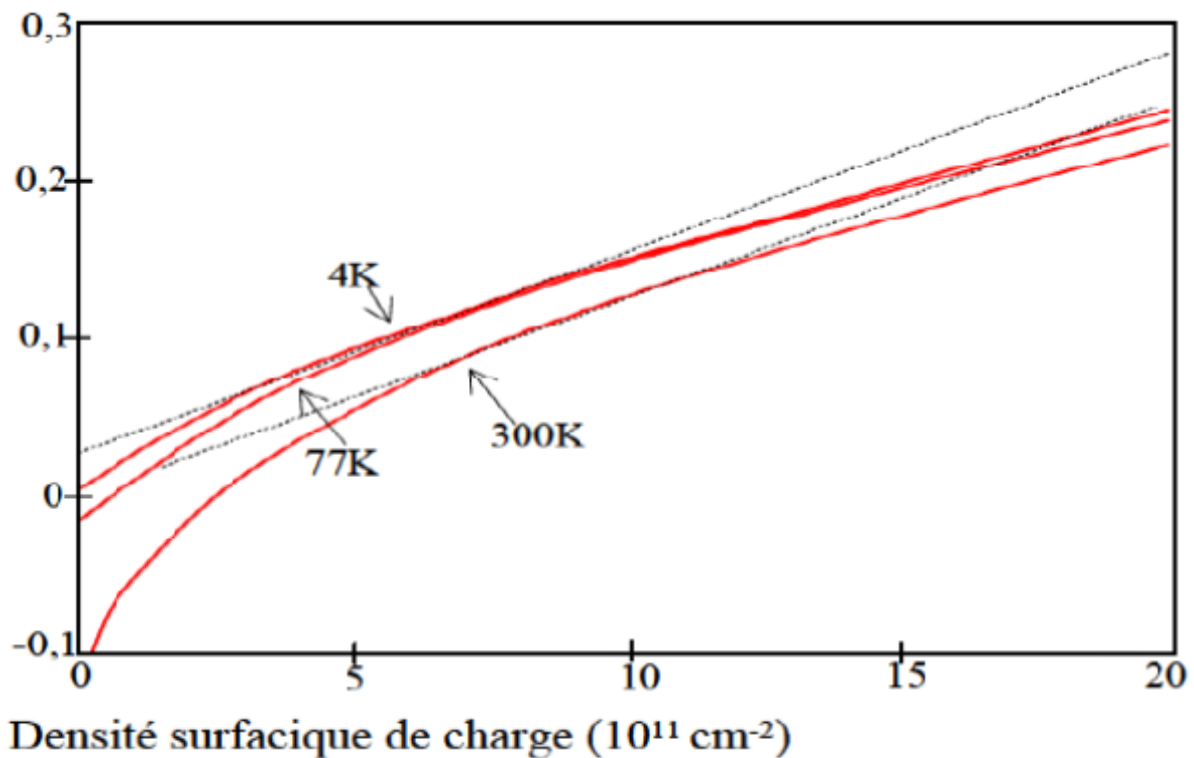


Figure II.18: Variation du potentiel de Fermi en fonction de la densité surfacique de charge selon Drummond et al . L'approximation linéaire est donnée par les pointillés.

Drummond [11] et al. ont proposé une loi approchée traduisant la variation de la densité surfacique de charge en fonction du niveau de Fermi. Il s'agit d'une approximation linéaire. (Figure II.18) dont le domaine de validité est vérifié pour des densités comprises entre $5 \cdot 10^{11} \text{cm}^{-2}$ et $5 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$.

$$E_F = \Delta E_{F0}(T) + \alpha \times n_s \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Avec } \alpha = 0,125 \cdot 10^{-16} \text{ (eV.m}^2\text{) et } \Delta E_{F0}(T) \text{ (eV)} = 0,03 \times \left(1 - \frac{T}{300}\right)$$

Cette approximation linéaire aboutit au modèle linéaire de contrôle de charge.

♦ Contrôle de la densité surfacique de charge du gaz 2D par la tension de grille.

En utilisant l'équation donnant n_s (II.13) et en tenant compte de la linéarité de la variation du niveau de Fermi avec n_s (II.14) nous obtenons finalement

$$n_s = \frac{\epsilon}{q \times (d + \Delta d)} \times (V_{gs} - V_{th}) \quad (\text{II.15})$$

Avec : $\Delta d = \frac{\epsilon \times a}{q} = 80 \text{ \AA}$, la distance effective entre l'hétérojonction et le gaz 2D. V_{th} représente la tension de seuil, c'est-à-dire la tension qui annule la charge surfacique liée au gaz 2D

$$V_{th} = V_b - V_d - \frac{\Delta E_c}{q} + \frac{\Delta E_{F0}(T)}{q} \quad (\text{II.16})$$

Dans le cas où les états d'interface ne seraient pas négligeables, la tension de seuil s'écrit alors:

$$V_{th} = V_b - V_d - \frac{\Delta E_c}{q} + \frac{\Delta E_{F0}(T)}{q} + \frac{d}{\epsilon} Q_i \quad (\text{II.17})$$

L'équation (II.17) met en évidence la variation linéaire de la densité du gaz 2D en fonction de la tension de grille V_{gs} . La capacité effective grille canal (gaz 2D) C_{eff} par unité de surface est définie par la relation suivante :

$$C_{eff} = \frac{\partial Q_s}{\partial V_{gs}} = q \frac{\partial n_s}{\partial V_{gs}} \quad (\text{II.18})$$

Compte tenu de l'équation (II.17) on obtient :

$$C_{eff} = \frac{\epsilon}{d + \Delta d} \quad (\text{II.19})$$

Cette capacité dépend des propriétés de la couche AlGaAs [12]. L'équation (II.12) s'écrit alors :

$$ns = \frac{C_{eff}}{q} (V_{gs} - V_{th}) \quad (II.20)$$

♦ Équation du courant drain en régime ohmique Plusieurs auteurs ont développé des modèles pour rendre compte des comportements électriques des caractéristiques $I_{ds} - V_{ds}$ des transistors HEMTs. Ces modèles introduisent souvent des paramètres d'ajustement permettant d'obtenir un accord satisfaisant entre la théorie et l'expérience.

Dans ce paragraphe, nous décrivons le modèle proposé par Py et al. Il permet d'établir l'expression du courant drain en régime ohmique en prenant en compte le contrôle linéaire de la densité de porteurs par la grille, la variation de la mobilité avec ns et les résistances d'accès. Pour un champ électrique longitudinal uniforme sous la grille, l'intensité du courant drain est proportionnelle à la conductance g_{ds} du canal :

$$I_{ds} = g_{ds} \times V_{ds} \quad (II.21)$$

La conductance g_{ds} du canal formé par le gaz bidimensionnel d'électrons est donnée par la relation suivante

$$g_{ds} = \sigma \times \frac{W}{L} = q \times \mu \times ns \times \frac{W}{L} \quad (II.22)$$

Où σ représente la conductivité du matériau et ns la densité surfacique des porteurs. L et W sont respectivement la longueur et la largeur du canal du transistor.

En combinant les deux dernières équations (II.21, II.22) le courant drain en régime ohmique s'écrit alors :

$$I_{ds} = q \times \mu \times ns \times \frac{W}{L} \times V_{ds} \quad (II.23)$$

En prenant en compte l'expression (II.23) de ns on obtient :

$$I_{ds} = \mu \times C_{eff} \times \frac{W}{L} \times (V_{gs} - V_{th}) \times V_{ds} \quad (II.24)$$

En utilisant l'expression suivante de la mobilité [13] on obtient :

$$\mu = \mu_0 \times \left(\frac{n_s}{n_{s0}}\right)^k \quad (\text{II.25})$$

Où μ_0 est la mobilité à faible champ électrique et n_{s0} la densité de porteurs à l'équilibre thermodynamique. Le courant en régime ohmique s'écrit alors:

$$I_{ds} = \beta \times (V_{gs} - V_{th})^{1+k} \times V_{ds} \quad (\text{II.26})$$

$$\text{Où } \beta = \frac{W}{L} \times \mu_0 \times q \times n_{s0} \times \left(\frac{C_{eff}}{q \times n_{s0}}\right)^{1+k} \quad (\text{II.27})$$

On en déduit la résistance du canal en régime ohmique :

$$R_{canal} = \frac{1}{\beta \times (V_{gs} - V_{th})^{1+k}} \quad (\text{II.28})$$

Ici le constant k est égal à 0,76

II.8.5. Transconductance et conductance de drain :

Les éléments qui composent les transistors à effet de champ peuvent être regroupés en deux catégories distinctes. Les éléments extrinsèques représentent les différentes structures d'accès comme les résistances R_s et R_d . Les éléments intrinsèques comme la conductance g_d et la transconductance g_m traduisent par leur nature les comportements localisés de la structure physique des transistors. La transconductance représente le mécanisme de commande d'un transistor : c'est la variation du courant de drain I_d en fonction de la tension de grille pour une tension de drain constante.

La conductance de drain représente la résistance du canal, elle traduit la variation du courant I_d en fonction de la tension de drain à une tension de grille constante. L'expression du courant de drain intrinsèque I_d permet de déterminer les expressions mathématiques de la transconductance et la conductance de drain. Lorsque le transistor est polarisé à un point de fonctionnement donné par les tensions de drain et de grille, l'expression de courant I_d peut être écrit comme suit[13] :

$$dId = \frac{\partial Id}{\partial Vg} dVg + \frac{\partial Id}{\partial Vd} dVd \quad (II.29)$$

$$dId = gm dVg + gd dVd \quad (II.30)$$

_Remarque :

Le modèle linéaire de contrôle de charge n'est valable que pour des polarisations de grille pour lesquelles les électrons restent dans le puits de potentiel à une distance fixe de l'hétérojonction. Pour des tensions de grille Vgs proches de la tension de seuil Vth la localisation du 2DEG varie en fonction de Vgs [14] et donc Δd varie comme l'équation II.15. Pour des tensions de grille augmentant à partir de Vth , la conduction se fait essentiellement dans le canal [15].

HEMT parasite. Ainsi, la densité d'électrons du 2DEG sature. VTm peut être définie comme étant le seuil d'apparition de l'effet MESFET parasite

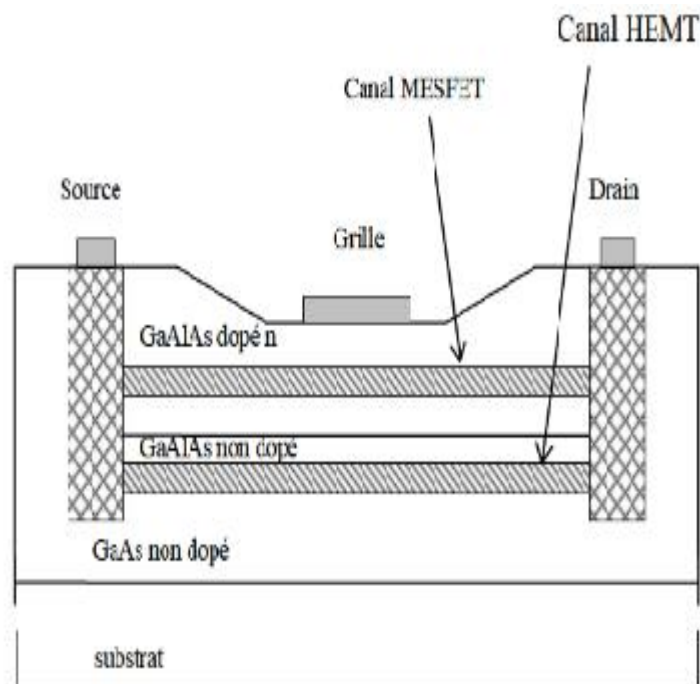


Figure II.19: Effet HEMT GaAs parasite.

II.8.6.CONCLUSION :

Vue les issues offert par le transistor à effet de champs a haute mobilité électronique; la HEMT GaAs attire une grande partie de recherche scientifiques. Dans ce chapitre; on illustré cette importance et les opportunités offertes par ce dernier. Il constitue une amélioration significative du transistor a effet de champs HEMT GaAs . Où les propriétés de transport des électrons du gaz 2DEG sont considérablement supérieures à celle des électrons libres dans le canal du HEMT GaAs comme nous l'avons éclairés dans la partie de fonctionnement de HEMT AlGaAs /GaAs ; on étudiant la variation de son courant drain-source en fonction de la densité du 2DEG et de ses éléments caractéristiques (la transconductance et la conductance de sortie).

Chapitre III :
Simulation de transistor
HEMT (GaAs) avec logiciel
SILVACO ATLAS

III Partie I : Presentation du logiciel « Silvaco-Atlas »

III.I Introduction

Les micro-ordinateurs sont actuellement des plates formes privilégiées pour les applications de simulation, ils offrent en effet une très grande variété d’outils logiciels pour le développement des programmes de simulation et de traitement de données. Afin de simuler les caractéristiques électriques de notre dispositif HEMT, on a utilisé le logiciel « Silvaco » qui est un outil de fabrication virtuelle de plaquettes. Il propose une variété d’outils logiciels puissants. Dans le présent chapitre, nous allons présenter le logiciel de simulation « Silvaco-Atlas », en expliquant aussi les étapes suivis pour simuler notre structure.

III.I.1. Logiciel de simulation « Silvaco-Atlas »

La figure (III-1) montre l’environnement de fabrication virtuelle des plaquettes du logiciel « Silvaco ». Il est constitué de ‘7’ modules parmi lesquelles on a utilisé le logiciel « Atlas » qui permet la simulation, en deux et trois dimensions, des dispositifs électroniques à semi-conducteurs.

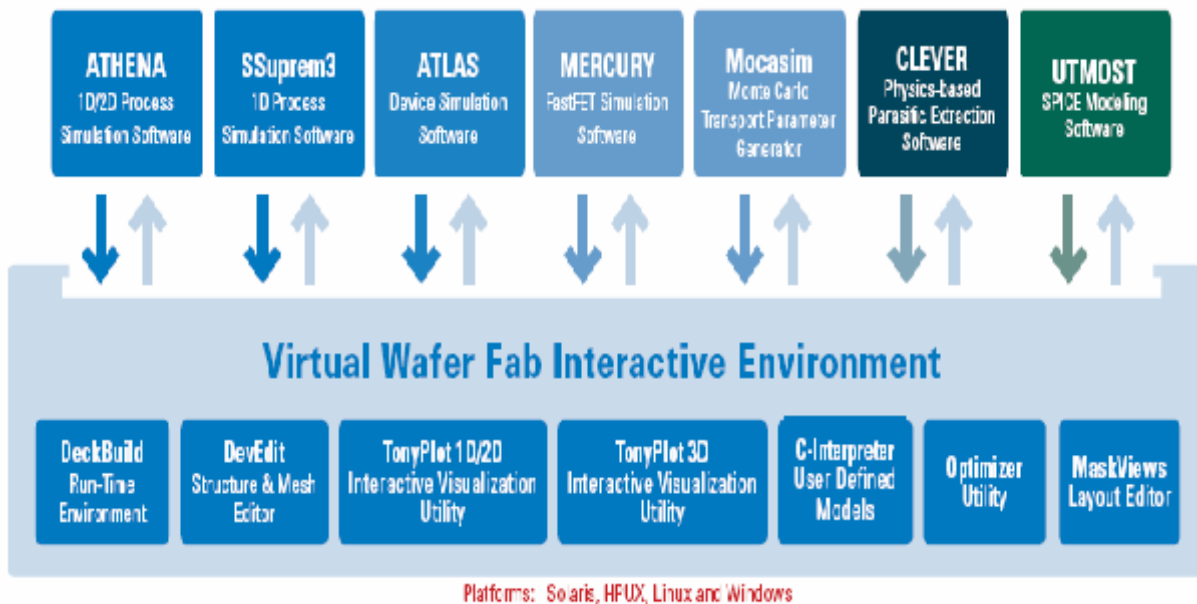


Figure III-1: Environnement virtuel de fabrication des plaquettes de Silvaco [16]

La Figure (III-2) montre les entrées et les sorties du logiciel «Atlas» dont l'environnement d'exécution «Deck Build» reçoit les fichiers d'entrée (programmes), dans lesquelles «Silvaco-Atlas» a été appelé à exécuter le code, et « Tony Plot » a été utilisé pour afficher et visualiser la sortie de la simulation.

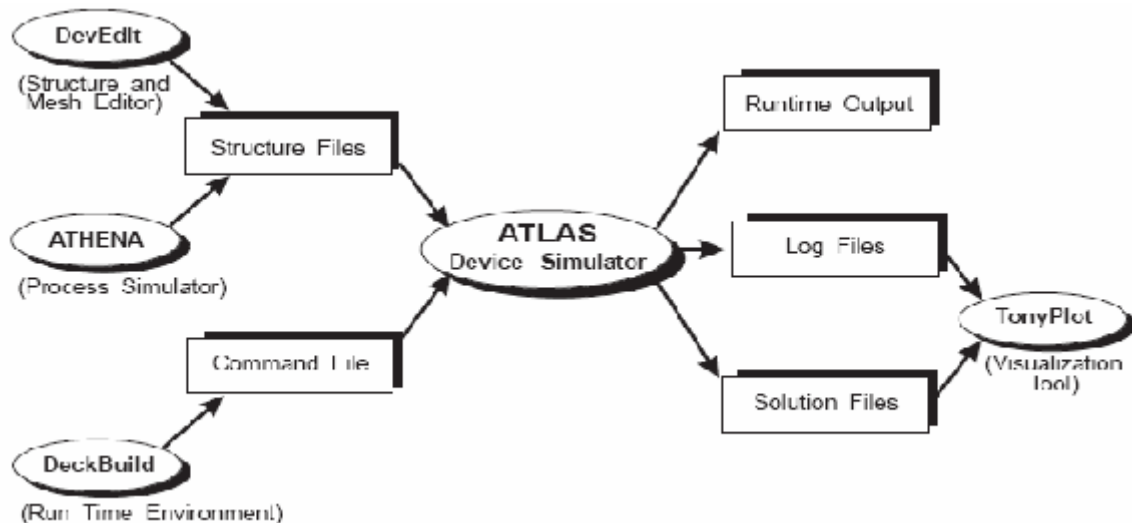


Figure III-2 : Entrées et sorties du logiciel « Atlas » [17].

III.1.2. Utilisation du logiciel « Silvaco-Atlas »

L'outil de simulation utilisé, le logiciel ATLAS, appartient à la famille de logiciels de la société Silvaco. Le module mis en œuvre est basé sur la résolution des équations de dérive-diffusion dans les composants.

- ❖ DC . AC petit signal . et le temps - dépendance complète .
- ❖ Modèles de transport de dérive-diffusion .
- ❖ Bilan énergétique et les modèles de transport hydrodynamiques .
- ❖ Chauffage et dissipateurs Lattice .
- ❖ Classés et hétérojonctions brusques .
- ❖ Interactions optoélectroniques avec traçage générale de rayons
- ❖ Les matériaux amorphes et polycristallins.
- ❖ Environnements de circuit général.
- ❖ L'émission stimulée et rayonnement
- ❖ Statistique de Fermi-Dirac et de Boltzmann.

- ❖ Modèles de mobilité avancée.
- ❖ Effets de dopage lourds.
- ❖ Accepteur complet et donateurs dynamique de piéger Ohmique.
- ❖ Schottky. et des contacts isolant.
- ❖ SRH, radiatif. Auger. et la recombinaison de surface.
- ❖ Ionisation par impact (local et non local).
- ❖ Grilles flottantes.
- ❖ Band- à - bande et Fowler - Nordheim.
- ❖ Injection de porteurs chauds.
- ❖ Modèles de transport quantique
- ❖ Courants d'émission thermique.

III.1.2 .1. Les modèles physiques

Les modèles physiques inclus dans « Atlas » sont:

- Drift-diffusion transport modèles.
- Energie de la balance et hydrodynamique du modèle de transport.
- Interaction optoélectronique avec trace principale.
- Environnement de circuit principal.
- Simulation d'émission et radiation
- Statistiques de Fermi-Dirac et Boltzmann.

III.I.3 Structure de fichier d'entrée

Silvaco-Atlas reçoit les fichiers d'entrée (programmes) à travers « DeckBuild ». Le code écrit dans le fichier d'entrée appel « Atlas » pour fonctionner avec la commande suivante:

-Go Atlas

Suite à cette commande, le fichier d'entrée doit suivre un modèle. Les groupes de commandes sont indiqués sur la Figure (III-3).

<i>Group</i>		<i>Statements</i>
1. Structure Specification	————	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material Models Specification	————	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical Method Selection	————	METHOD
4. Solution Specification	————	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results Analysis	————	EXTRACT TONYPLOT

FigureIII-3 : Groupes de commandes [16,17].

III.I.4 Spécification de la structure étudiée

La spécification de la structure est effectuée en définissant le maillage, les régions, les électrodes et le niveau de dopage.

III.I.4-a Maillage

Le maillage est une série de lignes horizontales et verticales. Dans notre étude, le maillage utilisé est à deux dimensions, par conséquent, seuls les paramètres x et y sont définis.

La figure (III-4) montre le maillage d'une structure HEMT.

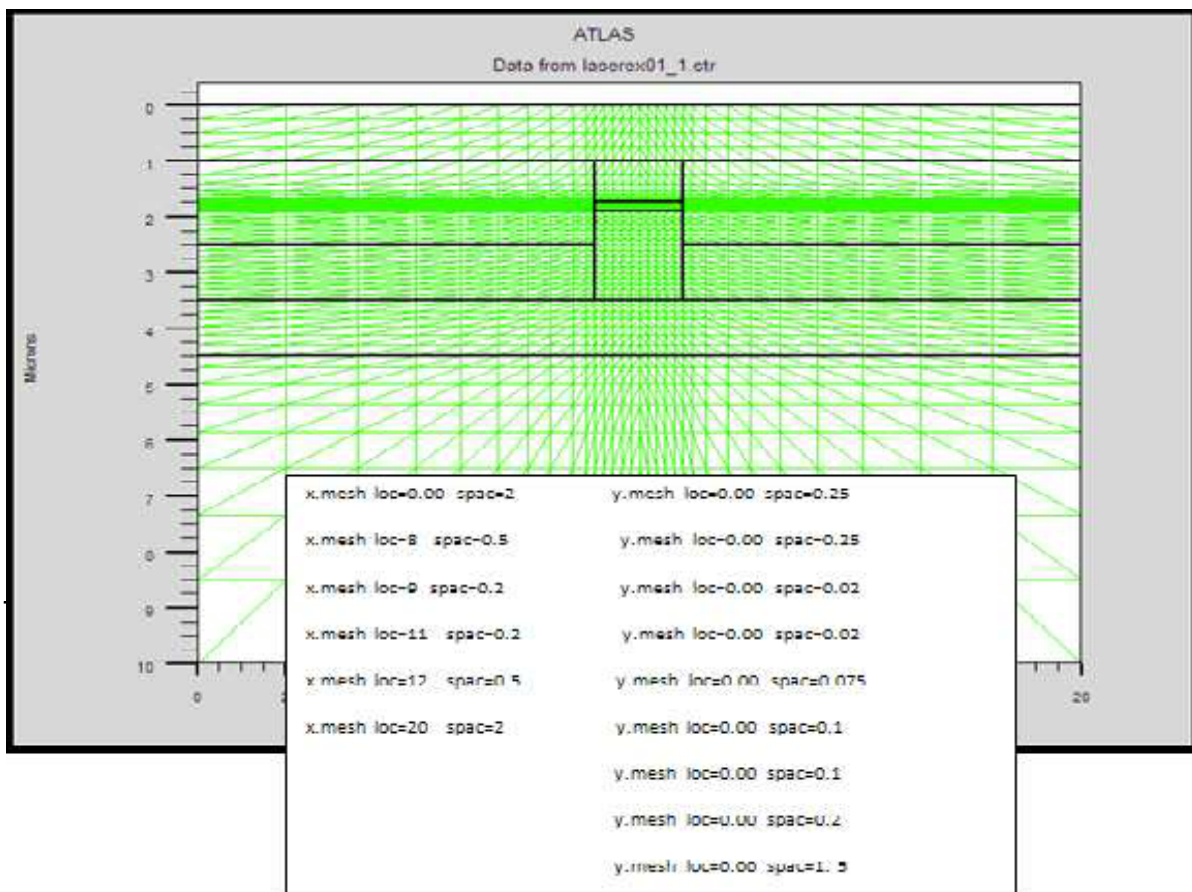


Figure III-4: Maillage à deux dimensions (x,y).

Le format général de définition de maillage est:

MESH X.LOCATION = <VALEUR> ESPACEMENT = <VALEUR>

MESH Y.LOCATION = <VALEUR> ESPACEMENT = <VALEUR>

Par exemple, si x.mesh départ à 0 microns avec un espacement de 2 microns, cela signifie qu'il est relativement épais. x.mesh devient plus fin entre 9 et 11 microns avec un espacement de 0,2 microns.

De même pour y.mesh, par exemple y.mesh départ à 0 microns avec un espacement de 0,25 microns, le maillage est plus épais à l'endroit y.mesh de 10 microns, lorsque l'espacement est de 1,5 microns. La précision de la simulation dépend de l'état de la maille.

Un maillage épais produit une rapide simulation, mais les résultats sont moins précis. Tandis qu'un maillage fin produit un ralentissement de la simulation, mais des résultats plus précis. Donc le maillage fin est plus intéressant de point de vue résultat dans la simulation.

III.I.4.b.Régions

Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions dont le format de définition des régions est le suivant:

REGION nombre = < integer > < material_type > / < position des paramètres >

La figure (III-5) montre les régions du maillage. Il ya dix régions, les limites de chaque région sont explicitement identifiés dans les axes x et y.

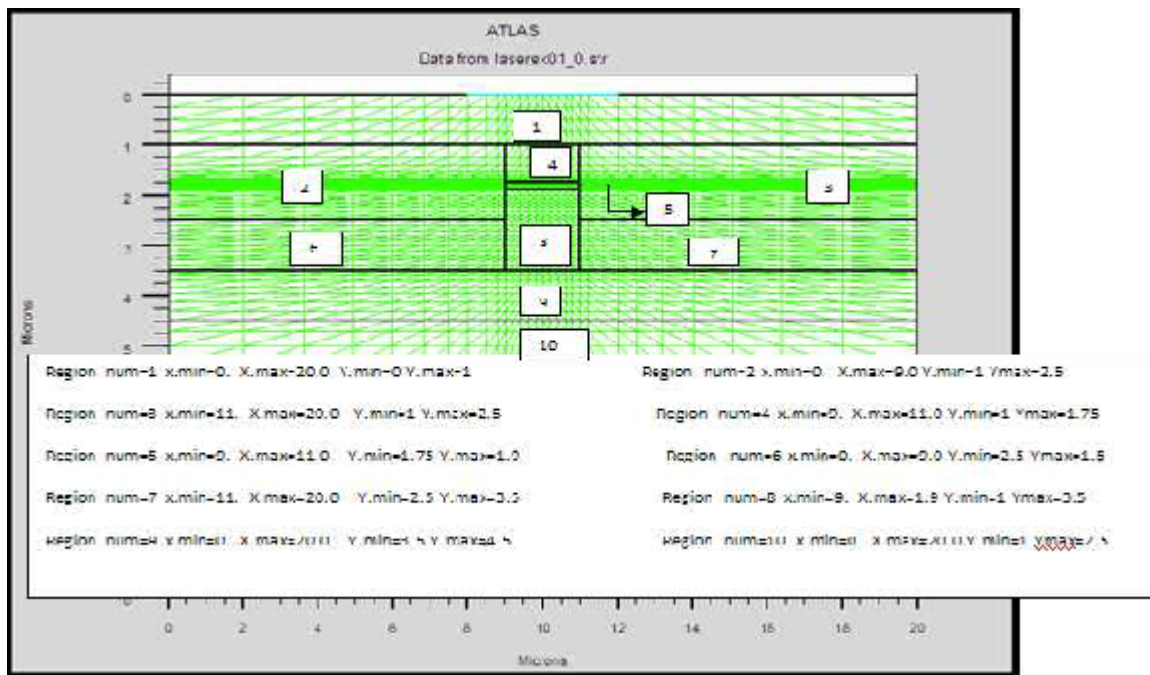
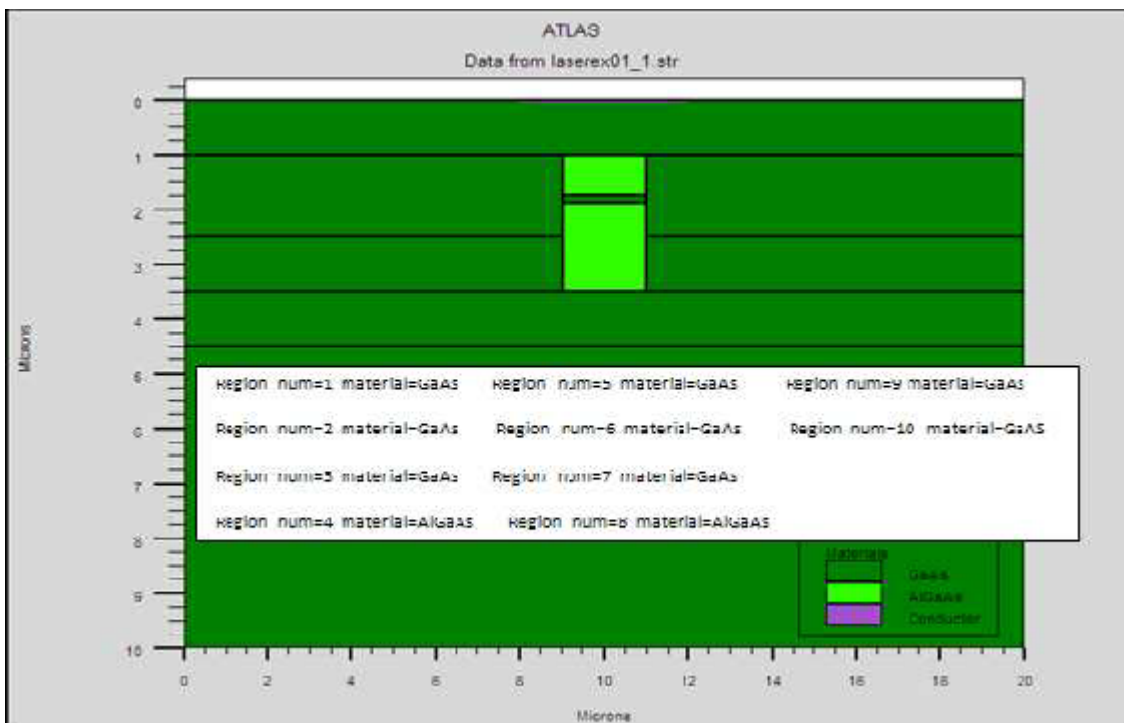


Figure III-5: Définition des régions.

La figure (III-6), montre la façon de définition des matériaux pour chaque région. Notons que le code de couleur indique la matière. Les régions ont des lignes verticales et horizontales pour marquer leurs limites.



Figures III-6 : Les régions et les matériaux.

III.I.4 .c. Electrodes

« Atlas » a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies. Le format de définition d'électrodes est comme suit:

ELECTRODE NAME = < nom de l'électrode > < position des paramètres >

La figure (III-7) montre la position de l'anode et la cathode par des valeurs de x et de y.

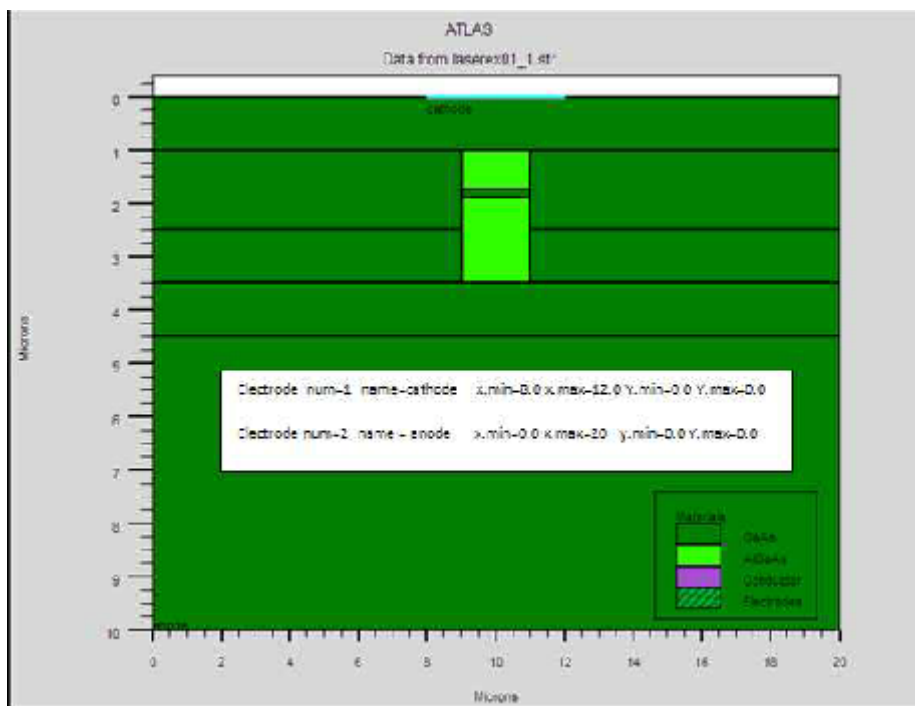


Figure III-7 : Définition des électrodes.

III.I.4.d Dopage

Le dernier aspect de la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage. Le format de la déclaration de dopage dans « Atlas » se présente comme suit:

DOPAGE < type de distribution > < type de dopant > / < position des paramètres >

Dans la figure (III-8), les types de dopage et les niveaux de dopage sont définis. Le dopage peut être de type N ou P. Le type de distribution peut être uniforme ou gaussienne.

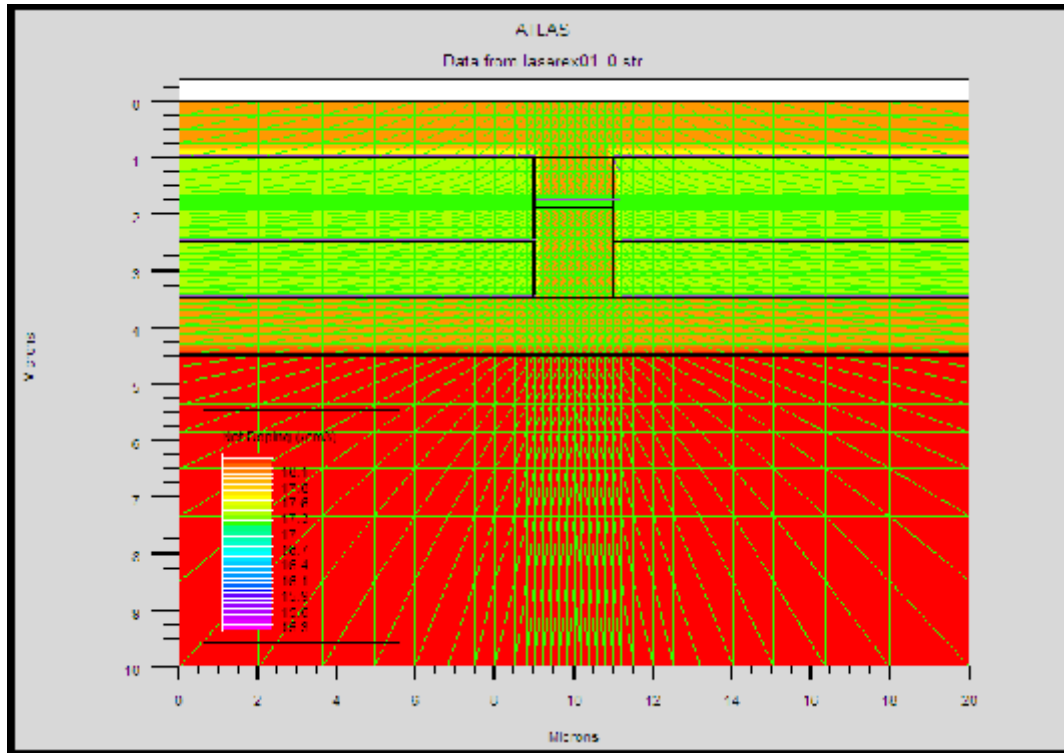


Figure III-8 : Types de dopage.

III.1.5 Spécification du modèle et du matériau

Après la définition de la structure, il faut spécifier les modèles des matériaux, elle se compose de quatre parties : matériau, modèles, contact et interface.

III.1.5.a Matériau

Le format de la déclaration du matériau est le suivant : MATERIAL <localisation > < définition du matériau >

Exemple :

Material Material = GaAs MUN = 8000 MUP = 150 TAUN0 = 3e-7 TAUP0 = 2e-5

Dans cet exemple, « Material » apparaît deux fois, le premier est considérée comme la déclaration du matériau et le second est considéré comme un paramètre de localisation. Plusieurs autres paramètres peuvent être définis par la déclaration « Material », comme exemples de ces paramètres : la mobilité d'électrons (MUN) et la mobilité de trous (MUP), (TAUN0) et (TAUP0) qui sont les durées de vie d'électrons et de trous respectivement.

III.I.5.b Modèles

Les modèles physiques sont classés en cinq catégories:

Mobilités des porteurs de charges, mécanismes de génération-recombinaison, les statistiques de transport, l'ionisation par impact et l'effet tunnel.

La syntaxe de la déclaration du modèle est la suivante:

MODEL<paramètres générales > / <paramètres du modèle >

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation.

Exemple : SRH FLDMOB CONMOB

SRH est le modèle de Shockley-Read-Hall.

CONMOB est le modèle dépendant de la concentration. FLDMOB est le modèle dépendant du champ électrique parallèle.

III.I.5.c .Contact

Le contact détermine les attributions des électrodes. La syntaxe du contact est la suivante :

Contact nombre = < n > | NOM = <ename> | ALL

Cette expression montre la déclaration « contact », Exemple :

CONTACT NAME = anode current

III.I.5.d. Interface

Les limites du semi-conducteur ou de l'isolant sont déterminées dans la déclaration d'interface. La syntaxe est la suivante:

INTERFACE [<parameters>]

III.I.6.Méthodes numérique à sélectionner

Après la précision du modèle de matériaux, la sélection de la méthode numérique doit être indiquée. Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équation, trois types de techniques sont utilisés dans « Silvaco-Atlas »:

- Méthode de Gummel
- Méthode de Newton
- Méthode des blocs

III.I.7. Spécification de Solution

Les instructions de spécification de la solution sont:

Log, Solve, Load et Save.

III.I.7.a. Log

Log enregistre toutes les caractéristiques terminales dans un fichier de données. L'exemple suivant montre un exemple d'utilisation de l'instruction LOG.

```
LOG OUTFILE = myoutputfile.log
```

L'exemple montre l'enregistrement de données dans le fichier « myoutputfile.log ».

III.I.7.b. Solve (Résoudre)

L'instruction SOLVE suit l'instruction LOG. Elle effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Ce qui suit est un exemple de l'instruction SOLVE.

```
SOLVE V2 = 0.8
```

```
SOLVE V2 = 0.9
```

III.I.7.c. Load et Save (chargement et sauvegarde)

L'instruction LOAD introduit, à partir d'un fichier existant, pour chaque point de polarisation les solutions précédentes en tant que proposition initiale.

L'instruction SAVE permet l'enregistrement de toutes les informations obtenues pour un nœud dans un fichier de sortie.

III.I.8. Analyse des résultats

Les résultats et les informations obtenues par la simulation peuvent être affichés graphiquement avec « TonyPlot » (Figure III-9).

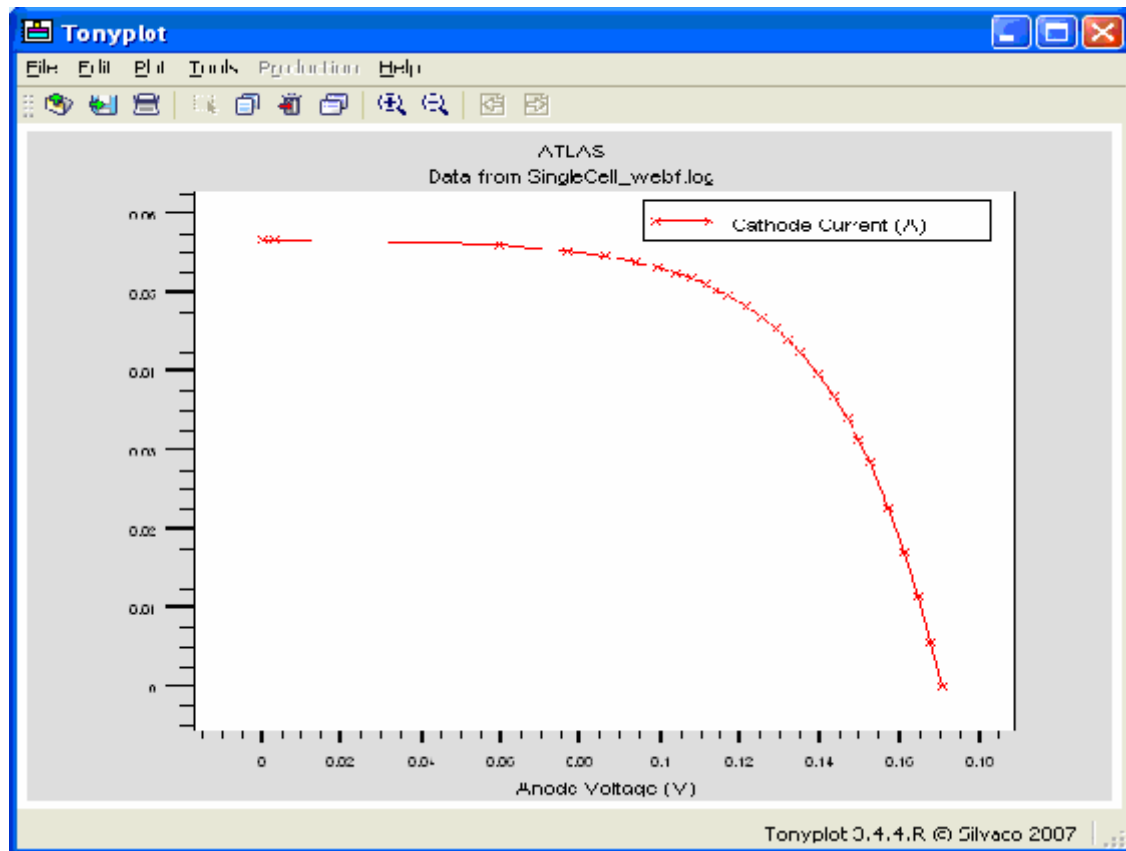


Figure III-9 : Affichage graphique des résultats par « TonyPlot ».

Les différentes étapes de simulation d'un dispositif semiconducteur selon notre logiciel sont comme suit. Premièrement la spécification de la structure étudiée en donnant tout les détails nécessaires pour la structure réelle. Ces instructions sont ainsi représentées selon la formulation suivante:

- 1- Définition des paramètres physiques du matériau
 - La permittivité
 - La largeur de la bande interdite
 - La densité des porteurs libres (électrons) dans la bande de conduction
- 2- La méthode de fabrication des couches de dispositif (Beam epitaxial layer)
 - L'épaisseur de la couche du matériau (région).
 - La fraction molaire de l'Aluminium (Al) dans le ternaire.

- La discontinuité de la bande de conduction de l'hétérojonction qui n'est que la différence de l'affinité électrique entre les deux binaires (AlGaAs et GaAs).
- 3- Le dopage est défini pour chaque région de notre structure par
- 4- le type des dopant donneurs n ou accepteurs p
- 5- la distribution qui peut être uniforme ou gaussien.
- 6- Le maillage du dispositif

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bonne simulation. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats. La méthode numérique utilisée pour résoudre les équations physiques est la méthode des éléments finis. Son principe de base est la discrétisation par éléments des équations à traiter. Les éléments qui définissent la maille élémentaire utilisée par le simulateur sont des prismes. Pour obtenir des résultats fiables et précis, la finesse du maillage doit être définie en fonction des variations des grandeurs physiques. Le choix de maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et l'exactitude des résultats [19].

Le maillage doit être très fin pour les régions telles que la région du canal, les régions d'interface et sous les différents contacts, alors qu'il peut être moins serré pour d'autres régions du transistor, en dehors de ces zones actives.

Partie II : Résultat et interprétation

III.II.1 Introduction :

Les fonctions toujours plus nombreuses de l'électronique, nécessitent des composants fonctionnant à des fréquences très élevées et pouvant délivrer une importante puissance de sortie. Les structures hétérojonctions à base des semi-conducteurs III-V constituent une évolution importante dans la technologie hyperfréquence qui n'était destinée que pour des applications militaires (radar, guidage, etc...) et que, de nos jours, a envahi le domaine grand public, et on leur trouve sans cesse de nouvelles utilisations (GPS, etc...).

Les transistors HEMTs à base de GaAs sont des composants parmi d'autres qui attirent l'attention des chercheurs scientifiques et qui est déjà d'un grand usage.

Dans ce chapitre, nous exposons les résultats de simulation numérique bidimensionnelle des caractéristiques courant-tension de transistor AlGaAs/GaAs HEMT avec différents paramètres technologiques et physiques tels que longueur, profondeur de la grille et le dopage du canal. Selon les modèles présentés dans le chapitre II, la simulation de la structure est faite en utilisant logiciel ATLAS-SILVACO.

Nous décrivons l'évolution des caractéristiques, courant du drain I_{ds} en fonction de la tension du drain V_{ds} et de la tension de grille V_{gs} , et la transconductance, tout en étudiant l'influence des différents paramètres physiques et technologiques du transistor HEMT.

III.II.2 Le transistor $Al_{0.23}Ga_{0.77}As/GaAs$ HEMT

III.II.2.1 Description de la structure hétérojonction

La structure étudiée est le transistor HEMT à base d'hétérojonction $Al_{0.23}Ga_{0.77}As/GaAs$. C'est une structure dont les paramètres des matériaux constituant le HEMT et calculés avec les paramètres qui sont représentés sur le tableau (III.II.1), et présentés par la figure (III.II.1).

Paramètres et leurs valeurs	HEMT	
Region	GaAs	Al _{0,22} Ga _{0,78} As
Épaisseur de la couche	0.25 (µm)	0.04(µm)
L'épaisseur de substrat	2.30 (µm)	
Largeur de la grille (Lg)	0.3 (µm)	
La profondeur de l'enfoncement de la grille	0.1 (µm)	
La densité de dopage (type n)	1×10 ¹⁵ (cm ⁻³) Distribution uniform	2×10 ¹⁸ (cm ⁻³) Distribution Gaussian

Tableau III.II.1: La structure du HEMT Al_{0,22}Ga_{0,78}As/GaAs simulé par Silvaco-Atlas.

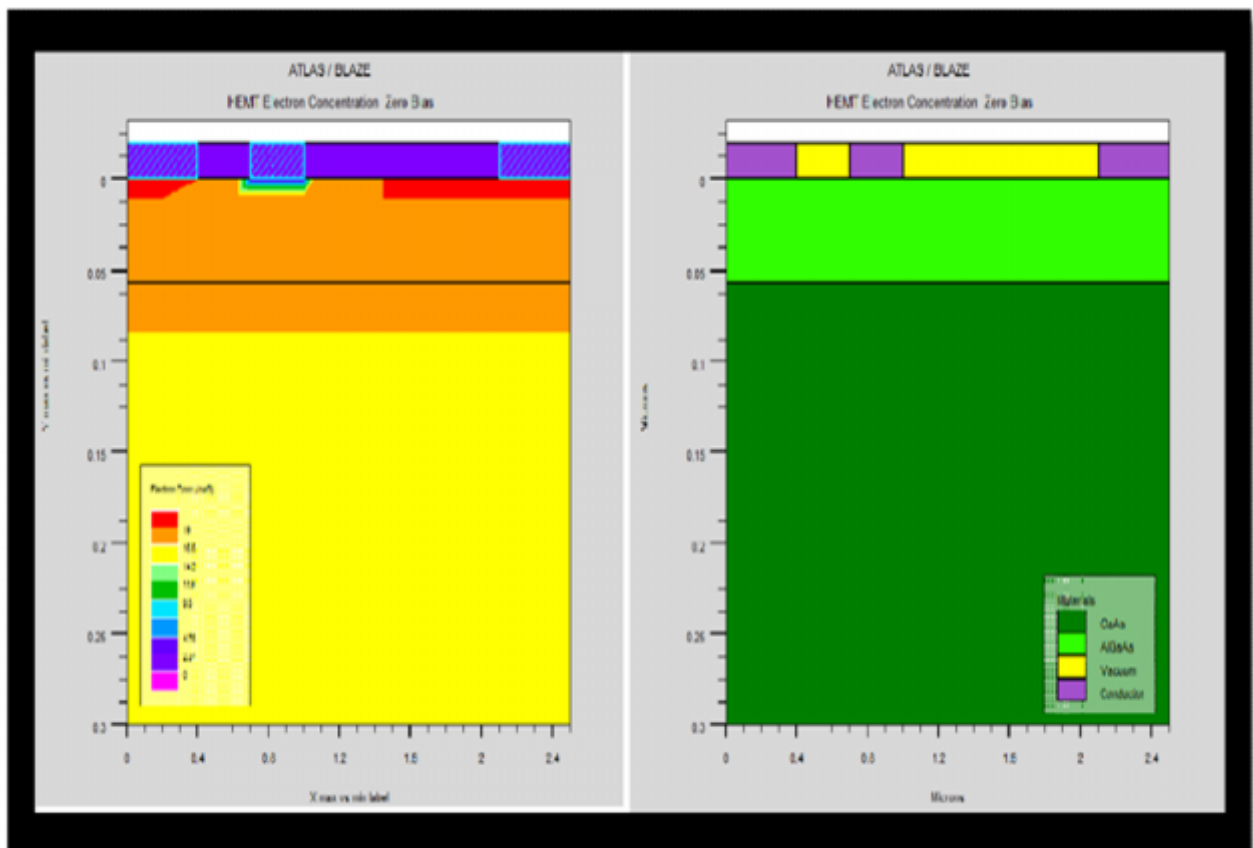


Figure III.II.1: La structure du HEMT Al_{0,22}Ga_{0,78}As/GaAs simulée par Silvaco-ATLAS à gauche la représentation selon le dopage et à droite la représentation de différentes régions dans le HEMT.

Dans le cas des HEMTs, on doit donc mailler de façon très fine l'hétérointerface AlGaAs/GaAs puisque l'extension de la ZCE doit être déterminée avec précision. En effet celle-ci influe directement sur le courant de drain. Il faut aussi mailler finement la couche AlGaAs et en particulier la surface de cette couche puisque les électrons du canal proviennent des pièges et des charges situés à la surface de la couche barrière.

L'optimisation du maillage est donc une étape importante pour la calibration des simulations, qui se répète à chaque changement de la géométrie de la structure ou la prise en compte d'un nouveau mécanisme physique. La figure III.II.2 montre le maillage de notre transistor HEMT AlGaAs/GaAs ; il est très fin dans les régions de contacts métalliques ohmiques et Schottky, la région de la couche donneuse et la partie de formation de gaz à deux dimensions.

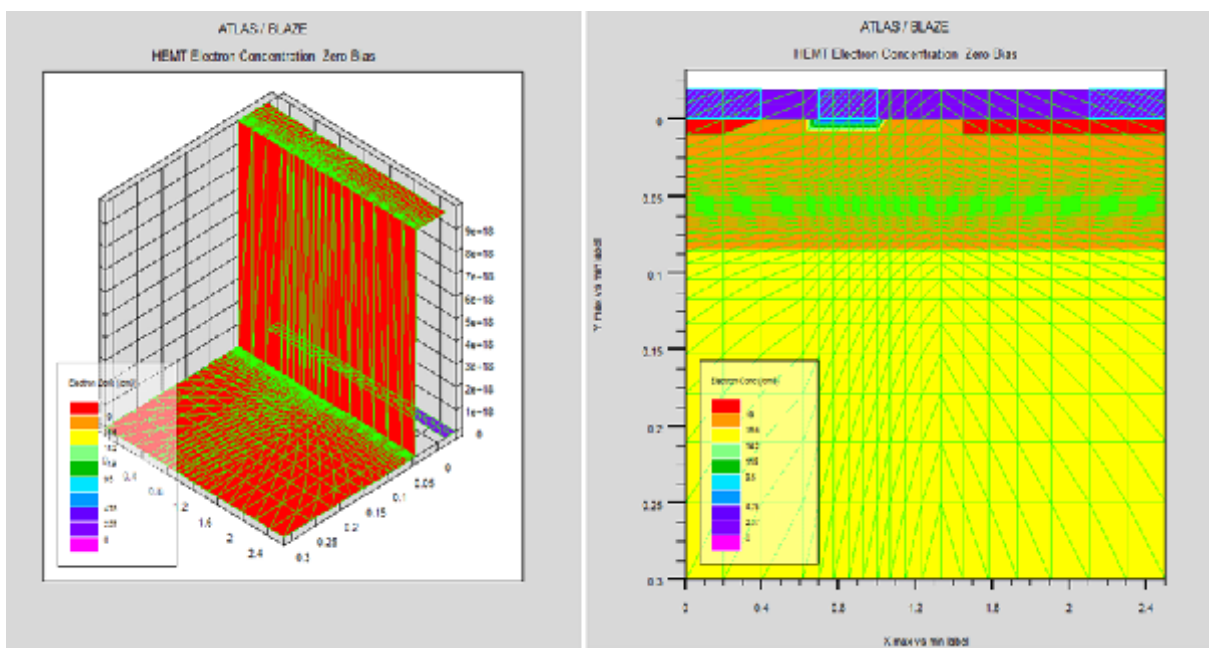


Figure III.II.2: La structure du HEMT $Al_{0.23}Ga_{0.77}As/GaAs$ simulé par Silvaco-ATLAS à gauche le chemin d'électron dans le canal de la structure et à droite la structure de maillage dans le HEMT.

III.II.3.1 Les caractéristiques électriques de l'AlGaAs/GaAs HEMT

Les caractéristiques de transfert du HEMT (I_{ds} - V_{ds}) sont illustrées par la figure III.II.3. Les caractéristiques courant- tension (I_{ds} - V_{ds}) est une figure de mérite principal de tous les composants électroniques d'où nous les ramenant un intérêt majeur afin de les explorer.

Il s'agit ici de calculer le courant I_{ds} circulant entre le Drain et la Source lorsque l'on fait croître la tension V_{ds} en maintenant la tension de commande Grille-Source V_{gs} à une valeur constante.

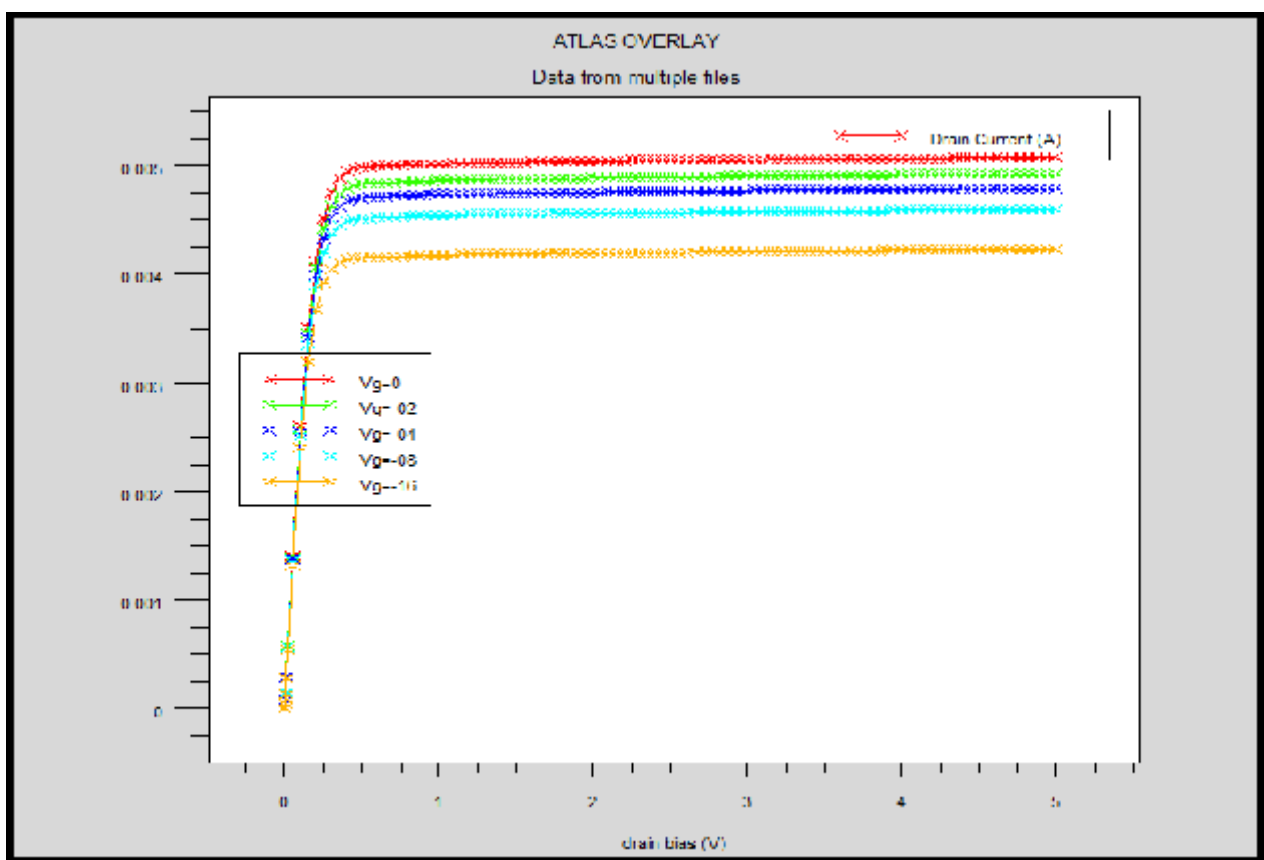


Figure III.II.3: Les caractéristiques courant de drain- tension de drain (I_{ds} - V_{ds}) pour les tensions de la grille-source allant de 0 Volt à -16 volt avec un pas de 0.2 Volt.

Sur ces courbes, deux régimes de fonctionnement sont observés :

* Le régime ohmique: le courant I_{ds} croît de façon linéaire en fonction des tensions V_{ds} et V_{gs} , plus la tension Drain-Source augmente et plus la mobilité des électrons dans le

canal augmente, induisant un accroissement du courant I_{ds} .

* Le régime de saturation: le courant I_{ds} est quasi-constant vis-à-vis de la tension Drain- Source mais croît avec la tension Grille-Source. Au-delà de la tension coude : les électrons du canal atteignent leur vitesse de saturation. En conséquence, le courant I_{ds} atteint un certain niveau de saturation pour une tension de commande donnée.

III.II.3.2 Fonction de transfert I_{ds} (V_{gs})

La caractéristique de transfert I_{ds} (V_{gs}) consiste à représenter le courant Drain-Source I_{ds} en fonction de la tension Grille-Source V_{gs} , pour une tension Drain-Source V_{ds} donnée. Il est possible de déterminer ainsi la tension de pincement V_{gs0} définie comme étant la tension de grille à appliquer, afin de vider le puits de potentiel de ses porteurs. On définit aussi la transconductance comme étant la pente de la caractéristique I_{ds} - V_{gs} . Toutes ces grandeurs sont illustrées par la figure III.II.4.

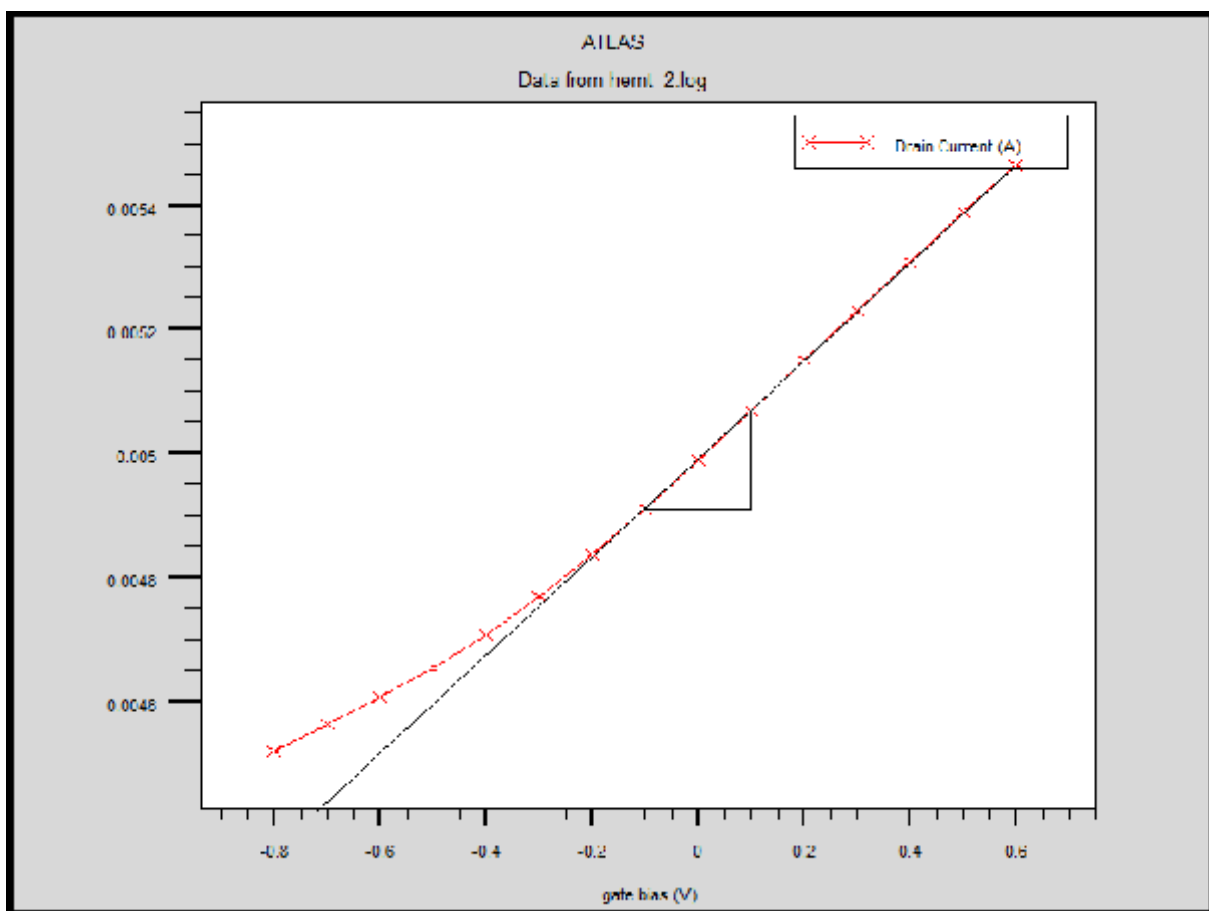


Figure III.II.4: La variation de courant du drain en fonction de la tension de la grille pour $V_{ds}=2V$

La transconductance est donnée par :

$$g_m = \frac{\Delta I_{ds}}{\Delta V_{gs}} = \frac{0.005065 - 0.004901}{0.1 - (-0.1)} \text{ mA/V}$$

$$g_m = 0.082 \text{ mA/V}$$

Le HEMT se distingue des autres transistors à effet de champ par sa transconductance élevée. La valeur que nous trouvons est parmi les meilleurs que nous avons trouvés dans la littérature GaAs.

III.II.4. Influence des propriétés physiques du matériau

III.II.4.1. L'effet de la fraction molaire sur les propriétés électriques du transistor HEMT

La caractéristique de transfert du transistor HEMT est représentée sur la figure III.II.5 à différentes fractions molaires d'Aluminium de la couche donneuse AlGaAs. Dans ce cas, nous fixons les paramètres de notre transistor HEMT AlGaAs/GaAs tels que la couche tampon GaAs non intentionnellement dopée, l'épaisseur de la couche donneuse AlGaAs est de 40nm et son dopage est de $2 \cdot 10^{18}$ atomes/cm⁻³. Puis nous faisons varier le taux d'aluminium de 0.1 à 0.4, pour tension Grille-Source V_{gs} nulle.

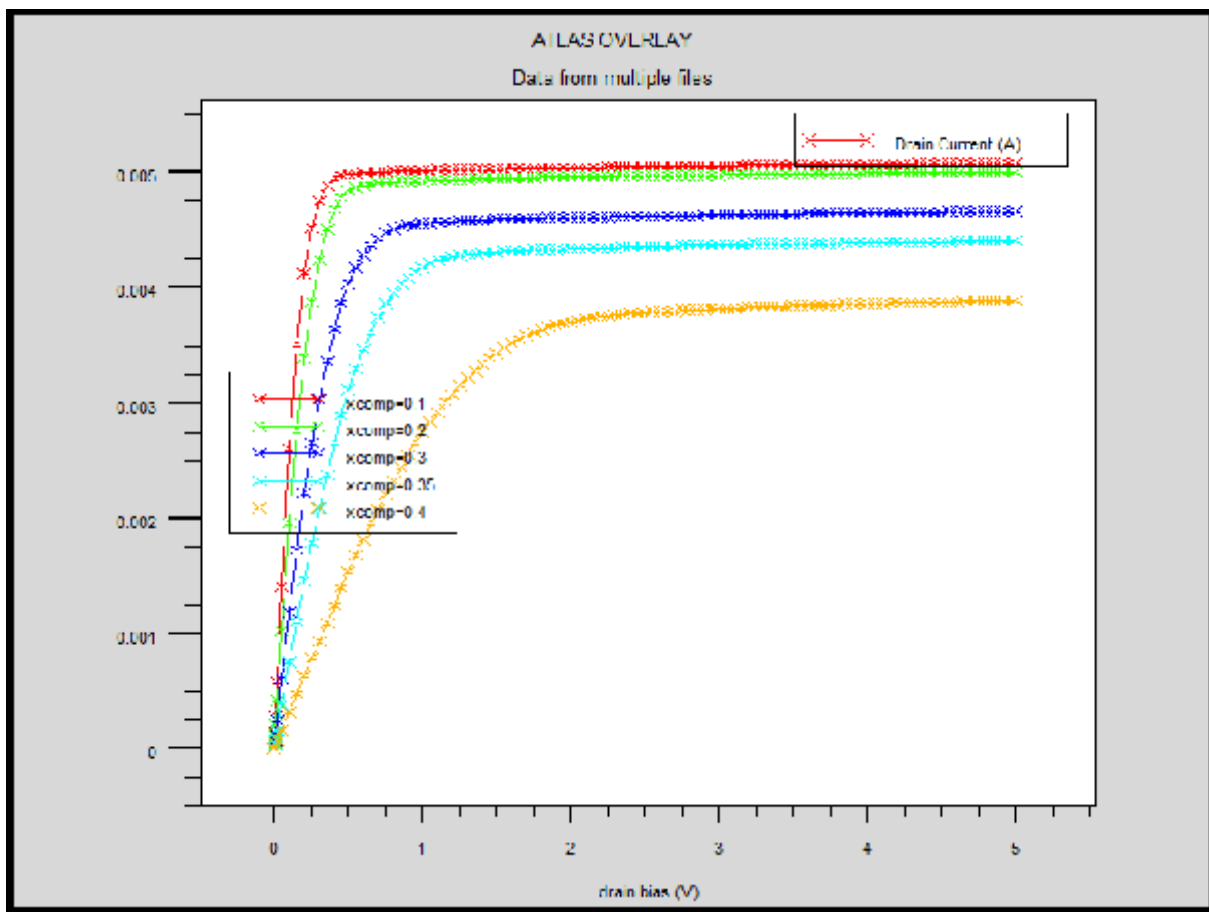


Figure III.II.5: L'influence de fraction molaire d'Aluminium sur la caractéristique de la Couche donneuse AlGaAs avec $X_{comp}=[0.1, 0.2, 0.3, 0.35, 0.4]$

Nous pouvons observer que le courant Drain-Source I_{ds} diminue avec l'augmentation de la fraction molaire (m) d'Al de la couche donneuse AlGaAs. Pour les taux d'aluminium de 0.1 et 0.2, on a pratiquement le même courant. Puis il chute pour des taux plus élevés. Ce comportement est dû l'augmentation des dislocations par l'introduction de l'aluminium, suite au désaccord de maille entre AlGaAs et GaAs avec forte discontinuité de la bande de conduction.

III.II.4.2 Variation des caractéristiques du transistor HEMT en fonction de la concentration du dopage (ND) de la couche donneuse AlGaAs

L'effet de la concentration du dopage de la couche donneuse AlGaAs sur la caractéristique de transfert du transistor HEMT est représenté sur la figure figure III.II.6.

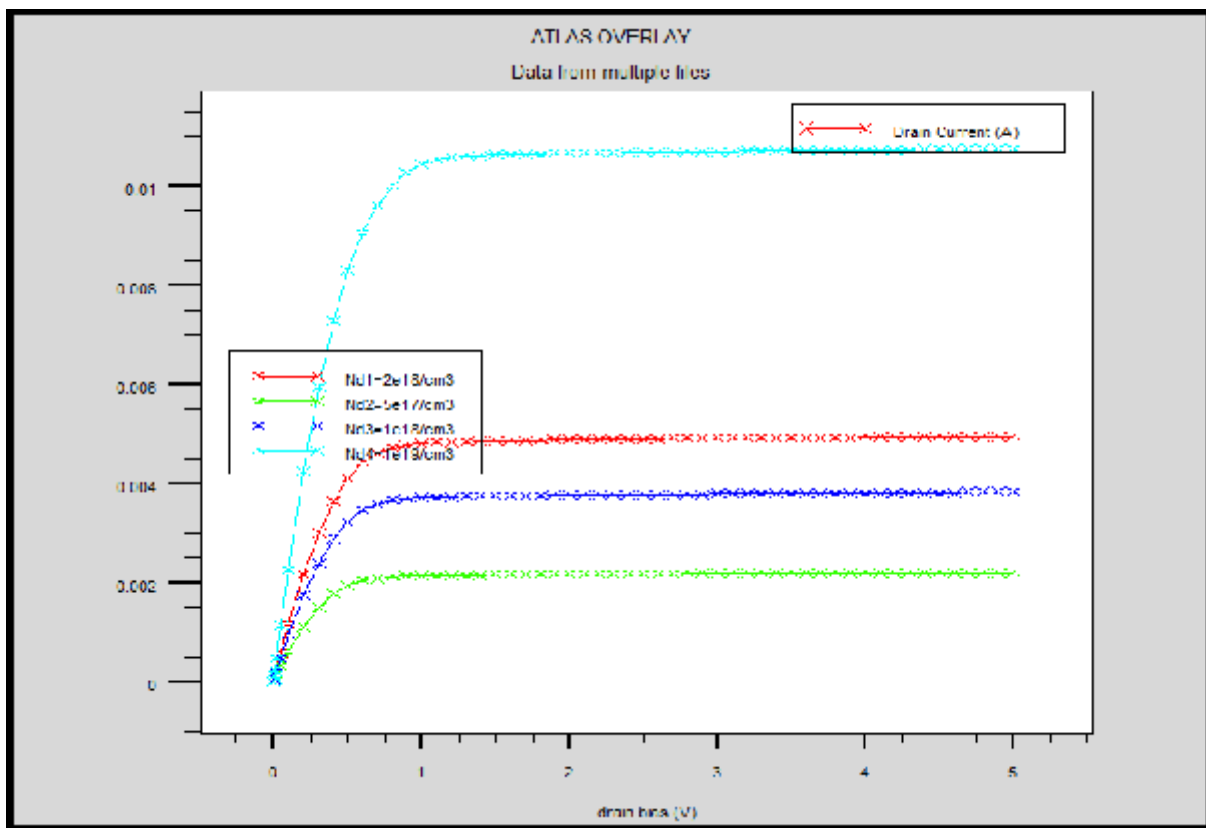


Figure III.II.6: Influence de la densité de dopage ND de la couche donneuse sur la caractéristique de transfert (I_{ds} - V_{ds}) de transistor AlGaAs/GaAs HEMT à tensions de la grille $V_{gs}=0V$.

On peut voir que le courant Drain-Source I_{ds} varie en fonction de la variation de dopage de la couche donneuse AlGaAs. Le courant I_{ds} max augmente quand le dopage augmente, à cause de la disponibilité d'un plus grand nombre d'électrons libres qui se confinent dans le puits de potentiel et forment le gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) dans le canal et par conséquent une amélioration des performances du dispositif .

III.II.5. L'influence de la technologie structurale sur les performances du transistor

Afin d'avoir une bonne transconductance et par conséquent une bonne performance du transistor HEMT à base d'hétérostructure AlGaAs/GaAs, il bien connu qu'on a deux solutions clés. Nous avons étudié le premier cas qui consiste à modéliser les propriétés physiques de la structure étudié. Et dans cette section, on va explorer la deuxième solution clé qui se manifeste principalement par la grille.

III.II.5.1 L'effet de la longueur de la grille sur les performances du HEMT

La technologie de la fabrication des hétérojonctions à évolué d'une façon impressionnante durant ces derniers décades. Certainement cela, à beaucoup aider l'évolution des performances des composants électroniques. Conséquemment, il est bien connu que la réduction de la longueur de la grille est une manière technologique très avantageés pour l'amélioration des paramètres de transistor et par suite affecte ces caractéristiques de sortie surtout dans le domaine de hautes fréquences.

La figure III.II.7 montre l'augmentation du courant de drain I_{ds} due à la réduction de la longueur de la grille. Il est bien remarquable que la réduction de la longueur de la grille augmente le courant du canal. Cela est principalement dû à l'augmentation du champ électrique latéral qui est inversement proportionnel à la longueur de la grille. Cette justifie significativement l' augmentation du courant de drain I_d due a la réduction de la longueur de la grille.

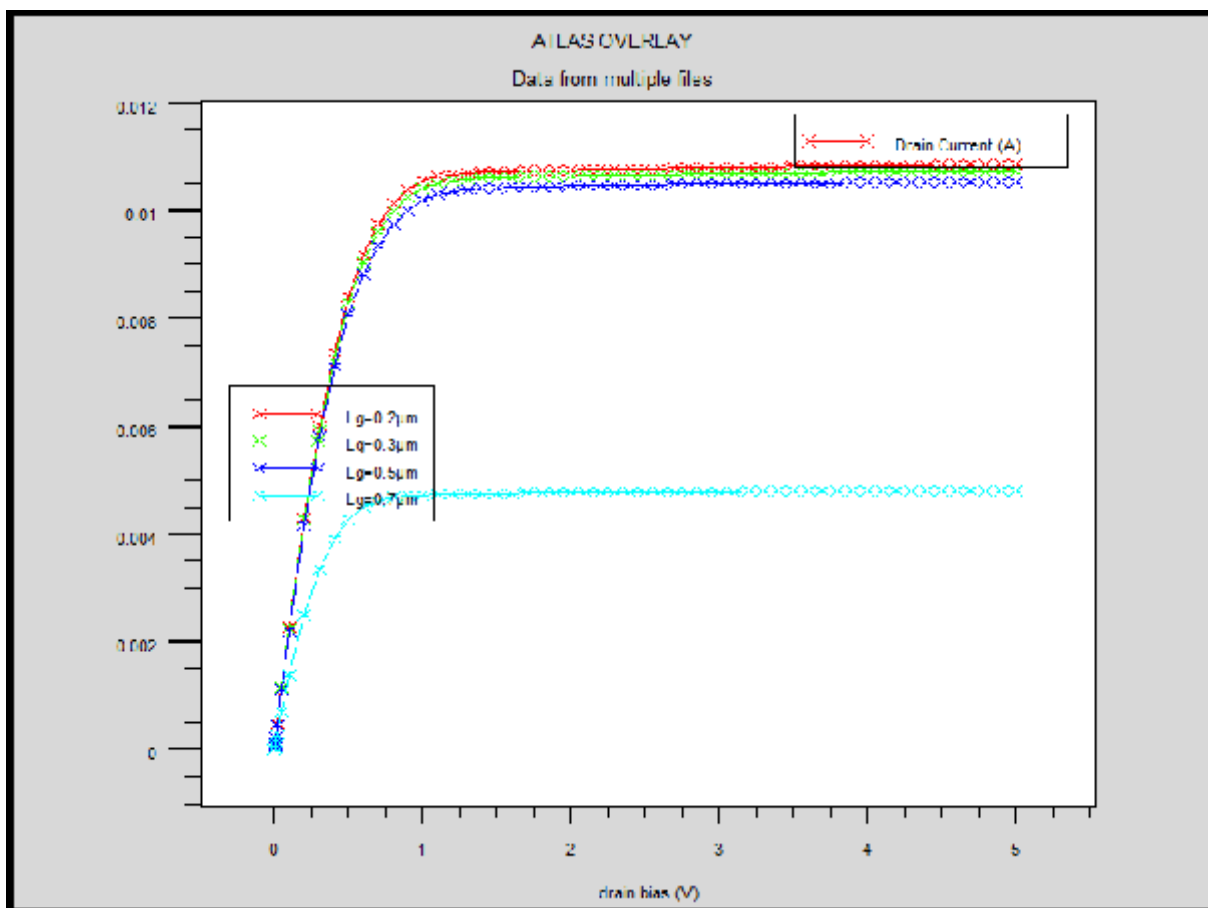


Figure III.II.7: L'effet de la longueur de la grille sur les performances du transistor pour différentes valeurs de L_g .

III.II.5.2 L'effet de la profondeur de la grille

La structure AlGaAs/GaAs HEMT étudié et simulé par Silvaco-Atlas pour une grille enfoncée dans la couche donneuse de profondeur de $0.1\mu\text{m}$ est représentée par la figure III.II.8.

La caractéristique de transfert du transistor pour différentes profondeurs de la grille est représentée par la figure III.II.9. Cette figure montre que le courant Drain-Source I_{ds} est amélioré de l'ordre de 45% avec l'augmentation de la profondeur de la grille. La grille est enfoncée dans la couche AlGaAs ce qui réduit l'épaisseur de cette dernière, et tant que la grille est proche du canal, elle acquit une meilleure capacité de contrôle d'électrons. Cependant, une profondeur plus élevée ($0.15\mu\text{m}$) de la grille dans la couche donneuse diminuât le courant Drain-Source I_{ds} , par la suite, une diminution des performances du HEMT. Donc on peut noter qu'il y a une valeur optimale du profondeur de la grille ($\sim 0.10\mu\text{m}$) dans de la couche de donneuse AlGaAs.

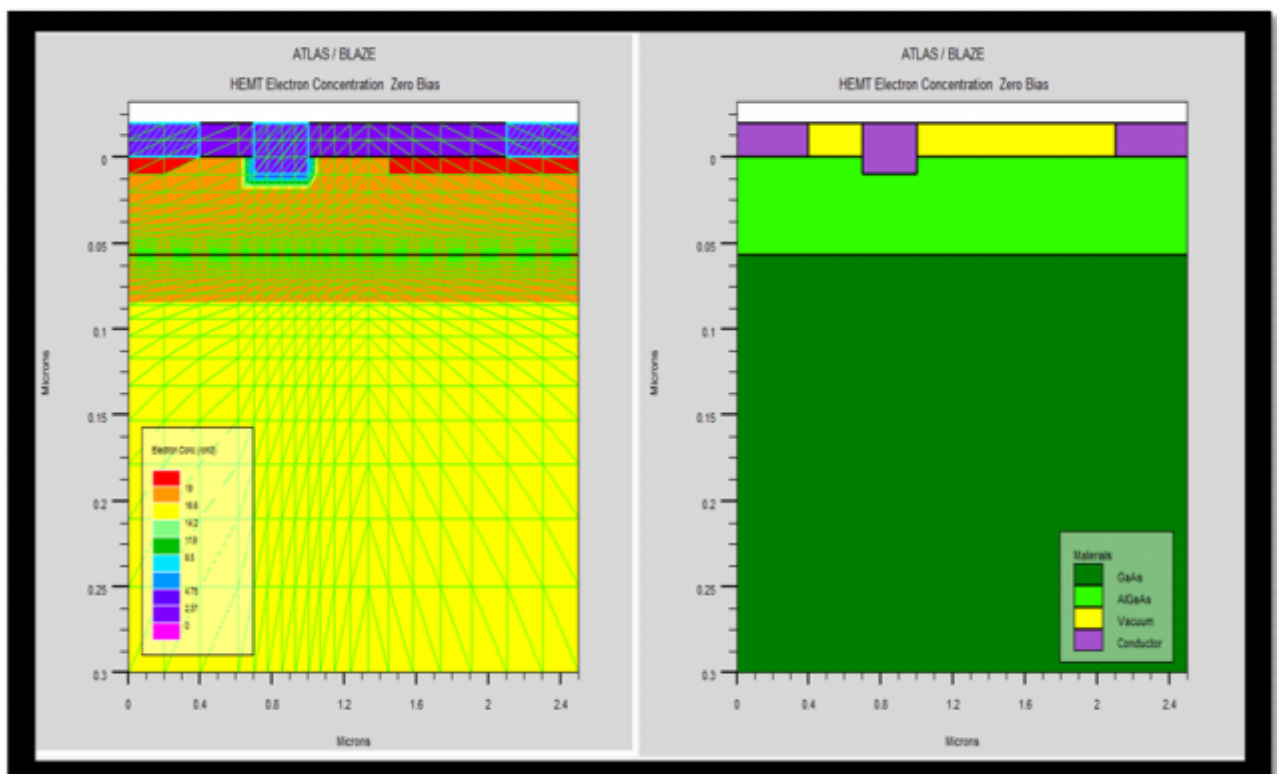


Figure III.II.8: La structure du HEMT $Al_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs$ simulé avec une profondeur de grille $P_g=0.01\mu\text{m}$.

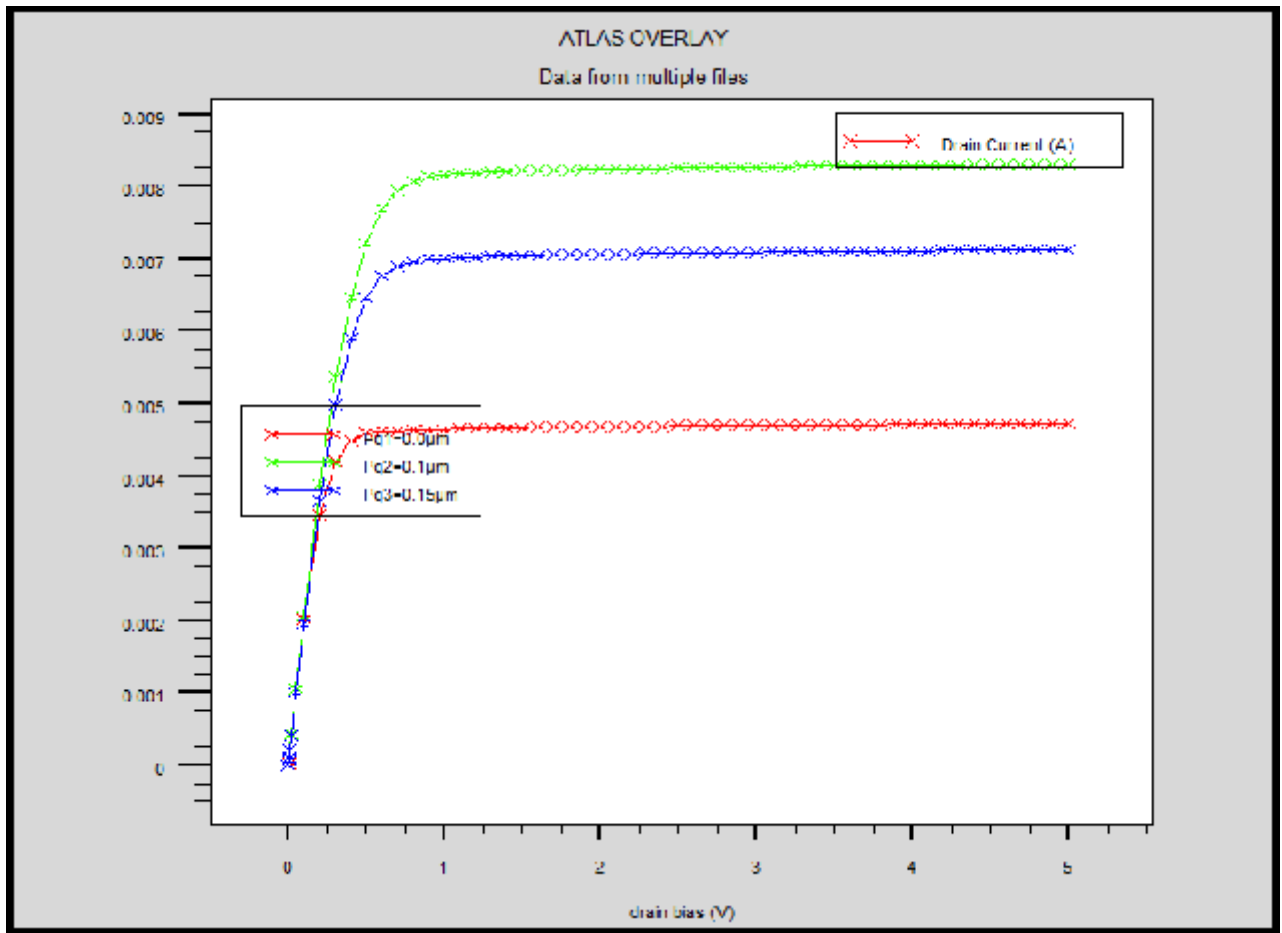


Figure III.II.9 : L'effet de la profondeur de la grille sur la caractéristique ($I_{ds} - V_{ds}$) du transistor AlGaAs/GaAs HEMT.

II.5.3 L'effet de la largeur de la région AlGaAs dopé (couche donneuse)

La dépendance de la caractéristique de transfert du transistor HEMT pour différentes valeurs de largeurs (épaisseurs) de la couche AlGaAs est montrée sur la figure III.II.10.

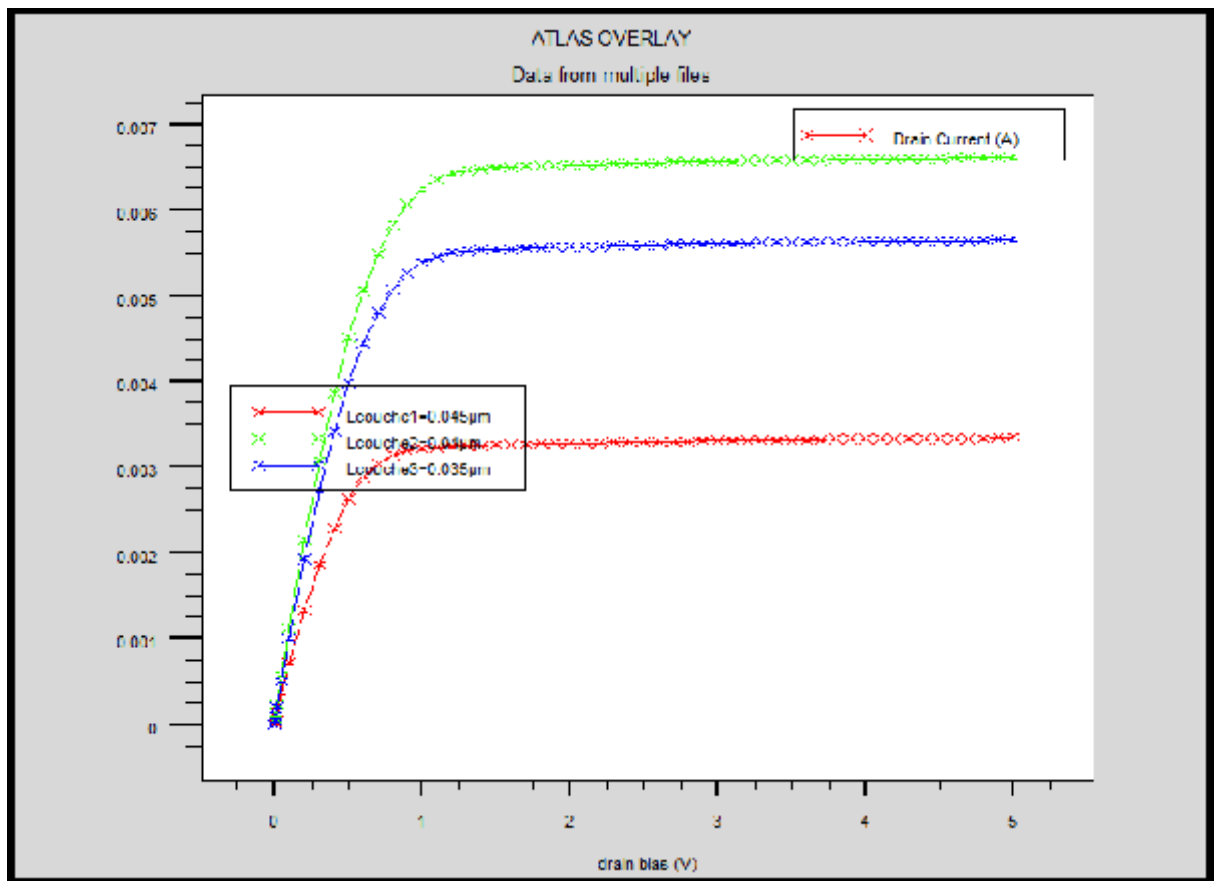


Figure III.II.10: L'effet de la largeur de région AlGaAs dopé, $d= 0.035 \mu\text{m}$, $0.040 \mu\text{m}$ et $0.045 \mu\text{m}$

Il est évident que l'épaisseur de la couche donneuse a également une influence importante sur les caractéristiques électriques du HEMT. Cette figure montre que le courant de Drain-Source I_{ds} est diminué de l'ordre de 50% avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche donneuse AlGaAs. Cependant, un épaisseur plus court de cette couche diminue a nouveau le courant de Drain-Source I_{ds} . Donc on peut noter qu'il y a une valeur optimale de la largeur de région AlGaAs (l'ordre de $0.040 \mu\text{m}$).

II.6 Conclusion

Dans cette partie de mémoire, les caractéristiques courant-tension et transconductance-tension du HEMT AlGaAs/GaAs ont été explorés durant notre simulation bidimensionnelle pour différents paramètres physiques (concentration du dopage de la couche donneuse AlGaAs ND et la fraction molaire d'Aluminium X) et ceux technologiques (longueur et profondeur de la grille avec la largeur de la région dopée).

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent bien que ces paramètres ont une forte influence sur les performances du transistor à effet de champ HEMT à base de GaAs. Ainsi, nous pourrions dire que le transistor HEMT AlGaAs/GaAs a été optimisé.

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle à la fois physique et électrique pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques.

Conclusion Général

Conclusion générale

Les semi-conducteurs sont devenus le support privilégié de l'information et de communication. Ils fondent les hétérojonctions telles que les transistors à effet de champ sont développés vers HEMT. Afin d'effectuer les meilleurs choix technologiques pour l'optimisation d'une hétéro-structure, il est nécessaire d'étudier les différents paramètres internes du transistor, tels que la configuration des contacts, les dopages dans les différentes couches, l'épaisseur de la couche donneuse AlGaAs et le taux d'Aluminium, sur les caractéristiques électriques afin d'obtenir un dispositif d'un bon fonctionnement.

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objet de prendre part à l'optimisation des paramètres qui contribuent à la caractérisation d'un gaz bidimensionnel d'électrons dans différentes hétérostructures à base de AlGaAs/GaAs. Nous avons utilisé le logiciel ATLAS-Silvaco afin de simuler les performances du transistor. La simulation est basée sur une modélisation physique bidimensionnelle qui tient en compte les équations physiques qui décrivent la population et le transport des porteurs à travers le volume du dispositif.

Les performances étudiées sont basées sur l'étude et la représentation des caractéristiques physique et technologique. L'effet de l'augmentation de la fraction molaire d'Aluminium a été étudié sur les caractéristiques courant- tension et transconductance G_m - V_{gs} . L'avantage de cette augmentation est limité pour cause d'introduire des pièges. L'influence de la concentration du dopage de la couche donneuse AlGaAs sur la caractéristique de transfert du transistor HEMT a été soigneusement étudié et que le courant Drain-Source I_{ds} max augmente avec l'augmentation du dopage, à cause de la disponibilité d'un plus grand nombre d'électrons libres qui se confinent dans le puits de potentiel et forment le gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) dans le canal.

La réduction de la longueur technologique de la grille est une manière technologique favorisée pour but d'améliorer les paramètres du transistor ainsi que ses performances. Elle commande directement le potentiel et par suite le champ latéral dans le canal et donc le courant. Ce paramètre (longueur de la grille) affecte bien le courant et la transconductance et par conséquent la fréquence de coupure. L'influence de la profondeur de l'enfoncement de la grille a été aussi exploré et que l'accroître offre une bonne maîtrise de commande pour la grille et par suite améliore les caractéristiques de transfert de l'hétérostructure HEMT de AlGaAs/GaAs.

Les résultats obtenus dans ce manuscrit montrent bien que ces paramètres ont une forte influence sur les performances du transistor à effet de champ HEMT à base de GaAs. Ainsi, nous pourrions dire que le transistor HEMT AlGaAs/GaAs a été optimisé. Ce travail ouvre sur plusieurs perspectives d'études complémentaires de caractérisations de la structure HEMT AlGaAs/GaAs, dans différentes topologies de la technologie HEMT, afin de pouvoir augmenter au maximum les performances en fréquences et en puissances.

ANNEXE

```
# Programme utilisé pour la simulation de notre structure HEMTAIGaAs/GaAs étudié
# SILVACO International
#
go atlas

# SECTION 1: Mesh input
#
mesh

x.meshloc=0.0 spac=0.2
x.meshloc=0.4 spac=0.2
x.meshloc=0.7 spac=0.07
x.meshloc=1 spac=0.07
x.meshloc=2.1 spac=0.2
x.meshloc=2.5 spac=0.2

y.meshloc=-0.02 spac=0.01
y.meshloc=0.0 spac=0.01
y.meshloc=0.055 spac=0.001
y.meshloc=0.058 spac=0.001
y.meshloc=0.3 spac=0.05

#
# SECTION 2: Structure Specification
#
regionnum=1 material=GaAs y.min=0.055 y.max=0.3
regionnum=2 material=AlGaAs y.min=0 y.max=0.055 x.composition=0.1
grad.3=0.002
regionnum=3 material=vacuum y.min=-0.2 y.max=0 x.min=0.4 x.max=0.7
regionnum=4 material=vacuum y.min=-0.2 y.max=0 x.min=1 x.max=2.1
#
elecnum=1 name=source x.min=0.0 x.max=0.4 y.min=-0.02 y.max=0
elecnum=2 name=gatex x.min=0.7 x.max=1 y.min=-0.02 y.max=0
elecnum=3 name=drain x.min=2.1 x.max=2.5 y.min=-0.02 y.max=0
#
dopinguniformy.max=0.0530 n.typeconc=2.e18
dopinguniformy.min=0.0530 n.typeconc=1.e15
#
# SECTION 3: MaterialModels
#
material taun0=1.e-9 taup0=1.e-9
materialalign=0.6
#
modelbgnfldmobsrh
#
contactname=gateworkfun=4.87
#
# SECTION 4: Initial solution
```

Initial solution

**solveinit
saveoutf=hemt_1.str
tonyplot hemt_1.str -set str_hemt_1.set**

outputcon.bandval.bandflowlines

Apply a set of biases at the gate and save solutions

**solvevgate=-0.2 outf=hemt_0.bin
solvevgate=0 outf=hemt-02.bin
solvevgate=0.4 outf=hemt-04.bin
solvevgate=0.8 outf=hemt-08.bin
solvevgate=1 outf=hemt-16.bin**

Calculate ID-VD characteristic at $V_G = 0$

**loadinf=hemt_0.bin
log outf=hemt_0.log
solveoutf=hemt_0.str master
solvevdrain=0.02
solvevdrain=0.05
solvevdrain=0.1 vstep=0.05 vfinal=5.0 name=drain
saveoutf=hemt_0_A.str master**

Calculate ID-VD characteristic at $V_G=-0.2$

**loadinf=hemt-02.bin
log outf=hemt-02.log
solveoutf=hemt-02.str master
solvevdrain=0.02
solvevdrain=0.05
solvevdrain=0.1 vstep=0.05 vfinal=5.0 name=drain
saveoutf=hemt-02_A.str master**

Calculate ID-VD characteristic at $V_G=-0.4$

**loadinf=hemt-04.bin
log outf=hemt-04.log
solveoutf=hemt-04.str master
solvevdrain=0.02
solvevdrain=0.05
solvevdrain=0.1 vstep=0.05 vfinal=5.0 name=drain
saveoutf=hemt-04_A.str master**

Calculate ID-VD characteristic at $V_G=-0.8$

loadinf=hemt-08.bin

```
log outf=hemt-08.log
solveoutf=hemt-08.str master
solvevdrain=0.02
solvevdrain=0.05
solvevdrain=0.1 vstep=0.05 vfinal=5.0 name=drain
saveoutf=hemt-08_A.str master
```

```
# Calculate ID-VD characteristic at VG=-1.6
```

```
loadinf=hemt-16.bin
log outf=hemt-16.log
solveoutf=hemt-16.str master
solvevdrain=0.02
solvevdrain=0.05
solvevdrain=0.1 vstep=0.05 vfinal=5.0 name=drain
saveoutf=hemt-16_A.str master
```

```
# Id-Vg calculation
```

```
log off
solveinit
methodgummel newton trapitlim=35 maxtrap=6 vsatmod.inc=0.01 carriers=1 elect
solvevgate=-0.9 vdrain=0
solvevdrain=0.1 vstep=0.1 name=drain vfinal=0.5
#
log outf=hemt_2.log master
method newton trapitlim=35 maxtrap=6 carriers=1 elect
solvevgate=-0.8 vstep=0.1 name=gatevfinal=0.6
saveoutf=hemt_2.str
#####
#####
# Plot ID-VD characteristics
tonyplot -overlay hemt_0.log hemt-02.log hemt-04.log hemt-08.log hemt-16.log -set
IdVd_grph_hemt.set
```

```
# Plot ID-VG characteristic
tonyplot hemt_2.log -set IdVg_grph_hemt.set
```

```
quit
```

Bibliographie :

- [1] Jessica Bolinsson, Philippe Caroff, Bernhard Mandl, Kimberly A Dick, « Wurtzite–zincblendesuperlattices in InAsnanowiresusing a supply interruption method », Nanotechnology, vol. 22, no 26, 2011
- [2] électrons sur les propriétés optiques et de transport électrique du GaAs", (M. Sc), Université de Sherbrooke, (juillet 1993).
- [3] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Sherly, N.G.Weimann, K.Chu, M. Murphy, W.J. Schaff, et L.F. Eastman, Twodimensionalelectrongasesinduced by spontaneous and piezoelectricPolarization charges in N- and Ga-face AlGaN/GaNheterostructures. Journal of appliedPhysics, (1999),
- [4] M. Spiesser, Jan Czochralski et la méthode du tirage des cristaux. Bulletin GFCC (Mai 1999).
- [6] N. Zhang " High voltage GaNHEMTswithlowon-resistance for switching applications" Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering, University of California Santa Barbara, September 2002
- [7] A.Aleksov,J.Gobien,X.Li,J.Prater and Z.Sitar, "Silicon-on-Diamond-An engineeredsubstrate for electronic applications" Diamond and RelatedMaterials, vol.15, pp. 248 -253, 2006
- [8] Brevet US 1745175 "Method and apparatus for controllingelectriccurrent", brevet d'abord déposé au Canada le22 octobre 1925 et décrivant un matériel analogue à un MESFET.
- [9] Brevet GB 439457 "Improvements in or relating to electricalamplifiers and other control arrangements and devices" d'abord déposé en Allemagne le 2 mars 1934
- [10]http://ressources.univlemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/cours_elec/jfet.2014
- [11] M. Spiesser, Jan Czochralski et la méthode du tirage des cristaux. Bulletin GFCC (Mai 1999).
- [12] M. Maher Soueidan "Croissance hétéroépitaxiale du SiC-3C sur substrats SiC hexagonaux; Analyses par faisceaux d'ions accélérés des impuretés incorporées" thèse doctoral décembre 2006.
- [13] Dr KADDECHE MOURAD theme de doctorat (MODELISATION ET ANALYSE DE L'EFFET DU FIELD PLATE AVEC COUCHE DIELECTRIQUE HIGH- K SUR LES PROPRIETES ELECTRIQUES DES HEMTS $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$) l'année 2014

- [14] Pascal Turban "Epitaxie de films minces métalliques : (i) Relaxation élastique pendant la croissance pseudomorphe (ii) Epitaxie d'hétérostructures NiMnSb/MgO/NiMnSb pour l'électronique de spin" these doctoral 18 juin 2001.
- [15] Noura A. Abdeslam " transistor en GaAs " mémoire magister 2004.
- [16] Silvaco International,
http://www.silvaco.com/products/device_simulation/atlas.html.
- [17] Atlas User's Manual, Silvaco International, 2010.
- [18] W. Shockley « A unipolar field effect transistor », Proc IEEE, Vol 40, 1952.
- [19] M. Kotha, Optically triggered thyristor for capacitor discharge applications, memoir de Master, University of Missouri-Columbia, 2007.

Résumé

Dans ce travail, nous avons mené une étude des caractéristiques de transfert DC et RF d'un transistor à effet de champ AlGaAs/GaAs HEMT. Nous exposons les résultats de la simulation numérique bidimensionnelle sous l'influence de différents paramètres technologiques tels que longueur et enfoncement de la grille. Aussi sous l'effet des propriétés de matériau autant que le dopage du canal et la fraction molaire d'Aluminium dans l'alliage AlGaAs. La simulation de la structure est faite en utilisant le logiciel SILVACO ATLAS. L'étude a permis d'évaluer les relations entre les paramètres de sortie de transistor et ceux de la physique de l'hétérojonction., cela est dû à la diminution de la densité n_s (2DEG). L'efficacité du transfert des électrons à partir de la couche delta-dopée (n_s) dans le canal AlGaAs offre une meilleure capacité de commande d'électrons par la grille. Cependant le fait de croître la densité de dopage (n_s) améliore la caractéristique de transfert (I_{ds} - V_{ds}) et la transconductance en fonction de la tension grille. La réduction de la longueur de grille et la modération de l'enfoncement de cette électrode jouent un rôle propice en amélioration des performances de transistor à effet de champ. Les résultats obtenus ont été présentés, discutés et sont affirmés avec ceux de l'expérience existant dans la littérature.

Mots clés: HEMT, AlGaAs/GaAs, gaz 2DEG, transconductance, Simulation, Silvaco-Mercury.

ABSTRACT

In this manuscript, we carried out a study of the DC and RF transfer characteristics of a field effect transistor AlGaAs/GaAs HEMT. We present the results of two-dimensional numerical simulation for various technological parameters such as length and recess of the gate. Also under the effect of material properties as the channel doping and the mole fraction of Aluminum in AlGaAs alloy. The simulation of the structure is done using the TCAD (Technical computer Aided Design) software Silvaco -Mercury. The study assessed the relationship between the transistor output parameters and those of the physics of the heterojunction. Increasing the mole fraction of Aluminum clearly decreased the current I_{ds} and the maximum of transconductance G_{mmax} , this is mainly due to the density reducing n_s (2DEG). The efficiency of electron transfer from the delta-doped layer (n_s) in the AlGaAs channel provides a greater ability to the gate control electron. However the fact of

increasing the doping density (n_s) improves the transfer characteristics (I_{ds} - V_{ds}) and the transconductance versus the gate voltage. The reduction of the gate length and the moderation of the recess of the electrode play a suitable role in improving the performance of the field effect transistor. The results were presented, discussed and are affirmed with those of the existing experience in the literature.

Key Words: HEMT, AlGaAs/GaAs, gas 2DEG, transconductance, Simulation, Silvaco-Mercury