

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE  
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

## **MEMOIRE DE MASTER**

DOMAINE : SCEANCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : MICROELECTRONIQUE

### **Thème**

*ETUDE DES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES I(V)  
DU TRANSISTOR MESFET A BASE DE GaAs*

**PRESENTE PAR :**

SAOUDI Amel

BENKHARIF Halima

**ENCADRE PAR :**

M<sup>me</sup> CHABANE Rayene

N° D'ORDRE : 2019/ ../...

Promotion : Juin 2019

# Résumé

Cette étude a pour objectif de simuler des transistors à effet de champ à barrière Schottky à base d'arséniure de gallium dit MESFET GaAs. Après avoir rappelé brièvement les généralités de ces transistors, les propriétés physiques de la diode Schottky et du semi-conducteur GaAs, nous avons présenté la structure et le principe de fonctionnement des composants à effet de champ à base de GaAs, tels que : JFET, MOSFET, MESFET et leur dérivé HEMT.

Par la suite, l'étude des propriétés statiques du composant MESFET nous a conduit à définir le système d'équations générales régissant le comportement de ce composant, ainsi que l'effet de la mobilité et de la vitesse des électrons en fonction du champ électrique.

**Mots clés :** Schottky, MESFET GaAs, JFET, MOSFET, MESFET, HEMT

# Abstract

This study aims to simulate field-effect transistors to Schottky barrier based on arseniure of gallium says MESFET GaAs. After having briefly pointed out the general information of these transistors, the physical properties of the Schottky diode and GaAs semiconductor, we presented the structure and the principle of operation of the component at field effect containing GaAs, such as: JFET, MOSFET, MESFET and their derivative HEMT.

Thereafter, the study of the static properties of component MESFET led us to define the system of general equations governing the behavior of this component, as well as the effect of the mobility and the speed of the electrons according to the electric field.

**Keywords:** Schottky barrier, MESFET GaAs, JFET, MOSFET, MESFET, HEMT

# ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى محاكاة ترانزستورات و التأثير الميداني على حاجز شوتكي القائم على ترسانة من الغاليوم

## MESFET GaAs

وفقاً لما ذكرته

بعد أن أوضحت باختصار المعلومات العامة لهذه الترانزستورات ، والخصائص الفيزيائية لثنائي شوتكي وأشباه الموصلات GaAs ، قدمنا هيكل ومبدأ تشغيل مكون التأثير الميداني الذي يحتوي على GaAs.

بعد ذلك ، سيتم استخدام دراسة الخواص الساكنة لورم الظاهرة المتوسطة لتحديد نظام المعادلات العامة التي تحكم سلوك هذا المكون ، وكذلك تأثير الحركة وسرعة الإلكترونات وفقاً للحقل الكهربائي

كلمات البحث:

HEM ، MESFET ، MOSFET ، JFET ، MESFET GaAs ، Schottky حاجز

# REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions **ALLAH**, notre créateur qui nous a donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur **M<sup>me</sup>CHABANE Rayene** qui a proposé le thème de ce mémoire, et pour ses conseils du début à la fin de ce travail.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui nous ont fait l'honneur d'accepter de participer à notre jury de soutenance.

Un grand merci à l'ensemble des enseignants qui nous ont suivis durant notre cycle d'études.

Enfin, nous réitérons nos vifs remerciements à tous ceux ou celles qui nous ont apporté tout soutien.

**SAOUDI AMEL**

**BENKHARIF HALIMA**

# Dédicaces

C'est grâce à Allah seul que j'ai pu achever ce travail.

Je le dédie à :

Ma très Chère Mère, qui a toujours été présente pour moi, dans les moments les plus difficiles et qui sans cesse veille sur moi avec ses prières, pour ses grands sacrifices et tout l'amour qu'elle me porte.

Mon très Cher Père, pour tous ses conseils et pour toute la confiance qu'il a mis en moi et pour son dévouement pour mon bonheur, que Dieu me le garde.

Mes chers Frères: Lhadj, Khalil, Mounir et Mouhamed

Mes chères Sœurs : Siham et Fatima .

Mon Cher: Aymen

Tous mes amis(es), amis de scouts et collègues...

Mon binôme SAOUDI Amel et toute sa famille.

**BENKHARIF HALIMA**

# Dédicaces

C'est grâce à Allah seul que j'ai pu achever ce travail.

Je le dédie à :

Ma très Chère Mère, qui a toujours été présente pour moi,

dans les moments les plus difficiles et qui sans cesse veille sur moi avec ses prières, pour ses  
grands sacrifices et tout l'amour qu'elle me porte.

Mon très Cher Père, pour tous ses conseils et pour toute la confiance qu'il a mis en moi et pour  
son dévouement pour mon bonheur.

Que dieu me le garde.

Mes chers Frères : Oussama et Aymen .

Ma chères Sœurs : Ikram, Zineb et Inass .

Tous mes amis(es), amis de scouts et collègues...

Mon binôme BENKHARIF Halima et toute sa famille.

**SAUDI AMEL**

# Sommaire

<u>Liste des figures</u> .....	I
<u>Liste des tableaux</u> .....	III
<u>Liste des notations</u> .....	III
<u>INTRODUCTION GENERALE</u> .....	1
<u>CHAPITRE I</u> .....	3
<u>Généralité sur les transistors à effet de champ</u> .....	3
<u>I. 1. Introduction</u> .....	3
<u>I. 2. Les transistors à effet de champ</u> .....	3
<u>I. 2. 1. Définition</u> .....	3
<u>I.2. 2.Le transistor à effet de champ à jonction (JFET)</u> .....	4
<u>I. 2. 3. Principe de fonctionnement du JFET</u> .....	5
<u>I. 3. Les différents transistors à effet de champ</u> .....	5
<u>I. 3. 1. LE MESFET</u> .....	6
<u>I. 3. 2.LE MOSFET</u> .....	7
<u>I. 3. 3.LE HEMT</u> .....	8
<u>I. 4.L'arséniure de gallium GaAs</u> .....	9
<u>I. 4. 1. Définition :</u> .....	9
<u>I. 4. 2. Structure de bande</u> .....	9
<u>I. 4. 3.Applications</u> .....	10
<u>I. 4. 4.Avantages et Inconvénients du GaAs</u> .....	11
<u>I. 5. Conclusion</u> .....	12
<u>CHAPITRE II</u> .....	14
<u>Le Transistor MESFET à base de GaAs</u> .....	14
<u>II. 1.Introduction</u> .....	14
<u>II. 2. Les matériaux III-V</u> .....	14
<u>II. 3. Structure cristalline des matériaux III-V</u> .....	15
<u>II. 4. Le Transistor MESFET</u> .....	15
<u>II. 4. 1. Structure du MESFET GaAs :</u> .....	15
<u>II. 4. 2. Le principe de base du MESFET</u> .....	17
<u>II. 4. 3. Principe de fonctionnement du MESFET</u> .....	18

<u>a. Zone de fonctionnement linéaire (<math>V_{ds} \ll V_{dsat}</math>)</u> .....	18
<u>b. Zone de fonctionnement saturé</u> .....	18
<u>c. Régime de pincement (<math>V_{ds} \leq V_{dsat}</math>)</u> .....	18
<u>II. 4. Contact métal-semi-conducteur</u> .....	20
<u>II. 4. 1. Diagramme des bandes d'énergie</u> .....	20
<u>a. Le travail de sortie du métal (<math>e\phi_m</math>)</u> .....	20
<u>b. L'affinité électronique du semi-conducteur (<math>e\chi</math>)</u> .....	20
<u>c. Barrière de potentiel Schottky</u> .....	21
<u>II. 4. 2. Contact redresseur</u> .....	21
<u>II. 4. 3. Contact Ohmique</u> .....	22
<u>II. 5. Equations fonctionnelles du MESFET</u> .....	23
<u>II. 5. 1. Équations fonctionnelles du MESFET intrinsèque à canal non uniformément dopé : (cas du MESFET à canal implanté)</u> .....	23
<u>II. 5. 2. Calcul du potentiel et du champ électrique</u> .....	24
<u>II. 5. 3. Courant de drain dans le canal</u> .....	27
<u>II. 6. Effet de la loi de mobilité</u> .....	29
<u>II. 7. Conclusion</u> .....	31
<u>CHAPITRE III</u> .....	33
<u>Résultats et discussions</u> .....	33
<u>III. 1. Introduction</u> .....	33
<u>III. 2. Logiciel de Simulation</u> .....	33
<u>III. 3. Résultats et discussions</u> .....	33
<u>III. 3. 1. Caractéristiques courant-tension <math>I_{ds} = f(V_{ds})</math>, pour différentes valeurs de <math>V_{gs}</math></u> .....	33
<u>III. 3. 2. Description</u> .....	37
<u>a. Zone linéaire</u> .....	37
<u>b. Zone de pincement</u> .....	37
<u>c. Zone de saturation</u> .....	37
<u>III. 3. 3. Caractéristiques électrique <math>I_{ds} = f(V_{gs})</math>, pour différentes valeurs de <math>V_{ds}</math></u> .....	37
<u>III. 4. Caractéristique de la vitesse des porteurs en fonction du champ électrique</u> .....	38
<u>III. 4. 1. Variation de la mobilité en fonction du champ électrique <math>E</math></u> .....	39
<u>III. 4. 2. Variation de la vitesse en fonction du champ électrique <math>E</math></u> .....	40
<u>III. 5 Conclusion</u> .....	41

# Liste des figures

---

<i>Figure (I.1) : Les différents transistors à effet de champ .....</i>	<i>4</i>
<i>Figure (I.2) : La structure de JFET .....</i>	<i>5</i>
<i>Figure (I.3) : Technologie MESFET.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure (I.4) : Technologie MOSFET.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure (I.5) :Technologie HEMT.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure(I.6) :Maille primitive du réseau cristallin GaAs.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure(I.7) :Structure de bande d'énergie de GaAs dans les directions de haute symétrie.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure(II-8) :mailles cristallographiques des structures Diamant et Zinc Blende.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure(II-9) : structure du MESFET à base de GaAs.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure(II-10) :la structure de MESFET et l'emplacement des sources de polarisation.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure(II-11) : Réseau de caractéristiques de sortie d'un MESFET.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure(II-12) :Principe de fonctionnement du MESFET.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure(II-13) :Les niveaux d'énergie du métal et du semi-conducteur .....</i>	<i>20</i>
<i>Figure(II-14) :Les niveaux d'énergie de la jonction métal semi-conducteur <math>\phi_m \geq \phi_s</math> (Vd: tension de diffusion).....</i>	<i>21</i>

<i>Figure(II-15) :Niveau d'énergie lorsque <math>\Phi_m \leq \Phi_s</math> (<math>V_d</math>: tension de diffusion).....</i>	<i>22</i>
<i>Figure(II-16) :Zone active du transistor MESFET.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure(III-17) : Caractéristique I-V à mobilité constant.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure(III-18) : Caractéristique I-V à mobilité variable (pour <math>\mu_1</math>).....</i>	<i>35</i>
<i>Figure(III-19) : Caractéristique I-V à mobilité variable (pour <math>\mu_2</math>).....</i>	<i>35</i>
<i>Figure(III-20) :Réseau de caractéristique I-V pour les mobilités <math>\mu_1, \mu_n, \mu_2</math>.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure(III-21) : Caractéristique I-V ,<math>I_{ds}</math> en fonction de <math>V_{gs}</math>(pour mobilité <math>\mu_n</math>) .....</i>	<i>38</i>
<i>Figure(III-22) : Variation de la mobilité fonction du champ électrique.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure(III-23) : Variation de la vitesse en fonction du champ électrique .....</i>	<i>40</i>

## Liste des tableaux

---

<i>Tableau (I -1) : Propriétés du GaAs à 300K° .....</i>	<i>11</i>
<i>Tableau (II -2) : Propriétés des principaux composés binaires III-V à 300 K.....</i>	<i>14</i>
<i>Tableau (III -3) : paramètres de MESFET.....</i>	<i>34</i>

# Liste des notations

$Q$	$C$	Valeur absolue de la charge de l'électron ( $q=1.6\times 10^{-19}$ C)
$K$	$J.K$	Constante de Boltzmann
$Nd$	$m^{-3}$	La concentration de dopage
$A$	$\mu m$	L'épaisseur
$Z$	$\mu m$	Largeur de grille
$L$	$\mu m$	La longueur de grille
$\mu n$	$m^2v^{-1}s^{-1}$	une mobilité constante
$Vs$	$ms^{-1}$	La vitesse de saturation
$E$	$F/M$	Permittivité électrique du semi-conducteur
$Rs$	$\Omega$	La résistance parasite de source
$Rd$	$\Omega$	La Résistance du drain
$E$	$V/m$	Le champ électrique
$Ec$		Energie cinétique
$Vp$	$V$	la tension de pincement
$IP$	$A$	le courant de pincement
$Vd$	$V$	la tension du drain
$Vg$	$A$	La tension de grille
$Vdsat$	$V$	La tension du drain saturation
$Id$	$A$	Le courant du drain

# INTROUCTION GENERALE

Le développement rapide de divers systèmes de communication leur a permis d'accéder à des moyens plus modernes. Les applications de ces dispositifs comprenaient des applications civiles telles que les téléphones mobiles et la transmission de diverses données, qui se développaient rapidement en raison de la précision de leurs technologies et de la rapidité de leur mise en œuvre. Il existe également des applications militaires telles que les radars, qui ont évolué en raison de la possibilité de transférer une grande quantité d'informations à ces systèmes en moins de temps. De temps en temps, Transistor utilisait l'effet GaAs MESFET dans les systèmes de communication, car il convient aux applications de commutation et hyperfréquences en raison de l'augmentation de la puissance et de la vitesse de commutation. Dans le premier chapitre, nous discutons de la généralisation du transistor avec sa dérivation. Le deuxième chapitre vise à détailler l'effet du MESFET sur GaAs.

Au chapitre 3, nous utilisons les équations du deuxième chapitre et le programme approprié pour présenter les résultats des différentes variables. Il y aura également une conclusion générale à tous les travaux.

*Chapitre I*

***Généralités sur les transistors à effet de  
champ***

# CHAPITRE I

## Généralité sur les transistors à effet de champ

### I. 1. Introduction

Les transistors constituent sans doute la plus large part de l'activité microélectronique moderne. Dans ce secteur, un très large effort s'est concentré sur les composants unipolaires, ce sont les composants qui ne reposent que sur le transport d'un seul type de porteurs. Ces composants incluent les transistors à effet de champ sous leurs différentes formes, JFET, MOSFET, MESFET.

L'objectif est de présenter les différents transistors à effet de champ utilisés dans des conceptions hyperfréquences. Tout d'abord, nous proposerons une description géométrique et physique des transistors les plus utilisés actuellement. Nous présenterons donc successivement les JFET, MOSFET, MESFET et leurs dérivés les HEMT.

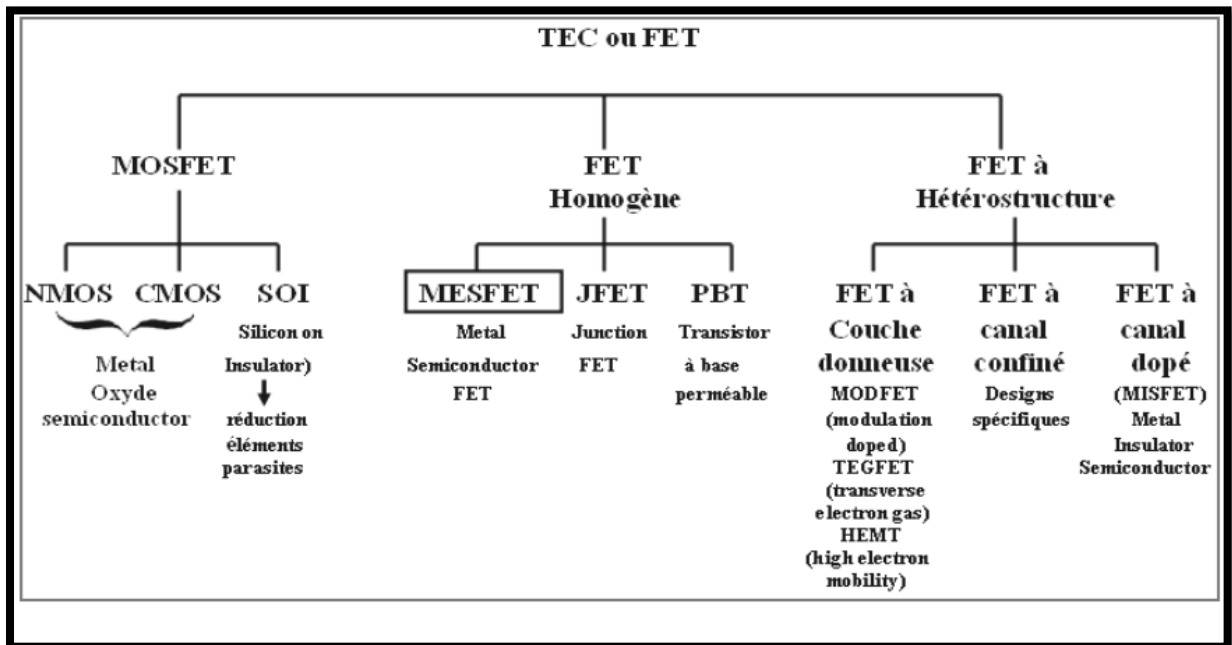
### I. 2. Les transistors à effet de champ

#### I. 2. 1. Définition

Le transistor à effet de champ dénommé FET ou TEC repose sur le fonctionnement d'un Dispositif semi-conducteur unipolaire, c'est-à-dire. Qu'un seul type de porteur intervient. Ainsi, pour une utilisation aux hautes fréquences, il est préférable que le type de porteur responsable de l'effet transistor soit celui présentant les meilleures propriétés de transport : mobilité, vitesse et coefficient de diffusion. Les électrons possèdent des propriétés plus intéressantes que les trous les FET sont essentiellement élaborés sur du matériau de type N. Leur principe peut être comparé à une résistance semi -conductrice dont la section est modulée par une jonction polarisée en inverse, principe décrit pour la première fois en 1952 par W.Shocley [1], sur ce

principe, différentes structures de transistors à effet de champ correspondant à différents contacts de grille ont été élaborées [2] :

- grille à jonction PN pour le transistor JFET (Junction Field Effect Transistor).
- grille métallique isolée pour le transistor MOSFET (Métal Oxyde Semi-conducteur Field Effect Transistor).
- grille métallique à barrière Schottky pour le transistor MESFET.



*Figure (I.1) : Les différents transistors à effet de champ*

### 1.2. 2. Le transistor à effet de champ à jonction (JFET)

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. Sur un substrat (p+) très fortement dopé, on diffuse une zone dopée N : le canal.

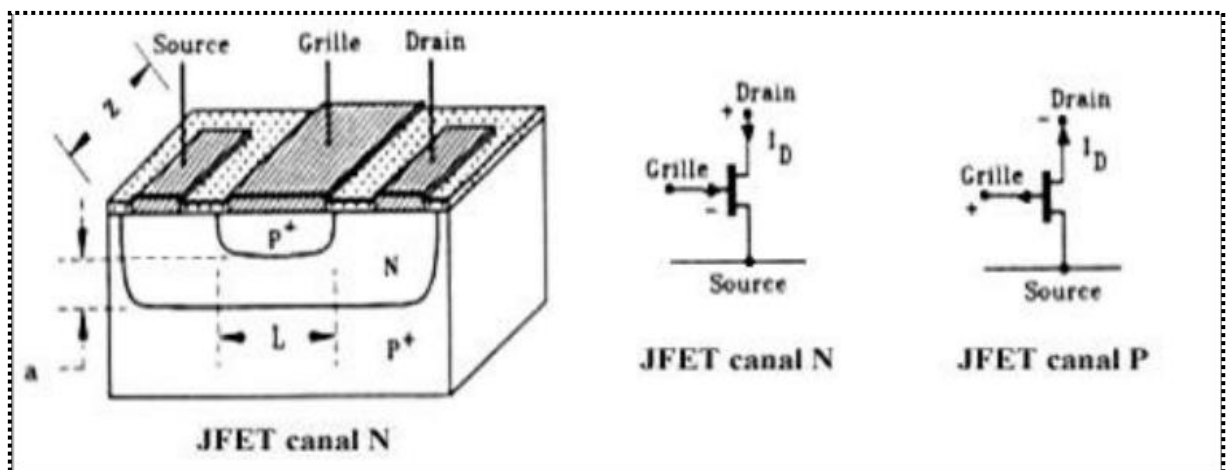
Au centre du dispositif, on diffuse une grille nommée aussi porte ou Gate, dopé P+ reliée au substrat et de part et d'autre de cette grille, deux îlots très fortement dopés N+ : la source (zone d'entrée des électrons dans le dispositif) et le drain (zone de sortie des charges). il existe aussi des JFET (acronyme pour jonction 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.

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.

### I. 2. 3. Principe de fonctionnement du JFET

Dans le transistor à effet de champ à jonction (JFET), la variation de la tension de polarisation permet la modulation de la largeur de la zone de charge d'espace de la jonction latérale "P<sup>+</sup>N". Autrement dit, la variation de la polarisation module la variation de la section conductrice du canal.



*Figure (I.2) : la structure du JFET*

Sans polarisation, il peut avoir une zone de désertion sur une certaine profondeur dans le canal. La désertion est liée aux différents paramètres tels que le matériau de la grille et les propriétés d'interfaces.

### I. 3. Les différents transistors à effet de champ

Les principaux dispositifs à effet de champ utilisés aux fréquences micro-ondes sont [3] :

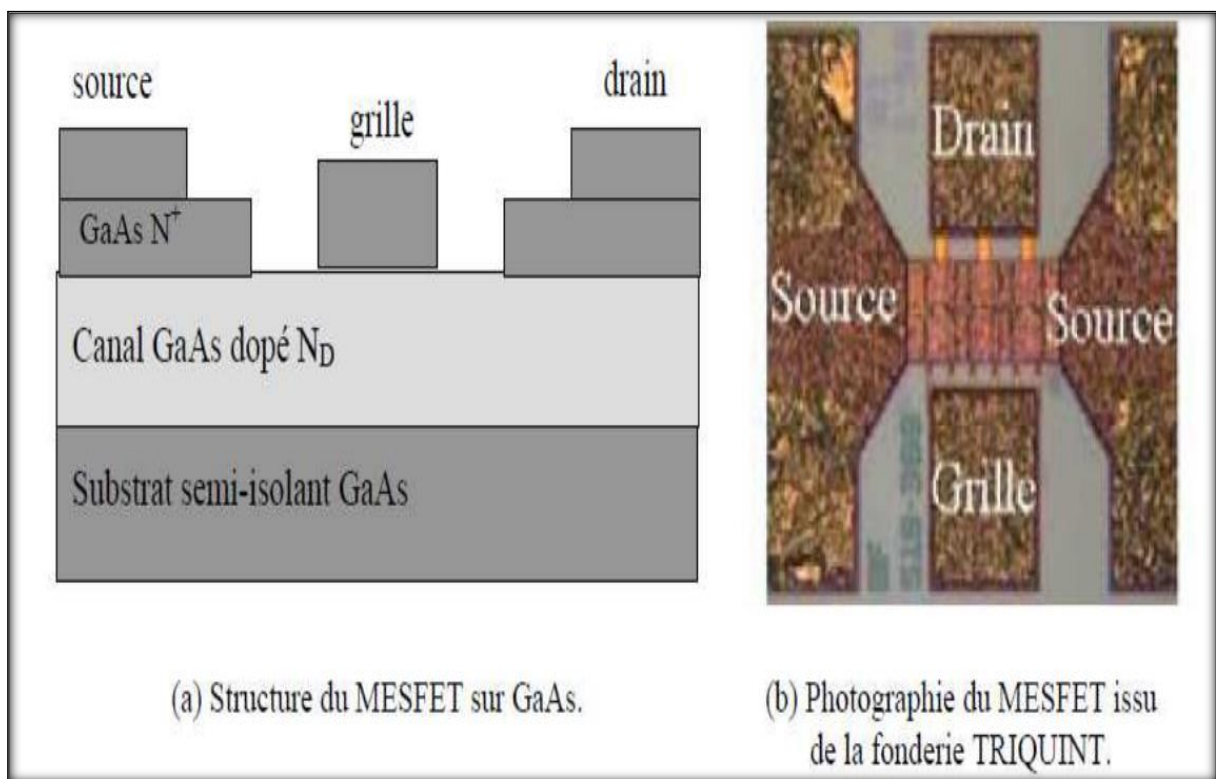
- ❖ Le MESFET : Métal-Semi-conducteur Fiel Effet Transistor.

- ❖ Le MOSFET : Métal Oxyde Semi-conducteur Field Effet Transistor.
- ❖ Le HEMT: High Electron Mobility Transistor.

### I. 3. 1. LE MESFET

Le MESFET est le même appareil de base avec JFET, à la différence que la jonction PN est remplacée par une jonction de redressement à barrière Schottky. La géométrie MESFET simplifiée est illustrée dans la figure (I.5).

Les MESFETs sont généralement fabriqués en arséniure de gallium. Nous négligerons tout épuisement région pouvant exister entre le canal N et le substrat. Nous avons, dans lesquels une tension grille à source est appliquée pour désactiver le transistor. Des MESFETsGaAs en mode amélioration peuvent être fabriqués. Leur fonctionnement de base est décrit à la section. Nous pouvons également considérer les JFET GaAs PN en mode amélioration.



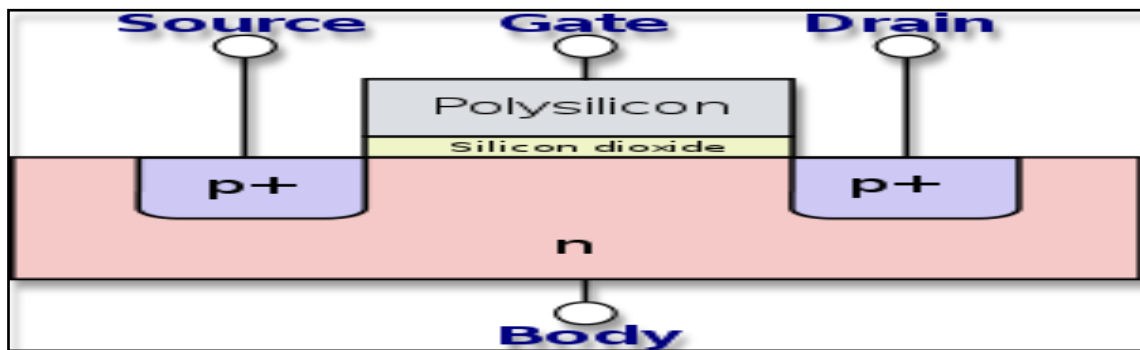
**Figure(I-3) : la technologie de MESFET**

### I. 3. 2. LE MOSFET

Le MOSFET : (Métal Oxide Semi-Conducteur à Effet de Champ) est le dispositif le plus répandu dans la production actuelle des composants semi-conducteurs, il est le composant de base de tout circuit intégré CMOS (Complementary MetalOxide Semiconductor).

La technologie CMOS est basée sur l'utilisation de deux types de transistors complémentaires : le transistor n-MOSFET dont les porteurs sont des électrons et le transistor p-MOSFET dont les porteurs sont des trous.

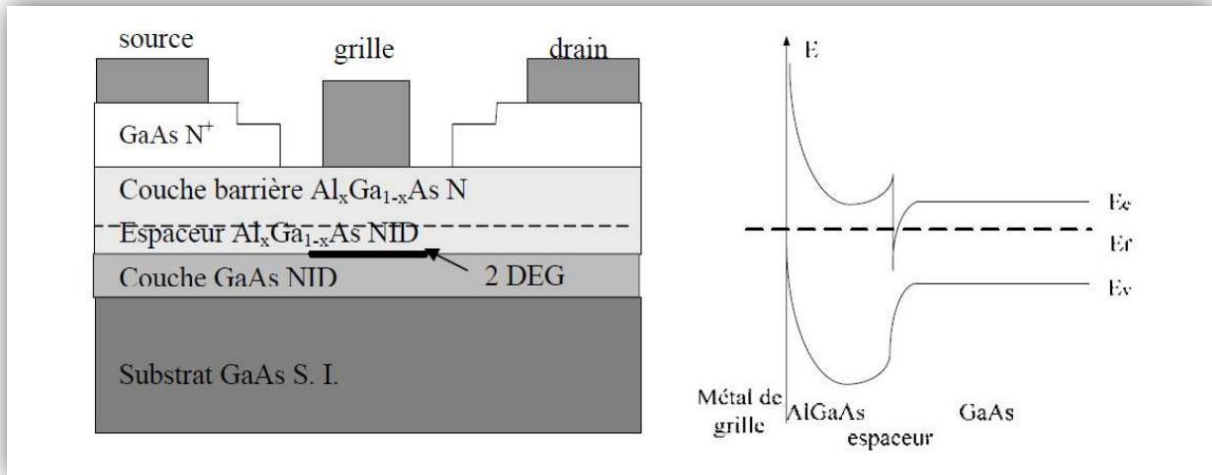
Le principe de fonctionnement d'un MOSFET repose sur l'effet de champ, qui consiste à moduler de façon électrostatique une densité de charges mobiles dans un semi-conducteur. La modulation est provoquée par un champ électrique perpendiculaire à la direction du mouvement de ces charges.



**Figure(I-4) :la technologie MOSFET**

### 1. 3. 3. LE HEMT

Les premiers transistors HEMTs sont apparus en 1980 (Fujitsu, Thomson), ce composant possède plusieurs dénominations dans la terminologie anglo-saxonne, TEGFET (Two-dimensional Electron Gas Field Effect Transistor) et MODFET (Modulation Doped Field Effect Transistor).



*Figure (I.5) : La technologie HEMT*

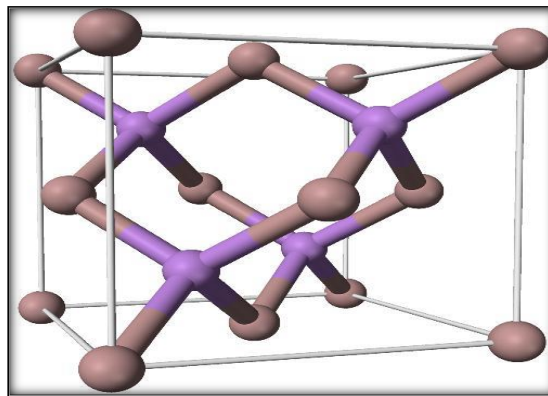
L'idée de base à l'origine de ce composant est d'utiliser comme canal conducteur d'un transistor à effet de champ, un gaz bidimensionnel (gaz-2D) d'électrons circulant dans un matériau peu dopé et résultant de l'occupation des niveaux d'énergie du puits de potentiel caractéristique d'une hétérojonction.

Sur un substrat semi-isolant, on fait croître une couche de GaAs Non Intentionnellement Dopée (NID). On dépose ensuite une couche de Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As non intentionnellement dopée jouant le rôle d'espaceur. Sur cette couche, on fait croître une couche de Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As dopé N. On dépose ensuite la couche de contact GaAs dopé N<sup>+</sup>. C'est sur cette couche que l'on réalise les électrodes métalliques de source et de drain (Figure I-6). Par ailleurs, l'espaceur se révèle indispensable pour limiter les interactions coulombiennes entre les impuretés de dopage du matériau Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As et les électrons du gaz-2D, leur conférant ainsi une grande mobilité.

## I. 4. L'arséniure de gallium GaAs

### I. 4. 1. Définition :

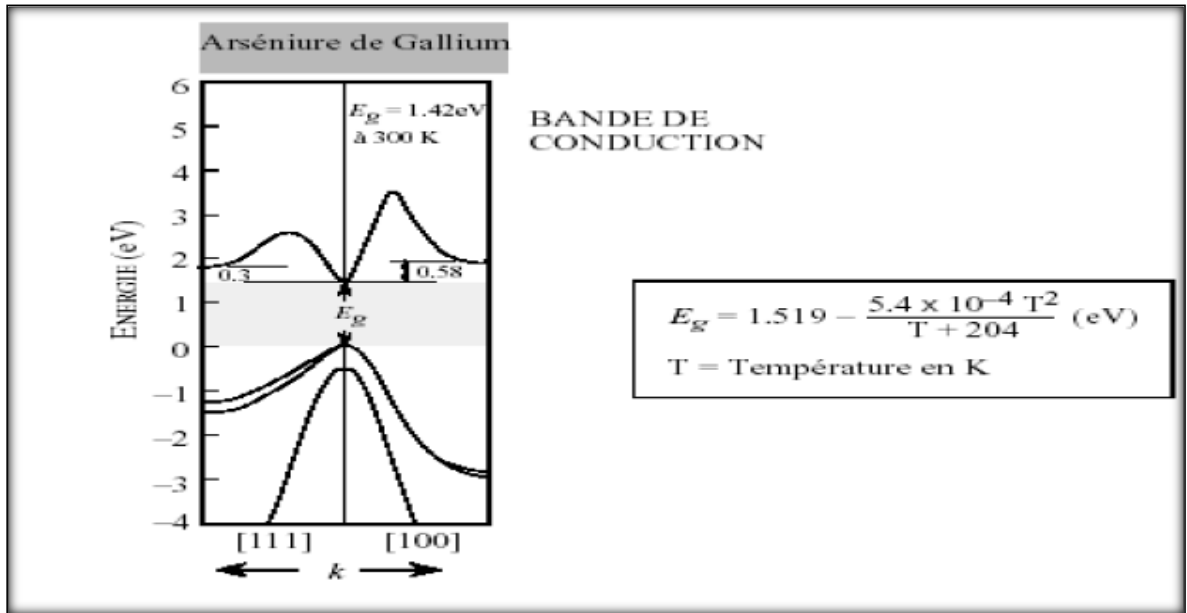
L'arséniure de gallium est un composé intermétallique semi-conducteur à hétéro structure du type III-V, cristallise dans une structure de type Zinc-blende (voire figure (I.3)). Cette dernière est composée de deux réseaux CFC interpénétrant, l'un déplacé par rapport à l'autre d'une distance  $(a/4, a/4, a/4)$  le long de la diagonale. Le réseau de Bravais fondamental est cubique à faces centrées avec un motif constitué de deux atomes, l'un : Ga et l'autre : As dans les positions  $(0, 0, 0)$  et  $(1/4, 1/4, 1/4)$  respectivement. C'est une structure analogue à celle du germanium et du silicium. La liaison entre les deux plus proches voisins est de caractère ionique partiel et covalent partiel (la liaison est formée par deux électrons de spin différents). On dit que chaque atome d'arsenic (V) fournit un électron à un atome de gallium (III).



**Figure (I.6) :** Maille primitive du réseau cristallin GaAs

### I. 4. 2. Structure de bande

Le composé GaAs possède une bande interdite directe (Figure (I.4)). La transition d'énergie minimale entre ses deux bandes peut avoir lieu sans changement de vecteur d'onde, ce qui permet l'absorption et l'émission de lumière de façon beaucoup plus efficace que dans les matériaux à gap indirect comme le silicium.



**Figure (I.7)** : Structure de bande d'énergie du GaAs dans les directions de haute symétrie. Le gap est 1,51eV à 0K et 1,43eV à 300K. Le fond de la bande de conduction est à  $k = (0.0.0)$

#### I. 4. 3.Applications

La bande interdite directe du GaAs confère des propriétés d'absorption optique et de luminescence importantes susceptibles d'être exploitées en optoélectronique. La grande mobilité électronique (8600 cm/V.s dans le matériau intrinsèque) et la faible mobilité des trous (250 cm/V.s dans le matériau intrinsèque) permettent son utilisation pour les composants électroniques rapides tels que les transistors.

Ce composé est ainsi utilisé dans les redresseurs, les photoconducteurs et les diodes à laser. On obtient un laser à semi-conducteur en clivant une simple jonction p-n polarisée dans le sens direct, réalisée dans un matériau à saut de bande direct comme le GaAs.

Dans tous les cas, les matériaux de départ sont des monocristaux de GaAs de propriétés contrôlées. Les dispositifs à hétéro structures III-V offrent des performances attractives, non seulement pour des applications militaires et spatiales, mais surtout pour de nombreuses applications commerciales.

Autrement dit tous les dispositifs à hétéro structure III-V trouvent une technologie concurrente plus aisée à maîtriser.

Le tableau (I.1) regroupe quelques propriétés importantes de l'arséniure de gallium (**GaAs**) :

<i>Propriétés</i>	<i>GaAs</i>
Nombre d'atome ( $s/cm^3$ )	$4.42 \cdot 10^{22}$
Poids atomique ( $g/mole$ )	144.63
Structure cristalline	Zinc Blinde
Densité ( $g/cm^3$ )	5.32
Constante diélectrique	13.1
Densité effective d'états dans B.C. ( $cm^{-3}$ )	$NC=4.7 \cdot 10^{17}$
Densité effective d'états dans B.V. ( $cm^{-3}$ )	$NV=6 \cdot 10^{18}$
Affinité électronique (V)	4.07
Largeur de la bande interdite (eV)	1.424
Concentration interdite (eV)	$1.79 \cdot 10^6$
Résistivité intrinsèque (eV)	$10^8$
Température de fusion (W. cm)	1238
Durée de vie des porteurs minoritaires (s)	$\sim 10^8$
Mobilité d'entraînement ( $cm^2/V.S$ ) ;	
Trous	400
Electrons	8500
Vitesse d'entraînement $cm/s$	$2 \cdot 10^7$

**Tableau (I.1) : Propriétés du GaAs à 300°K**

#### I. 4. 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 [4]. 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 [6].

## *1. 5. Conclusion*

Dans ce chapitre, nous avons parlé des types de transistors qui influencent le champ de différents types en termes de principe de fonctionnement et de structure.



*Chapitre II*

***Le transistor MESFET à base de GaAs***

# CHAPITRE II

## Le Transistor MESFET à base de GaAs

### II. 1. Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter les différents phénomènes physiques du contact métal-semi-conducteur (contact Schottky) et les caractéristiques principales du transistor MESFET GaAs. En plus une analyse structurale du transistor sera suivie d'une présentation de son principe de fonctionnement.

### II. 2. Les matériaux III-V

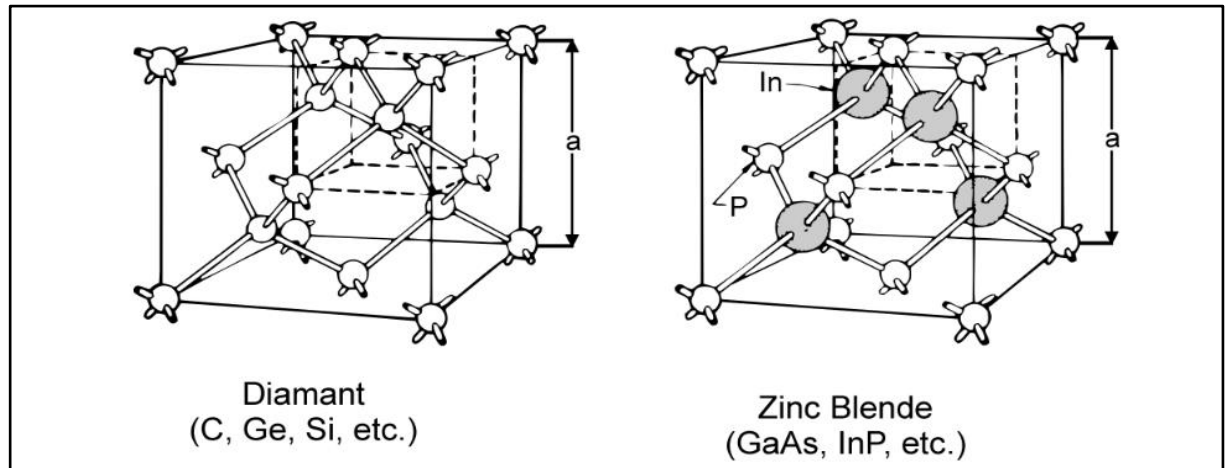
Les matériaux III-V sont constitués des éléments des colonnes III-b et V-b de la classification périodique des éléments. L'étude de leur structure de bandes montre toutefois, que les éléments les plus légers donnent des composés dont la bande interdite est large et indirecte, et dans laquelle la masse effective des électrons est élevée [7].

Composé III-V	Eg (ev)	m*/m <sub>0</sub>	μ (cm <sup>3</sup> /V.s)	a (Å)
AIP	2.45			5.4510
AlAs	2.16			5.6605
AlSb	1.58	0.12	200	6.1355
Bp	2.0			4.5380
GaP	2.26	0.82	110	5.4512
GaAs	1.42	0.067	8500	5.6533
InP	1.35	0.077	4600	5.8686
InAs	0.36	0.023	33000	6.0584
InSb	0.17	0.0145	80000	6.4794

Tableau (II-2) : Propriétés des principaux composés binaires III-V à 300°K

### II. 3. Structure cristalline des matériaux III-V

La plupart des matériaux III-V cristallisent dans la structure sphalérite dite "Zinc Blende" présentée sur la figure II-1. Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant (C, Ge, Si, etc.), est constituée de deux sous-réseaux cubique face centrée, un des éléments III et l'autre des éléments V, décalés l'un par rapport à l'autre du quart la diagonale principale.



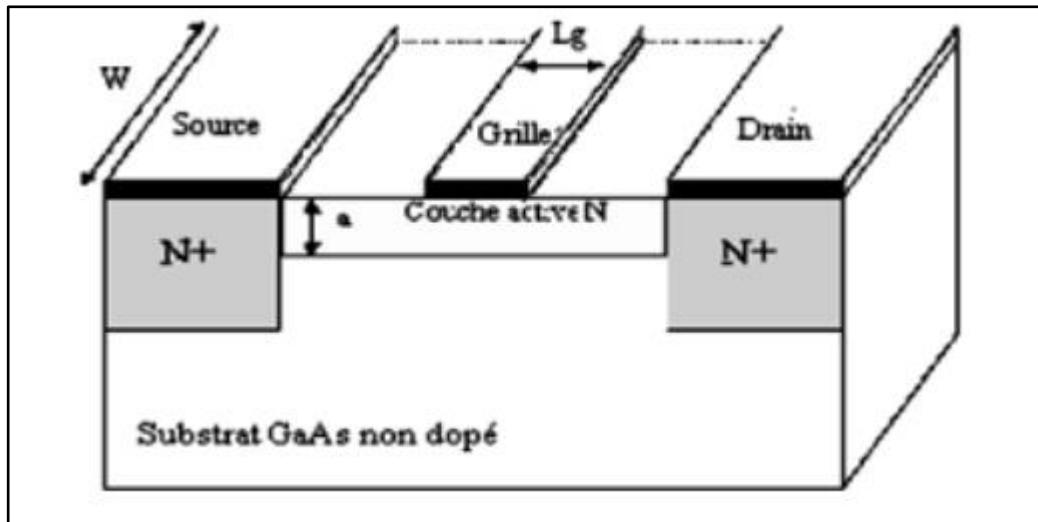
*Figure (II-8) : mailles cristallographiques des structures Diamant et Zinc*

### II. 4. Le Transistor MESFET

Les transistors MESFETs en GaAs ont été largement utilisés pour la détection optique très rapide par de nombreux auteurs [8][9]. Différentes composantes du photo-courant drain-source ont été mises en évidence [10] Ces transistors sont habituellement éclairés par le faisceau à détecter, dans l'espace drain-source, ou comportent une grille semi-transparente.

#### II. 4. 1. Structure du MESFET GaAs :

La structure d'un transistor à effet de champ à base de l'arséniure de gallium à grille Schottky, sous sa forme classique, est représentée sur la figure (II-2) [11].



*Figure (II-9) : Structure du MESFET à base de*

En partant du bas de la figure II-2, il apparaît tout d'abord un substrat semi-isolant en GaAs qui doit être le moins conducteur possible. Il ne joue aucun rôle électrique mais constitue essentiellement un support mécanique pour le reste du composant. Sur ce substrat, une fine couche active dopée N est insérée.

Deux zones fortement dopées  $N^+$ , l'une sous l'électrode de drain et l'autre sous l'électrode de source, sont habituellement rajoutées à la structure par une nouvelle implantation ou par un procédé de diffusion. Elles permettent de réduire les résistances du contact, néfastes pour les performances du composant.

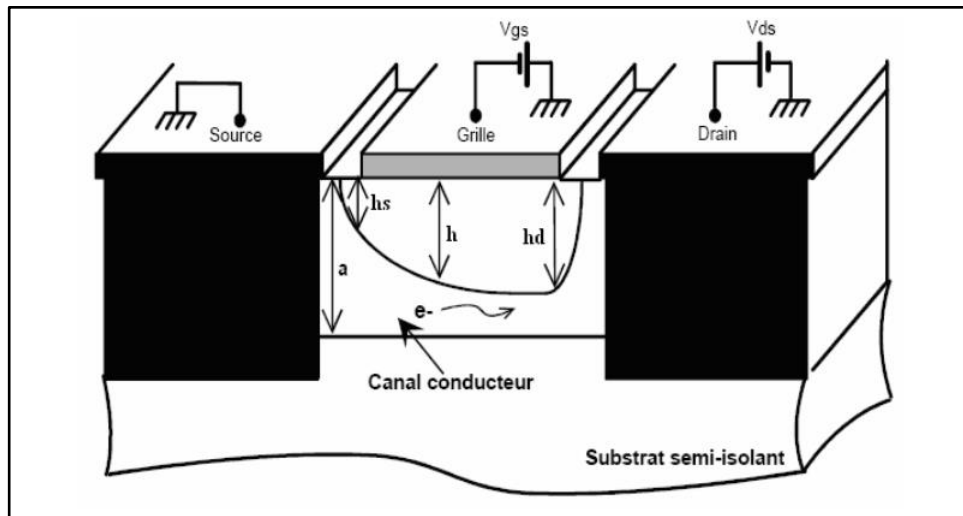
Les propriétés électriques de la structure sont généralement améliorées par la présence d'une couche tampon faiblement dopée entre la couche active et le substrat. Son épaisseur est de quelques microns. Elle évite la migration d'ions au niveau de l'interface et préserve la valeur de la mobilité des porteurs dans cette région. Enfin, trois contacts par dépôt de film métallique sous vide sont réalisés. Les deux contacts extrêmes forment les électrodes de source et de drain de nature ohmique. Celui de l'électrode de grille est de type Schottky (contact redresseur).

De plus, les principales dimensions géométriques sont représentées sur la même figure. La petite dimension de contact de grille  $L_g$  est appelée par convention longueur de grille du transistor. Elle détermine en grande partie la fréquence maximale d'utilisation du transistor. Pour les composants hyperfréquences, elle est souvent inférieure à  $1 \mu\text{m}$ .

La deuxième dimension est la largeur de grille  $W$ , elle rend compte de la taille du transistor. Sa dimension typique est de l'ordre de 50 à 1000 fois celle de  $L_g$ . L'épaisseur « $a$ » de la couche active est généralement de 0.2 à 0.4  $\mu\text{m}$ .

#### II. 4. 2. Le principe de base du MESFET

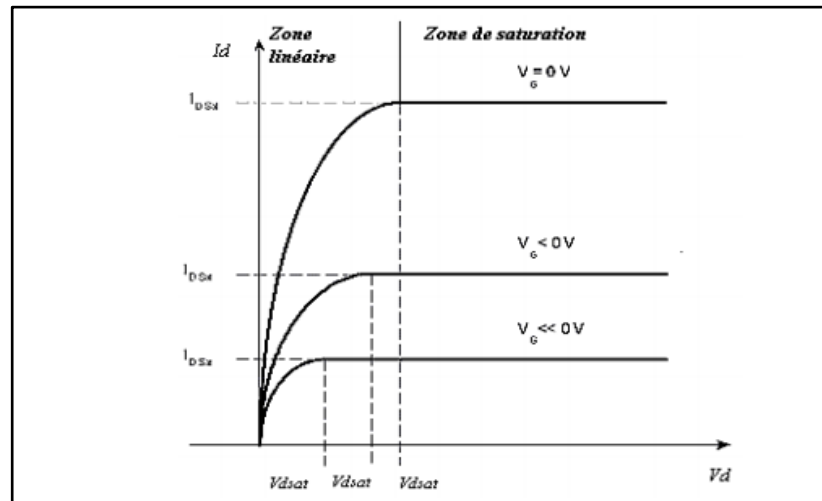
Le principe de base du MESFET repose sur les caractéristiques d'une jonction Schottky. Notons qu'en régime de fonctionnement normal, la grille est généralement polarisée négativement par rapport à la source tandis que le drain est polarisé positivement.



*Figure (II-10) : La structure du MESFET et l'emplacement des sources de polarisation*

Lorsque les conditions de polarisation normales pour le MESFET sont vérifiées, la présence du contact Schottky crée une zone dépeuplée de porteurs libres sous la grille. La concentration des électrons mobiles est donc maximale dans la fraction restante de la couche conductrice appelée canal conducteur. En effet, lorsqu'on applique une tension  $V_{ds}$  positive, un flux d'électrons traverse le canal de la source vers le drain correspondant à un courant  $I_{ds}$  dans le sens inverse. Or, la section du canal conducteur disponible est limitée à  $(a-h)$ . Si on diminue  $V_{gs}$ , l'épaisseur  $h$  augmente. Par conséquent le courant  $I_{ds}$  diminue. Lorsque  $h$  atteint la valeur  $a$ , le canal est pincé et  $I_{ds}$  s'annule. On se trouve ainsi en mesure de contrôler le passage du courant de sortie par la commande de grille.

En faisant varier  $V_{ds}$  pour plusieurs niveaux de commande  $V_{gs}$ , on génère un réseau de caractéristiques donnant l'évolution du courant de sortie. Ce réseau de caractéristiques est constitué de deux parties : la zone linéaire et la zone de fonctionnement saturé [11]



Figure( II-11) : Réseau de caractéristiques de sortie d'un MESFET

#### II. 4. 3. Principe de fonctionnement du MESFET

##### a. Zone de fonctionnement linéaire ( $V_{ds} \ll V_{dsat}$ )

Cette zone, appelée également zone ohmique correspond à une évolution quasi linéaire du courant de sortie  $I_d$  pour de faibles valeurs de  $V_{ds}$  comme le montre la figure (II-5-a). En effet, la section du canal conducteur est presque uniforme puis qu'elle dépend principalement de la commande  $V_{gs}$ . Le transistor se comporte ainsi comme une conductance contrôlée par la tension de grille.

##### b. Zone de fonctionnement saturé

Selon la valeur de la tension de drain, deux régimes de polarisation se présentent figure (II-5-b) et figure (II-5-c) [12]

##### c. Régime de pincement ( $V_{ds} \leq V_{dsat}$ )

Au fur et à mesure que  $V_{ds}$  augmente, le canal ne peut plus être considéré comme équipotentiel. L'extension de la zone de charge d'espace évolue tout au long du canal, elle est plus importante sous la grille du côté drain que du côté source, ce qui entraîne une augmentation de la résistance du canal et une faible variation du courant de drain avec la tension drain-source

appliquée. Lorsque la largeur conductrice du canal devient nulle coté drain :le régime de pincement est ainsi atteint, la tension drain-source correspondante est appelée tension de saturation  $V_{dsat}$ , le courant correspondant est appelé courant de saturation. Notons que pour les MESFETs à canal court le champ électrique longitudinal à une valeur très importante, ce qui conduit à une dépendance entre celui-ci et la mobilité des porteurs. Lorsque ce champ électrique atteint une certaine valeur critique  $E_c=5.10^4$  v.cm<sup>-1</sup>, la vitesse des porteurs atteint sa valeur de saturation  $V_s$  qui est de l'ordre de 2.107 cm/s.

On conclut, que la saturation du courant de drain est modulée par les deux facteurs suivants : la saturation de la vitesse des porteurs avec le champ électrique pour les MESFETs à canal court, et le pincement du canal pour les MESFETs à canal long.

En effet, si la longueur du canal est courte, la valeur du champ électrique longitudinal peut atteindre sa valeur critique  $E_c$  et amorce la saturation du MESFET. Ainsi, lorsque le canal est suffisamment long, le champ électrique longitudinal ne peut plus atteindre sa valeur critique avant le pincement du canal, et on dit que c'est le pincement qui assure la saturation.

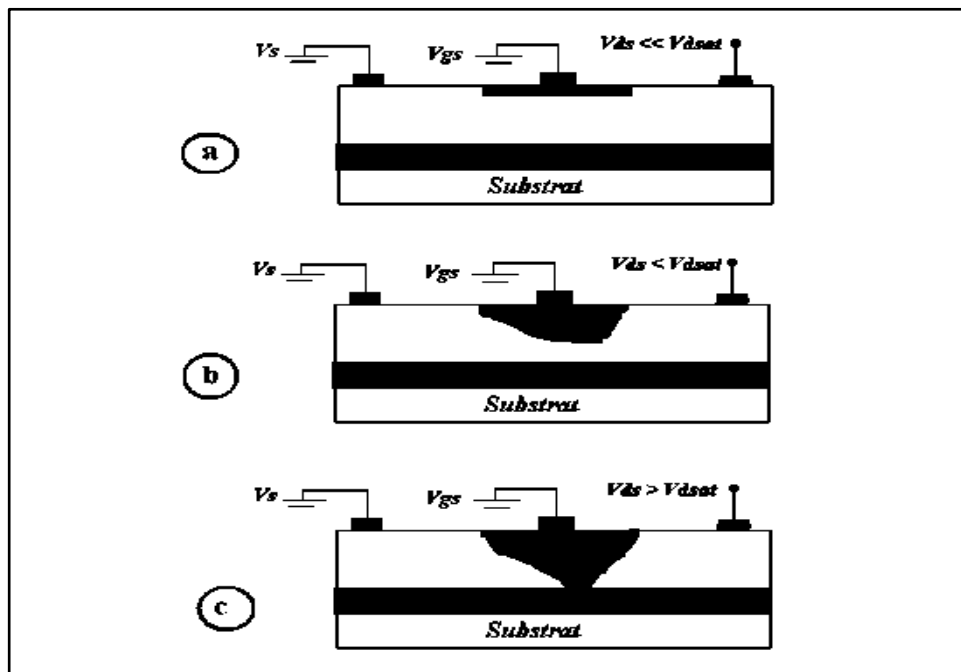


Figure (II-12) :Principe de fonctionnement du MESFET

a)  $V_{ds} \ll V_{dsat}$ , b)  $V_{ds} \leq V_{dsat}$ , c)  $V_{ds} > V_{dsat}$

## II. 4. Contact métal-semi-conducteur

L'hétérojonction métal-semi-conducteur est fondamentale pour la réalisation des composants semi-conducteurs [13] Elle se présente sur tous les dispositifs sous forme de contact ohmique pour assurer la connexion entre la "puce" et le boîtier. Elle peut également se comporter comme un contact redresseur de l'électrode de grille d'un transistor à effet de champ.

### II. 4. 1. Diagramme des bandes d'énergie

Pour étudier la jonction métal-semi-conducteur, il faut connaître [14]:

#### a. Le travail de sortie du métal ( $e\phi_m$ )

C'est l'énergie nécessaire pour libérer un électron du niveau de fermi d'un métal et l'amener au niveau du vide.

#### b. L'affinité électronique du semi-conducteur ( $e\chi$ )

C'est l'énergie nécessaire pour libérer un électron du bas de la bande de conduction semi-conducteur et l'amener au niveau du vide.

La figure (II-6) représente les niveaux d'énergies du métal et du semi-conducteur avant contact.

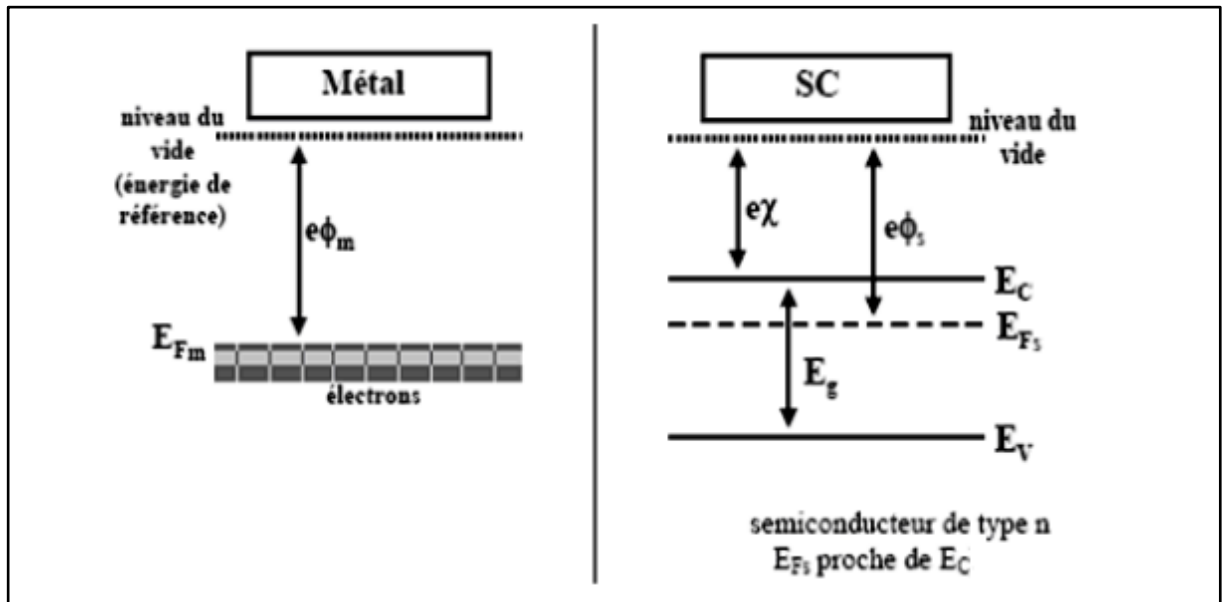


Figure (II-13) : Les niveaux d'énergie du métal et du semi-conducteur

c. **Barrière de potentiel Schottky**

Lorsqu'un métal et un semi-conducteur sont en contact, il existe à l'interface une barrière de potentiel donnée par [8] :

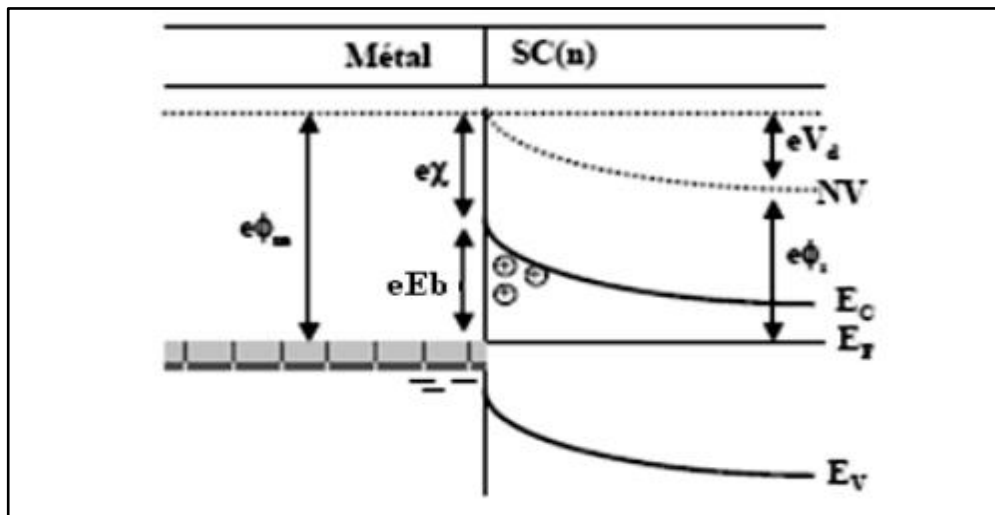
$$E_b = e\phi_m - e\chi \quad (\text{II-1})$$

Pour un semi-conducteur de type N, deux cas sont possibles :

- soit  $\phi_m \geq \phi_s$
- soit  $\phi_m \leq \phi_s$

II. 4. 2. Contact redresseur

Cas qui correspond à  $\phi_m \geq \phi_s$  [15] :



Figure( II-14) : Niveaux d'énergie de la jonction métal semi-conducteur dans le cas  $\phi_m \geq \phi_s$

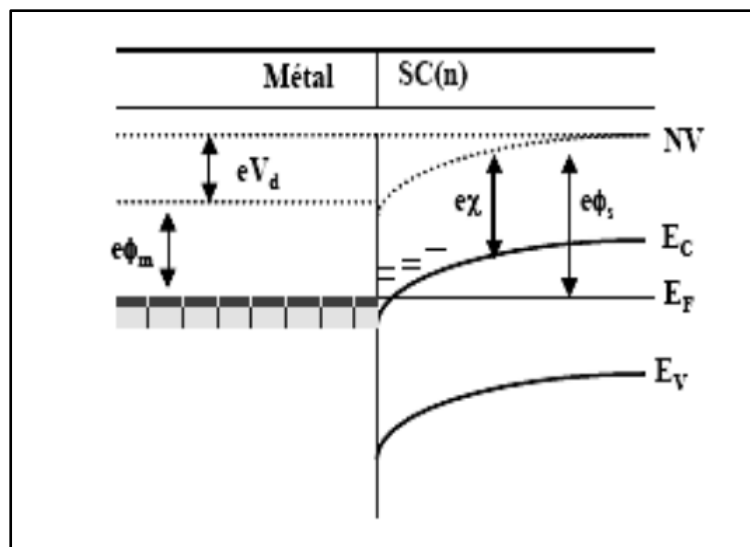
Lorsque les deux matériaux sont en contact et que, à l'équilibre thermodynamique, les niveaux de Fermi s'alignent, les états d'énergie peuplés les plus hauts en énergie sont dans le semi-conducteur. Il y a donc des états d'énergie plus faibles vides dans le métal. Un certain nombre d'électrons vont donc transférer vers le métal d'où le phénomène d'accumulation et désert le semi-conducteur loin de l'interface métallurgique pour créer la zone de charge d'espace. Un champ électrique interne va se créer pour lutter contre cette diffusion, un équilibre

va se créer et le phénomène va s'arrêter. On aboutit alors à l'équilibre schématisé par la figure (II-14).

On voit que dans ce cas, la barrière à l'interface commande le passage du courant du métal vers le semi-conducteur et vice versa: on se trouve dans le cas d'un contact redresseur ou Schottky.

### II. 4. 3. Contact Ohmique

Cas qui correspond à  $\phi_m \leq \phi_s$  [11] :



**Figure (II-15) :** Niveaux d'énergie de la jonction métal semi-conducteur dans le cas  $\phi_m \leq \phi_s$

Lorsque les deux matériaux (métal et semi-conducteur) sont mis en contact, le travail de sortie du métal étant inférieur à celui du semi-conducteur, les électrons sortent du métal pour entrer dans le semi-conducteur et font apparaître ainsi dans le métal un déficit d'électrons, localisé à la surface, et dans le semi-conducteur une zone d'accumulation très peu étalée. Il en résulte une courbure vers le bas, des bandes de valence et de conduction (figure II-8). Si on polarise la structure tous les électrons supplémentaires, par rapport au régime d'équilibre, qui arrive à l'interface dans le semi-conducteur passent librement dans le métal et vice versa : on se trouve dans le cas d'un contact ohmique.

Nous n'étudierons que le cas qui nous intéresse en tant que composant non-linéaire, c'est à dire le cas du contact redresseur.

## II. 5. Equations fonctionnelles du MESFET

### II. 5. 1. Équations fonctionnelles du MESFET intrinsèque à canal non uniformément dopé : (cas du MESFET à canal implanté)

L'ensemble des équations (II-2) à (II-3) régissant les phénomènes de transport de charges à l'intérieur d'un transistor MESFET intrinsèque à canal non uniformément dopé sont établies.

*Equation de Poisson :*

$$\nabla^2 \Psi = - \frac{\rho(x,y,z)}{\varepsilon} \quad (\text{II -2})$$

*Potentiel électrique :*

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}(\Psi) \quad (\text{II -3})$$

*Densité du courant :*

$$J_x = \sigma(x, y, z) \cdot E_x \quad (\text{II -4})$$

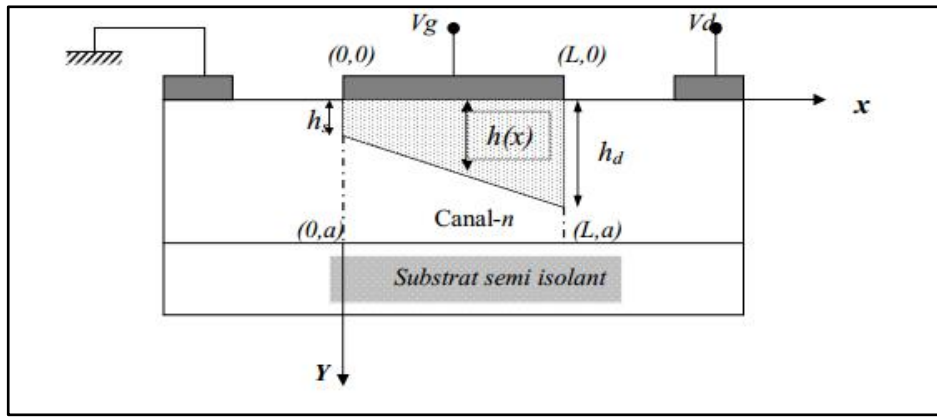
Les grandeurs physiques qui interviennent dans ces équations sont les suivantes :

- $E(x,y)$  est le champ électrique ;
- $\Psi(x,y,z)$  est la variation totale du potentiel électrostatique à travers la zone de charge d'espace.

$J_x$  est la densité de courant de conduction :

- $\sigma(x,y,z)$  est la conductivité du canal ;
- $\rho(x,y,z)$  est la densité de charges d'espace dans le semi-conducteur.

La résolution de ce système d'équations s'effectue dans le canal, directement sous l'électrode de grille : cette zone est représentée sur la figure (II-16). Les autres régions du transistor seront modélisées à partir d'éléments linéaires extrinsèques.



**Figure (II-16) :Zone active du transistor MESFET**

Les axes  $ox$  et  $oy$  représentent les axes longitudinaux et transversaux de la structure, l'origine est prise côté source. La largeur totale du canal est «  $a$  » et supposée constante. La largeur de la zone de déplétion  $h(x)$  en un point d'abscisse  $x$  varie graduellement entre  $h_s$  à la source et  $h_d$  au drain. Notre étude consiste dans un premier temps à déterminer l'équation analytique de la principale non-linéarité du transistor, à savoir la source de courant de drain  $I_d$  commandée par les deux tensions  $V_g$  et  $V_d$ .

Plusieurs étapes intermédiaires de calculs sont alors nécessaires :

- Résolution de l'équation de Poisson (II -2) afin d'extraire les expressions analytiques du potentiel électrostatique  $\Psi(x, y)$ .
- Détermination à partir de l'équation (II -3) des expressions analytiques des composantes, suivant les axes  $ox$  et  $oy$ ,  $E_x(x, y)$  et  $E_y(x, y)$  du champ électrique  $E(x, y)$  dans le canal.
- Puis intégration de la composante, suivant l'axe  $ox$  de la densité de courant  $J_x(x, y)$  au niveau des électrodes de source et de drain, afin d'établir l'expression analytique du courant de drain  $I_d$ .

### II. 5. 2. Calcul du potentiel et du champ électrique

Le potentiel dans la zone de charge d'espace du canal est donné par l'intégration de l'équation de poisson :

$$\nabla^2 \Psi = \frac{d^2 \Psi}{dx^2} + \frac{d^2 \Psi}{dy^2} + \frac{d^2 \Psi}{dz^2} = \frac{\rho(x,y,z)}{\epsilon} \quad (\text{II -5})$$

Pour simplifier l'étude, on cherche toujours à avoir un dopage homogène du canal. Et pour des raisons liées aux techniques de fabrication ceci est impossible de sorte qu'on a  $N_d = N_d(y)$ .

On admet en outre que tous les donneurs sont ionisés à température ambiante. Ainsi la densité de charge d'espace dans le semi-conducteur sous la grille s'écrit :

$$\rho(x, y) = q(Nd(y) - n(x, y)) \quad (\text{II -6})$$

Avec :  $n(x, y)$  la densité des porteurs libres dans la zone de charge d'espace.

- Pour des raisons de symétrie le potentiel est constant suivant la direction Z, de sorte

$$\text{que } \frac{d^2\Psi}{dz^2} = 0$$

En outre, si on admet que la longueur du canal est beaucoup plus importante que l'épaisseur dans la zone de charge d'espace, la variation du champ électrique suivant la direction à la structure est beaucoup plus importante que dans la direction longitudinale .

L'équation de poisson se ramène à :

$$\frac{d^2\Psi(x, y)}{dy^2} = -\frac{q}{\epsilon}Nd(x, y) \quad (\text{II -7})$$

On intègre les deux membre de l'équation(II -7) entre  $h(x)$  à  $y$ , avec la condition

$$\frac{d\Psi(x, y)}{dy} = 0 \quad \text{En } y=h ; \text{ on obtient :}$$

$$\frac{d\Psi(x, y)}{dy} = -\frac{1}{\epsilon} \int_{h(x)}^y qNd(x, y)dy = \frac{1}{\epsilon} \left( \int_0^{h(x)} qNd(x, y)dy - \int_0^y qNd(x, y)dy \right) \quad (\text{II -8})$$

Dans l'hypothèse graduelle, le champ électrique de la zone de charge d'espace n'a qu'une composante verticale  $E_y(x, y)$  donnée par:

$$E_y(x, y) = -\frac{d\Psi(x, y)}{dy} \quad (\text{II -9})$$

ainsi l'expression du champ électrique de la zone de charge d'espace reliée au dopage et à la pénétration  $h(x)$  est donnée par :

$$E_y(x, y) = \frac{1}{\epsilon} \left( \int_0^y qNd(x, y)dy - \int_0^{h(x)} qNd(x, y)dy \right) \quad (\text{II -10})$$

Nous introduirons pour traiter les problèmes de charge de canal et de charge d'espace la fonction intégrale du dopage [23].

$$Q(y) = \int_0^y \rho(x, y)dy = q \int_0^y Nd(x, y)dy \quad (\text{II -11})$$

Ainsi:

$$\frac{d\Psi(x, y)}{dy} = -\frac{1}{\epsilon} [Q(h(x)) - Q(y)] \quad (\text{II -12})$$

Le potentiel électrostatique  $\Psi(x, y)$  dans la zone charge d'espace à l'abscisse  $x$  est donné par une deuxième intégration de l'équation de poisson de  $y=0$  à  $y=h(x)$  :

$$\Psi(x, y) = \frac{1}{\epsilon} \int_0^{h(x)} [Q(h(x)) - Q(y)]dy \quad (\text{II -13})$$

$$\Psi(x, y) = \frac{1}{\epsilon} \left[ h(x)Q(h(x)) - \int_0^{h(x)} Q(y)dy \right] \quad (\text{II -14})$$

Après une intégration par parties, on aboutit à l'expression finale du potentiel dans la zone de charge d'espace :

$$\Psi(x, y) = \frac{q}{\epsilon} \int_0^{h(x)} y N d(x, y) dy \quad (\text{II -15})$$

La valeur maximum de  $h(x)$  est  $h_{\max} = a$ . Lorsque  $h$  atteint cette valeur en un point du canal, celui-ci est obturé et le régime de pincement est atteint.  $\Psi(L, a)$  Correspondante est appelée tension de pincement  $V_p$

$$V_p = \Psi(L, a) = \frac{q}{\epsilon} \int_0^a y N d(x, y) dy \quad (\text{II -16})$$

Par ailleurs on peut en déduire  $V(x, y)$ , l'expression de la tension du canal dans le plan  $x$ :

$$V(x, y) = \Psi(x, y) + V_g - V_{bi} \quad (\text{II -17})$$

Et par conséquent :

$$V(x, y) = \frac{q}{\epsilon} \int_0^{h(x)} y N d(x, y) dy + V_g - V_{bi} \quad (\text{II -18})$$

La composante  $E_x(x)$  du champ électrique dans le canal est donnée par :

$$E_x(x) = - \frac{dV(x, y)}{dx} \quad (\text{II -19})$$

En développant  $\frac{dV(x, y)}{dx}$  sous la forme  $\frac{dV(x, y)}{dh(x)} \cdot \frac{dh(x)}{dx}$ , telle que la dérivée de l'expression (II -18)

donne :

$\frac{dV(x, y)}{dh(x)} = \frac{q}{\epsilon} \cdot h(x) \cdot N d(h(x))$  ce qui permet d'écrire l'expression de  $E_x(x)$  sous la forme :

$$E_x(x) = - \frac{q}{\epsilon} \cdot h(x) \cdot N d(h(x)) \cdot \frac{dh(x)}{dx} \quad (\text{II -20})$$

Pour un dopage uniforme, et pour une zone de charge d'espace vide de porteurs, on a:

$$N d(x, y) = N d$$

On remplaçant  $N d(x, y)$  par  $N d$  dans les expressions (II -10), (II -18) et (II -20) on obtient :

$$E_y(x) = \frac{q \cdot N d}{\epsilon} (y - h(x)) \quad (\text{II -21})$$

$$V(x) = \frac{q \cdot N d}{2\epsilon} h^2(x) + V_g - V_{bi} \quad (\text{II -22})$$

$$E_x(x) = - \frac{q N d}{\epsilon} h(x) \frac{dh(x)}{dx} \quad (\text{II -23})$$

Pour expliciter le champ électrique et le potentiel, il faut connaître l'expression de  $h(x)$ .

Dans la suite, on se placera dans l'hypothèse du canal graduel, qui nous permettra de calculer en utilisant les propriétés des triangles semblables l'expression de  $h(x)$  en fonction de  $h_s$  et  $h_d$ , ses valeurs coté source et coté drain respectivement :

$$h(x) = \frac{h_d - h_s}{L} x + h_s \quad (\text{II -24})$$

### II. 5. 3. Courant de drain dans le canal :

La densité du courant de drain en un point de coordonnées  $x, y, z$  du canal est simplement donnée par la loi d'Ohm (équation II -4) :

$$J_x = \sigma(x, y, z). E_x$$

Dans la mesure où  $\rho(x, y)$  représente la densité de charges fixes dans la région dépeuplée (c-à-d  $qNd(x, y)$ ), la densité de charges mobiles dans la région conductrice du canal en un point  $(x, y, z)$  pour un transistor à canal n est donnée par  $-\rho(x, y)$ [23].

La conductivité du canal et la densité de courant s'écrivent donc :

$$\sigma(x, y, z) = \sigma(x, y) = \rho(x, y). \mu(E_x) \quad (\text{II -25})$$

$$J_x = \rho(x, y)\mu(E_x). E_x \quad (\text{II -26})$$

$\mu(E_x)$  est la mobilité des électrons qui dépend du champ électrique.

Le courant de drain, compté positivement dans le sens drain-source, est obtenu en intégrant  $J_x$  sur toute la section conductrice du canal :

$$I_d = - \int_s J_x ds = - \int_0^z \int_h^a J_x dz dy = -z\mu(E_x). E_x(x) \int_h^a \rho(x, y) dy \quad (\text{II -27})$$

$$I_d = -z\mu(E_x). E_x [Q(a) - Q(h)] \quad (\text{II -28})$$

Soit :

$$I_d = \frac{qz}{\epsilon} \mu(E_x). h(x). Nd(h). [Q(a) - Q(h)]. \frac{dh(x)}{dx}$$

$$I_d. dx = \frac{qz}{\epsilon} \mu(E_x). h(x). Nd(h). [Q(a) - Q(h)]. dh(x) \quad (\text{II -29})$$

On obtient l'expression finale du courant de drain en intégrant sur tout le barreau, c'est-à-dire de  $x=0$  à  $x=L$ , et de  $h = h_s$  à  $h_d$ . Le courant étant conservatif,  $I_d$  est constant :

$$I_d = \frac{qz}{\epsilon L} \int_{h_s}^{h_d} \mu(E_x). h(x). Nd(h). [Q(a) - Q(h)]. dh(x) \quad (\text{II-30})$$

En supposant une mobilité constante  $\mu_n$  :

$$I_d = \frac{q^2.z.\mu_n Nd^2}{\epsilon.L} \int_{h_s}^{h_d} h(x)(a - h(x))dh(x) \quad (\text{II-31})$$

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

$$I_d = \frac{(q.Nd)^2.z.\mu_n}{\epsilon.L} \left[ \frac{a}{2} (h_d^2 - h_s^2) - \frac{1}{3} (h_d^3 - h_s^3) \right] \quad (\text{II -32})$$

$h_s$  et  $h_d$  sont données par l'expression:

$$h_s = \left[ \frac{2\varepsilon}{qNd} (V_{bi} - V_{gs}) \right]^{1/2}$$

$$h_d = \left[ \frac{2\varepsilon}{qNd} (V_{bi} - V_{gs} + V_{ds}) \right]^{1/2}$$

En définissant le courant de pincement par :

$$I_p = \frac{(q.Nd)^2 . z . U_n . a^3}{2\varepsilon L} \quad (\text{II -33})$$

et la tension de pincement  $V_p$  par :

$$V_p = \frac{qNd}{2\varepsilon} a^2 \quad (\text{II -34})$$

L'expression générale du courant dans le canal  $I_d$  devient :

$$I_d(V_d, V_g) = I_p \left[ \frac{V_d}{V_p} - \frac{2}{3} \left( \frac{V_d + V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{2}{3} \left( \frac{V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (\text{II -35})$$

Cependant, cette équation qui détermine la variation du courant de drain en fonction des deux tensions de polarisation se réécrit différemment, selon le régime de fonctionnement du transistor et qui dépend essentiellement de la valeur de la tension de drain  $V_d$ . Ces régimes sont :

- Le régime linéaire, où le courant de drain varie linéairement avec la tension de drain  $V_d$ .
- Et dans le deuxième cas, le courant se sature à la valeur  $I_{dsat}$ . Cette région de caractéristique est connue comme étant la région de saturation.

Dans ce qui suit, nous allons à partir de l'équation (II -35) déterminer les équations correspondantes aux deux régimes :

✓ **Régime linéaire**

La tension de drain dans ce régime obéit à la condition suivante :  $V_d \ll V_{bi} - V_g$

L'équation (II-35) se réécrit:

$$I_d(V_d, V_g) = \frac{I_d}{V_p} \left\{ 1 - \sqrt{\frac{V_{bi} - V_g}{V_p}} \right\} . V_d \quad (\text{II -36})$$

Lorsque  $V_g = V_{bi} - V_p$ ,  $I_d = 0$  quelle que soit la valeur de  $V_d$ , la tension de grille

Correspondante est appelé la tension de seuil  $V_T$ .

✓ **Régime saturé**

Le courant dans ce cas peut être évalué à partir de l'équation (II-35), en évaluant le courant de drain au point de pincement, soit en posant :

$$V_d = V_{dsat} = V_p - V_{bi} + V_g \quad (\text{II-37})$$

$$I_{dsat} = I_p \left[ \frac{1}{3} - \left( \frac{V_{bi} - V_g}{V_p} \right) + \frac{2}{3} \left( \frac{V_{bi} - V_g}{V_p} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (\text{II-38})$$

## **II. 6. Effet de la loi de mobilité**

Les caractéristiques courant-tensions dépendent de la loi de mobilité des porteurs en fonction du champ électrique. Le choix d'une loi de mobilité est important pour une description correcte des phénomènes physiques dans les MESFET à grille submicronique.

Dans le domaine des champs électriques faibles, les porteurs libres sont en équilibre thermodynamique avec le réseau et leur vitesse moyenne est proportionnelle au champ électrique :

$$v(E) = \mu_0 E \quad (\text{II-39})$$

Lorsque le champ électrique est élevé, le transfert intervalles des électrons induit dans le GaAs une décroissance de la vitesse des porteurs et entraîne une mobilité différentielle fortement négative. Cependant, il n'existe pas une loi qui traduit réellement les variations de cette mobilité avec le champ électrique et plusieurs expressions analytiques approchées ont été proposées pour cette fonction. Notre choix s'est porté sur les lois suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1(E) = U_1(E)E = \frac{U_n E}{1 + \left(\frac{E}{E_c}\right)} \\ v_2(E) = U_2(E)E = \frac{U_n E + V_s \left(\frac{E}{E_c}\right)^4}{\left(1 + \frac{E}{E_c}\right)^4} \end{array} \right. \quad (\text{II-40})$$

$$(\text{II-41})$$

D'où les expressions des mobilités:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1(E) = \frac{U_n}{1 + \left(\frac{E}{E_c}\right)} \end{array} \right. \quad (\text{II} - 42)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_2(E) = \frac{U_n + V_s \left(\frac{E^3}{E_c^4}\right)}{\left(1 + \frac{E}{E_c}\right)^4} \end{array} \right. \quad (\text{II} - 43)$$

$E_c = V_s/U_n$  où  $U_n$  est la mobilité des électrons à faible champ électrique, et  $V_s$  leur vitesse de saturation.

En portant successivement ces deux lois dans les équations (II-35), (II-36) et (II-38), on obtient:

### **Première Loi**

L'équation générale :

$$I_{ds}(V_{ds}, V_{gs}) = I_p A \left[ \frac{V_{ds} - (R_s + R_d) I_{ds}}{V_p} - \frac{2}{3} \left( \frac{V_{ds} + V_{bi} - V_{gs} - R_d I_{ds}}{V_p} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{2}{3} \left( \frac{V_{bi} - V_{gs} + R_s I_d}{V_p} \right)^{3/2} \right] \quad (\text{II-44})$$

Régime linéaire :

$$I_{ds}(V_{sd}, V_{gs}) = \frac{I_p}{V_p} \left\{ 1 - \sqrt{\frac{V_{bi} - V_{gs} + R_s I_{ds}}{V_p}} \right\} \{V_{ds} - (R_s + R_d) I_{ds}\} \quad (\text{II-45})$$

Régime saturé :

$$I_{dsat} = I_p A \left[ \frac{1}{3} - \left( \frac{V_{bi} - V_{gs} + R_s I_d}{V_p} \right) + \frac{2}{3} \left( \frac{V_{bi} - V_{gs} + R_s I_d}{V_p} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (\text{II-46})$$

$$\text{Avec : } A = \frac{U_n(E)}{U_n} = \frac{1}{1 + \frac{V_{ds} - (R_s + R_d) I_d}{L E_c}}$$

### **Deuxième Loi**

L'équation générale :

$$I_{ds}(V_{ds}, V_{gs}) = I_p B \left[ \frac{V_{ds} - (R_s + R_d) I_{ds}}{V_p} - \frac{2}{3} \left( \frac{V_{ds} + V_{bi} - V_{gs} - R_d I_{ds}}{V_p} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{2}{3} \left( \frac{V_{bi} - V_{gs} + R_s I_d}{V_p} \right)^{3/2} \right] \quad (\text{II-47})$$

Régime linéaire :

$$I_{ds}(V_{sd}, V_{gs}) = \frac{I_p}{V_p} \left\{ 1 - \sqrt{\frac{V_{bi} - V_{gs} + R_s I_{ds}}{V_p}} \right\} \{V_{ds} - (R_s + R_d) I_{ds}\} \quad (\text{II-48})$$

**Régime saturé :**

$$I_{dsat} = I_p B \left[ \frac{1}{3} - \left( \frac{V_{bi} - V_{gs} + R_s I_d}{V_p} \right) + \frac{2}{3} \left( \frac{V_{bi} - V_{gs} + R_s I_d}{V_p} \right)^2 \right] \quad (\text{II-49})$$

$$\text{Avec : } B = \frac{U_2(E)}{U_n} = \frac{1 + \frac{V_s}{U_n} \left( \frac{V_{ds} - (R_s + R_d) I_d}{L^3 \cdot E_c^4} \right)}{1 + \left( \frac{V_{ds} - (R_s + R_d) I_d}{L \cdot E_c} \right)^4}$$

## **II. 7. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre le transistor à effet de champ MESFET à base de l'arséniure de galium (GaAs) avec ses équations fonctionnelles.

*Chapitre III*

***Résultats et discussions***

# CHAPITRE III

## Résultats et discussions

### III. 1.Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons et nous discuterons nos résultats de simulation des caractéristiques électriques statiques des transistors MESFETs GaAs pour différents paramètres.

### III. 2.Logiciel de Simulation

Pour la simulation, nous avons utilisé le **MATLAB version 7.1** comme logiciel de simulation. Ce dernier permet la résolution du système d'équations et d'utiliser les résultats pour tracer les différentes courbes. A l'aide de ce logiciel, on a pu déterminer :

- Les caractéristiques électriques courant-tension (I-V) dans les différents régimes de fonctionnements du transistor.
- La vitesse et la mobilité des électrons en fonction du champ électrique.

### III. 3.Résultats et discussions

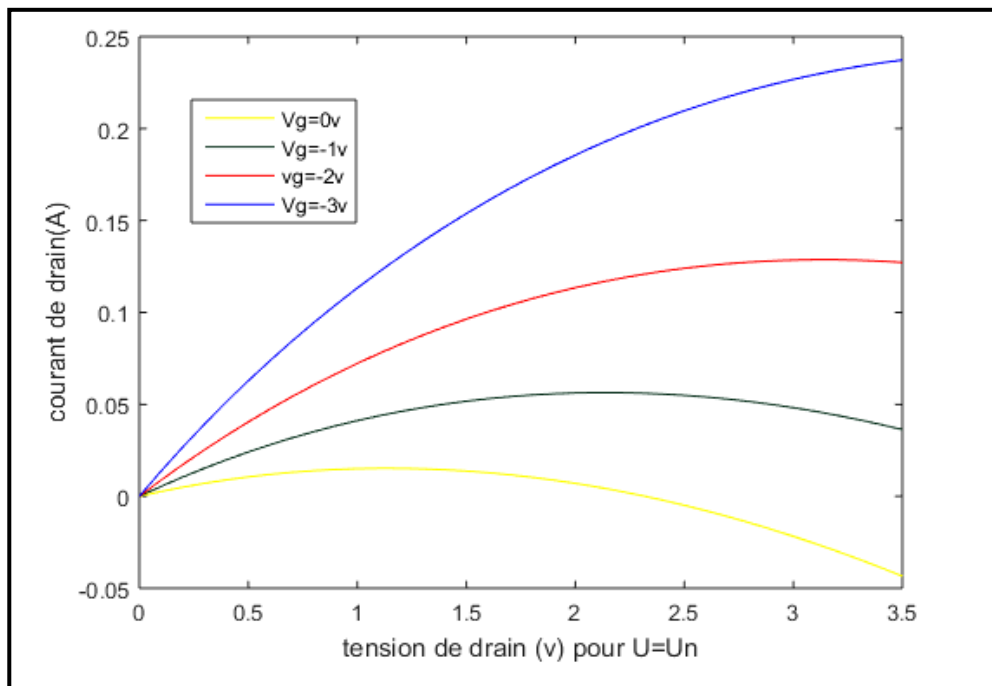
#### III. 3. 1.Caractéristiques courant-tension $I_{ds} = f(V_{ds})$ , pour différentes valeurs de $V_{gs}$

Les caractéristiques électriques courant-tension du courant de drain  $I_{ds}$  en fonction de la tension de drain  $V_{ds}$ , pour différentes valeurs de  $V_{gs}$ , sont représentées dans les figures III-1, III-2 et III-3.

Pour tracer le courant du drain  $I_{ds}$  en fonction de la tension de drain  $V_{ds}$  pour différentes valeurs de tension de grille  $V_{gs}$ , nous avons utilisé les expressions (II-33), (II-34), (II-35), (II-36), (II-37) et (II-38) établies précédemment. Le tableau suivant regroupe les paramètres du transistor utilisé :

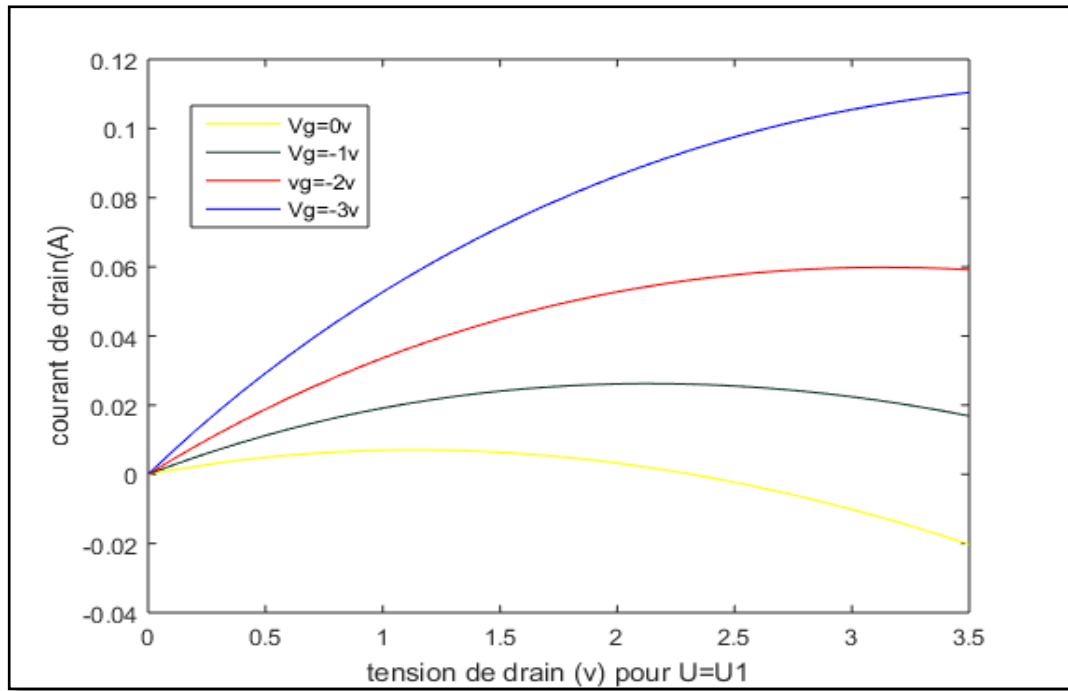
<i>Transistor</i>	<b>L(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>A (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Z(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b><math>V_{bi}</math>(V)</b>	<b><math>\mu_n(\text{m}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1})</math></b>	<b><math>V_s(\text{ms}^{-1})</math></b>
<b>MESFET</b>	4	0.5	360	0.5	0.374	$0.97 \cdot 10^7$

**Tableau (III-3) : Paramètres de MESFET1**

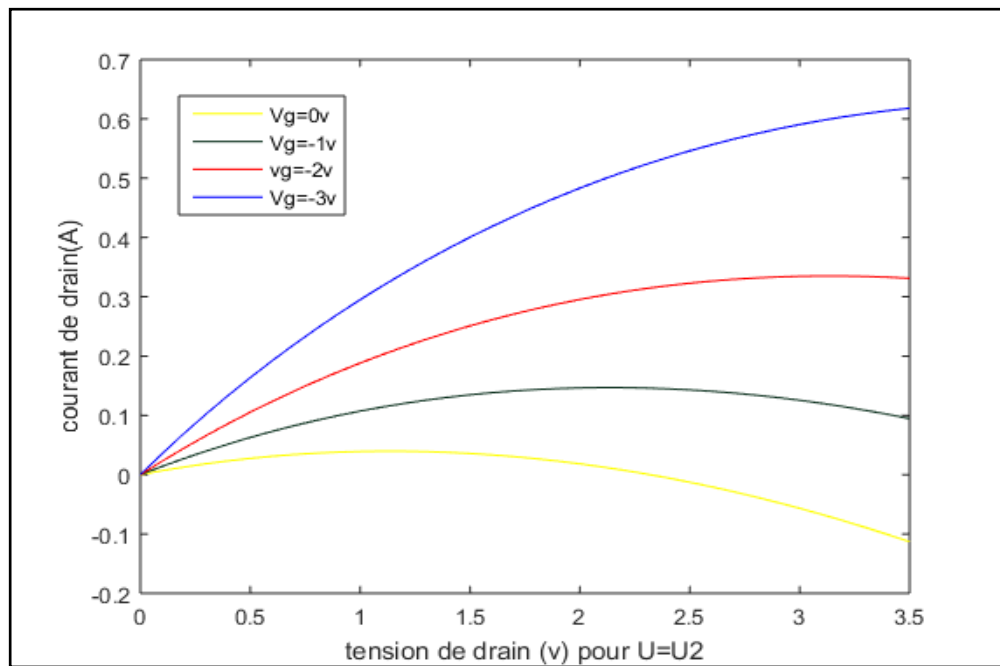


**Figure( III-17) :Caractéristique I-V à mobilité**

Les figures **III-2** et **III-3** présentent les caractéristique **I-V** dans le cas de la mobilité variable (expressions (III-35) et (III-38)).



**Figure(III-18) :** Caractéristique I-V à mobilité variable (pour  $\mu_1$ )



**Figure (III-19) :** Caractéristique I-V à mobilité variable (pour  $\mu_2$ )

D'après le réseau de caractéristiques schématisé dans la figure III-4, on peut distinguer trois régions de fonctionnement du transistor MESFET à base de GaAs :

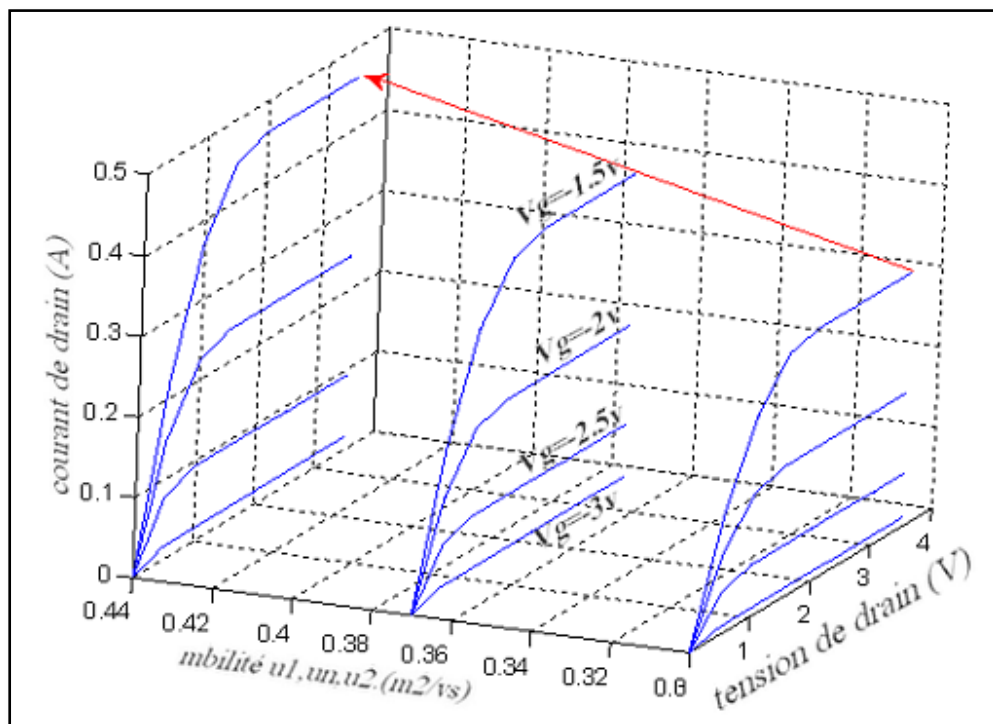


Figure (III-20) : Réseau de caractéristiques I-V pour les mobilités  $\mu_1, \mu_n$

- La première zone consiste à un état ohmique, c'est-à-dire que le courant  $I_{ds}$  varie linéairement en termes de tensions  $V_{ds}$ , ce qui signifie que nous sommes dans une région linéaire.
- Par contre, dans la deuxième zone, le courant  $I_{ds}$  modifie son allure en augmentant avec la tension  $V_{ds}$  mais pas de la même manière que précédemment (région linéaire). On remarque, dans cette région, que le courant  $I_{ds}$  augmente progressivement jusqu'à une valeur limite, c'est le régime du pincement.
- La troisième zone est la zone de saturation ou bien de fonctionnement saturé, c'est-à-dire que le courant devient indépendant de la tension de drain  $V_{ds}$ .

### **III. 3. 2. Description**

#### **a. Zone linéaire**

La zone linéaire est appelée également zone ohmique, où le courant de drain ( $I_{ds}$ ) varie de manière quasi-linéaire pour de faibles valeurs de tension de drain. En effet, pour ces faibles valeurs de  $V_{ds}$ , le canal reste de section sensiblement uniforme sous le contrôle de la grille. Ce qui fait que le transistor est assimilable à une résistance variable dont la valeur est contrôlée par la tension de grille. Sachant que le courant  $I_{ds}$  atteint son maximum pour une tension de grille égale à zéro.

#### **b. Zone de pincement**

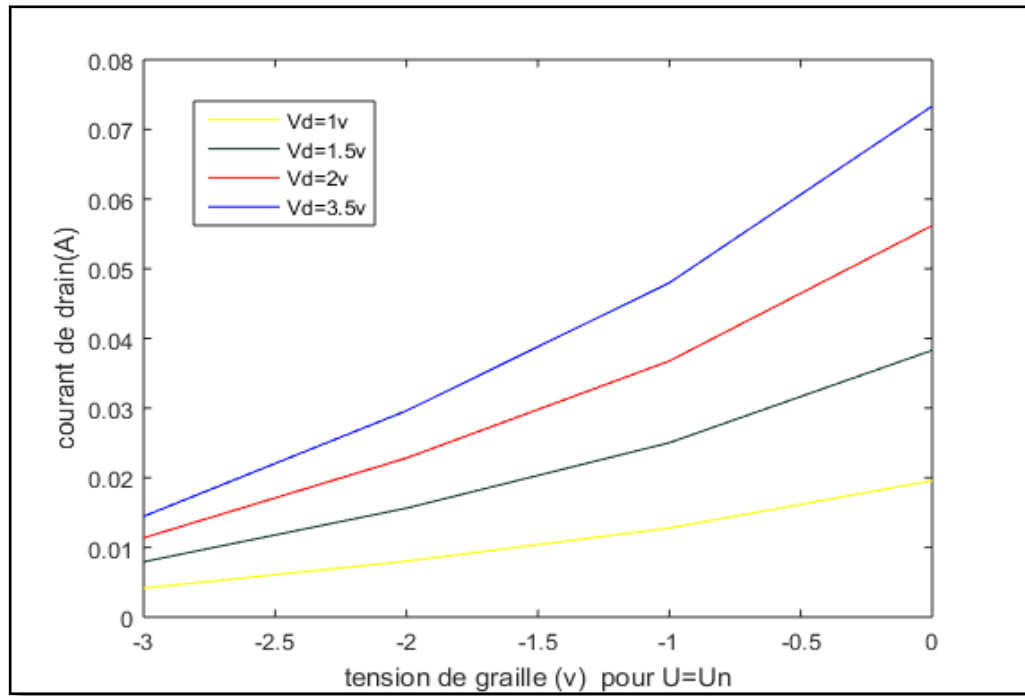
Au fur et à mesure que la tension de drain augmente, la section de la zone dépeuplée (zone de charge d'espace) commence à changer, tel que côté drain devient beaucoup plus important que côté source. Ce pincement du canal provoque un ralentissement du courant  $I_{ds}$  pour certaine valeur de  $V_{ds}$ .

#### **c. Zone de saturation**

L'augmentation de la tension de drain  $V_{ds}$  n'a pratiquement aucune influence sur le courant de drain  $I_{ds}$ , lorsque ce dernier commence à rentrer dans la zone de saturation.

### **III. 3. 3. Caractéristiques électrique $I_{ds} = f(V_{gs})$ , pour différentes valeurs de $V_{ds}$**

La figure III-5 montre les caractéristiques électriques courant-tension du courant de drain  $I_{ds}$  en fonction de la tension de drain  $V_{ds}$ , pour différentes valeurs de  $V_{gs}$ .



**Figure (III-21) :** Caractéristiques  $I_{ds}$  en fonction de  $V_{gs}$ , pour différentes valeurs de  $V_{ds}$ , pour une mobilité  $\mu_n$

Nous remarquons que lorsque la tension de drain  $V_{ds}$  est constante, le courant de drain  $I_{ds}$  atteint sa valeur maximale pour une tension de grille nulle, puis il diminue avec la tension de grille  $V_{gs}$  jusqu'à son annulation pour des tensions de grille égales ou inférieures à la tension de seuil.

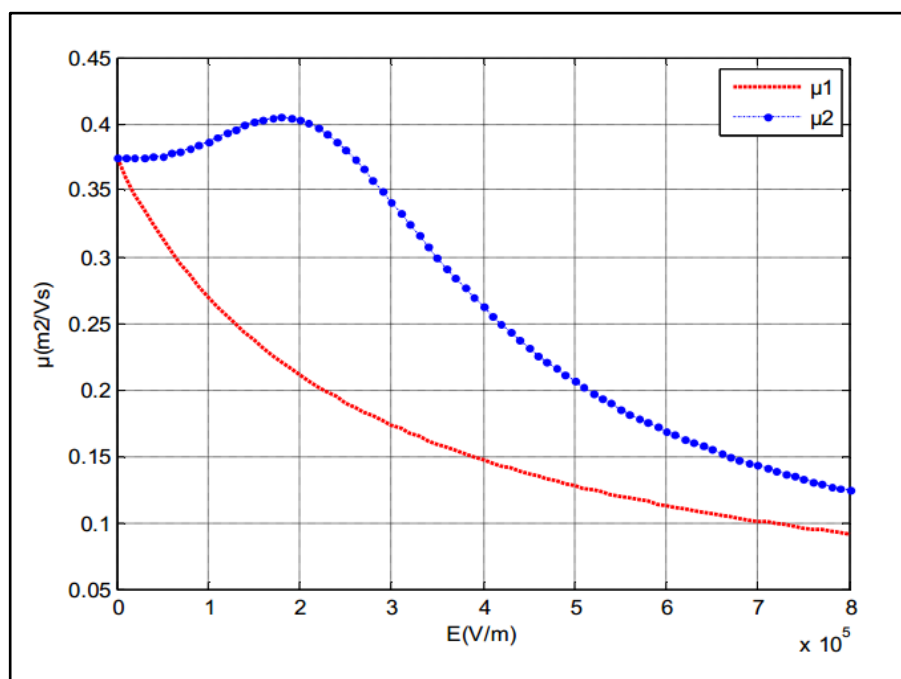
#### III. 4. Caractéristique de la vitesse des porteurs en fonction du champ électrique

La caractéristique de la vitesse des porteurs en fonction du champ électrique  $E$  est fondamentale pour déterminer l'amplitude du courant qui peut circuler dans un composant. En principe, on souhaite une forte mobilité associée à une forte vitesse de saturation.

Les variations de la mobilité et de la vitesse des électrons en fonction du champ électrique  $E$  à une température de  $300^\circ\text{K}$  (expressions (II-40), (II-41), (II-42) et (II-43)), sont représentées dans les figures III-6 et III-7, respectivement.

### III. 4. 1. Variation de la mobilité en fonction du champ électrique $E$

La variation de la mobilité des électrons en fonction du champ électrique appliqué à la température ambiante est donnée sur la figure III-6.



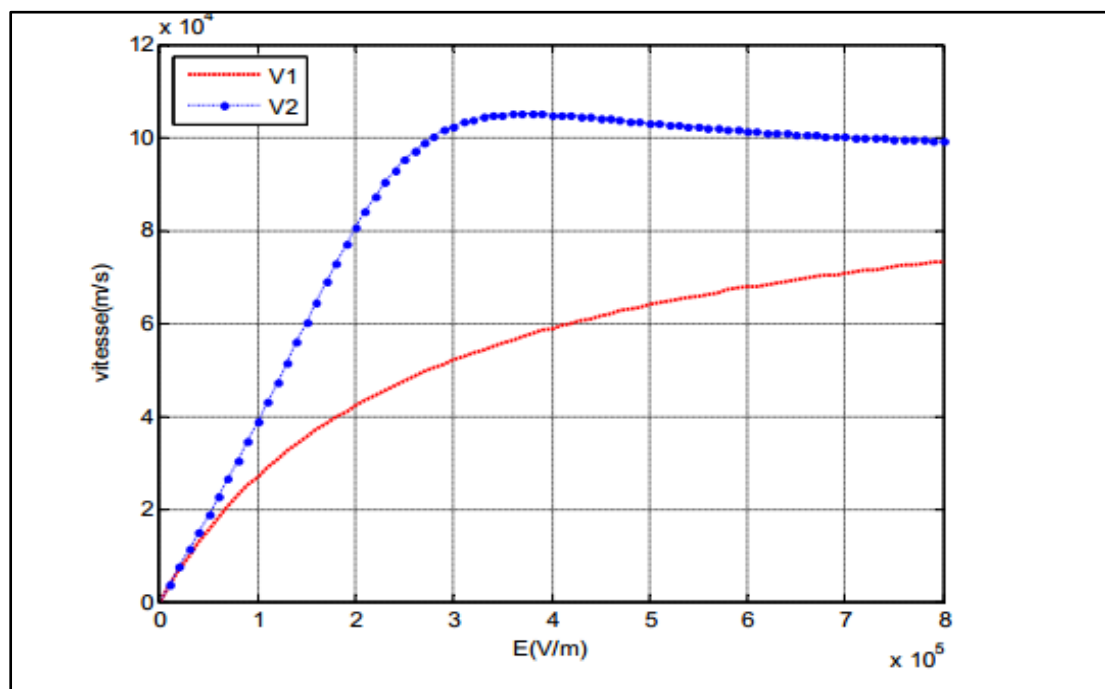
**Figure (III-22):** Variation de la mobilité des électrons en fonction du champ électrique

Nous remarquons, dans cette figure, que la mobilité des électrons est presque constante tant que le champ électrique est inférieur à une valeur définie, puis elle décroît au fur et à mesure que le champ électrique augmente au-delà de cette valeur. En effet, la mobilité atteint une valeur de  $4000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  pour une valeur du champ électrique de  $2 \cdot 10^5 \text{ V/m}$ . Puis elle décroît jusqu'à une valeur de  $1250 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  quand le champ électrique atteint une valeur de  $8 \cdot 10^5 \text{ V/m}$ .

Lorsqu'on soumet un matériau à un champ électrique, les électrons sont accélérés par ce champ. Mais ils sont soumis aux interactions avec les atomes du matériau et perdent leur mobilité lors de chocs avec les atomes.

### III. 4. 2. Variation de la vitesse en fonction du champ électrique E

La figure III-7 présente la variation de la vitesse des électrons en fonction du champ électrique appliqué à la température ambiante.



**Figure (III-23) :** Variation de la vitesse des électrons en fonction du champ électrique

Sur cette figure, nous constatons que la vitesse des porteurs présente une valeur maximale pour une valeur de seuil du champ électrique notée  $E_s$ . La valeur du champ électrique, pour laquelle se produit la saturation de la vitesse des électrons, est très importante puisqu'elle traduit les phénomènes d'accélération des porteurs jusqu'au régime de saturation.

Lorsque le champ électrique devient important, les interactions des porteurs avec les vibrations du réseau entraînent une diminution de la mobilité des porteurs (figure III-6), cette diminution de la mobilité se traduit par une variation non linéaire de la vitesse des porteurs.

### III. 5. Conclusion

Ce dernier chapitre présente l'ensemble des résultats de simulation des caractéristiques statiques des transistors MESFETs GaAs. Au cours de cette présentation, l'interprétation des résultats obtenus est faite.

## *Conclusion générale*

Nos résultats obtenus ont été rappelés dans les conclusions partielles des trois chapitres du mémoire.

Dans un premier temps, il est utile de rappeler les plus importants d'entre eux. Ainsi, nous avons présenté une analyse des performances des composants à effet de champ pour des applications hautes fréquences et hautes puissances. Cette analyse a montré que le MESFET GaAs est le composant à effet de champ prépondérant pour l'amplification de puissance micro-onde.

En effet, l'étude des propriétés de transport électronique de l'Arséniure de Gallium a prouvé que la mobilité et la vitesse des électrons du GaAs le qualifient comme matériau de haute fréquence.

Ensuite, une étude du principe de l'hétérojonction métal-semi-conducteur est établie pour introduire la structure et le principe de fonctionnement du transistor MESFET GaAs.

L'ensemble des équations qui définissent les phénomènes physiques liés au transistor MESFET GaAs sont définies. Ces équations nous ont permis de :

- tracer la variation du courant de drain en fonction de la tension  $V_{ds}$ , pour différentes valeurs de  $V_{gs}$  ;
- tracer la variation du courant de drain en fonction de la tension  $V_{gs}$ , pour différentes valeurs de  $V_{ds}$  ;

tracer l'effet de la mobilité et la vitesse des électrons en fonction du champ électrique.

## Références Bibliographiques

- [1] W.SHOCKLEY. "A unipolar field effect transistor". Proc. Of the IRE, vol .40, pp.1365-1376, 1952.
- [2] Souad BELHOUR. "Simulation du transistor à effet de champ a grille Schottky à l'arséniure de gallium MESFET GaAs " Mémoire de magister, Université de Constantine, 2007.
- [3] BALTI Moez. "Extraction des paramètres intrinsèques des transistors à effet de champ en tenant compte des phénomènes de propagation". Thèse de doctorat, Université de CERGY-PONTOISE, 2005.
- [4] BENBOUZA Mohamed Salah. "Conception assistée par ordinateur des circuits intégrés MESFET GaAs". Thèse de Doctorat, Université de Batna.
- [5] CHEDLY Rejeb. "Contribution à la caractérisation des effets d'une irradiation aux électrons sur les propriétés optiques et de transport électrique du GaAs". (M. Sc), Université de Sherbrooke, Juillet 1993.
- [6] Rachid KHLIL. "Étude d'un gaz bidimensionnel d'électrons dans des hétérostructures AlGaAs/GaAs par des mesures courant-tension et bruit basses fréquences en température". Thèse de Doctorat, Université de Reims, (16 mai 2005).
- [7] Samia AMOURACHE. "Modélisation du transistor à effet de champ a grille Schottky
- [8] GAMMEL.J. C, BALLANTYNE, J. M. "IEEE IEDM Tech". Dig. (1978) 120.
- [9] SUGETA.T et MIZUSHIMA.Y. "Jpn J. App. Phys". 19 (1980) 27.
- [10] UMEDA.T et CHO.Y. "Jpn J. App. Phys". 24 (1985) L367.
- [11] Christian KARL. "MESFET Models Based On GaAs". Edition 1996.
- [12] Dominique CHEVALLIER. "Puissance et dissipation ".

- [13] T.Ytterdal, M.Hurt, M.Shur,H.Park, Tsai etW.C.B.Peatman. "*High-temperature characteristics of two dimensional MESFETs*". IEEE El ect. Dev. Lett, vol 17n° 5 pp 214-216 May 1966.
- [14] Olivier VANBESIEN. "*Modèles linéaires et non linéaires des composants actifs pour la CAO. Hyper fréquences*". Cours DESS, Septembre 2003.
- [15] Mohamed Salah BENBOUZA. "*Conception assistée par ordinateur des circuits intégrés MESFET GaAs*". Thèse de doctorat, Université de Batna, 2006