



REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE DE BOUIRA

FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES  
APPLIQUEES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE  
Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Physique  
OPTION :  
Physique des Matériaux  
Thème

**Etude et simulation des propriétés bidimensionnelles du  
composant MESFET GaAs (OPFET)**

Réalisé par :  
Djouabi Imane

Devant le jury :

Président	:	Mme Ch. Boudaoud	MCB	Université de Bouira
Rapporteur	:	Mr Hamma Issam	MCA	Université de Bouira
Examineur 1	:	Mr Dj. Madi	Pr	Université de Bouira
Examineur 2	:	Mr H. Zitoune	MAA	Université de Bouira

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2021/2022

## ***Remerciement***

Avant tout, nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir aidés et de nous avoir donné la force pour achever ce modeste travail.

J'exprime ma profonde gratitude à mon promoteur **Mr. Hamma Issam**, de m'avoir encadré avec sa cordialité franche et coutumière, je le remercie pour sa patience et sa gentillesse, pour ces conseils et ces orientations clairvoyantes qui m'ont guidé dans la réalisation de ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à **Madame Ch.Boudaoud**, Professeur à l'université de Bouira, d'avoir accepté de présider le Jury de cette mémoire.

Je remercie aussi sincèrement **Mr Dj.Madi**, Professeur à l'université de Bouira, d'avoir accepté de faire partie du Jury.

Je remercie **Mr H.Zitoune**, Professeur à l'université de Bouira, d'avoir accepté de faire partie du Jury.

J'adresse mes sincères remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail. Principalement à tous mes enseignants

***Dédicace***

***Je dédie ce travail***

***A mes parents pour leurs amour, leurs  
encouragements et leurs sacrifices.***

## Résumé

L'extraordinaire croissance que connaît l'industrie des circuits intégrés repose actuellement sur la réduction de la taille des dispositifs et composants actifs tels que les transistors à effet de champ à grille Schottky à l'arséniure de gallium sont appelés MESFET GaAs. Une amélioration des paramètres physiques et géométriques des composants permettra une haute performance, Par conséquent, l'influence des paramètres physiques tels que le dopage de surface active et les lois de mobilité, ainsi que les effets des dimensions géométriques et l'effet de température seront déterminées sur les propriétés statiques de la structure. C'est dans ce contexte que nous introduisons une famille de différents transistors à effet de champ et montrer les avantages de l'utilisation des MESFET GaAs sous l'éclairage (OPFET) à hautes fréquences. Les propriétés physiques et électriques de GaAs et des contacts Schottky ont été étudiées, présentant enfin les transistors MESFET GaAs à commande optique et leurs principes de fonctionnement. Par la suite, une étude des propriétés statiques des composants OPFET nous avons conduit à définir un système général d'équations régissant le comportement des régions actives. Tout Paramètres physiques et géométriques impliqués dans le fonctionnement du modèle proposé permet l'identification et la caractérisation des transistors. Enfin, nous avons vérifié son efficacité par les études théoriques à l'aide des modèles analytiques issus de la littérature, simulants est conçu dans MATLAB qui a donné des résultats. En effet, le paramètre principal construire et simuler les caractéristiques du composant.

## Abstract

The tremendous growth in the integrated circuit industry is currently based on reduce the size of active devices and components such as effect transistors, the Schottky grid field sensors with gallium arsenide are called MESFET GaAs. The improvement of the physical and geometric parameters of the components will allow high performance. Therefore, the influence of physical parameters such as doping of the active surface and the laws of mobility, as well as the effects of geometric dimensions and the effect of temperature will be determined on the static properties of the structure. It is in this context that we introduce a family of different effect transistors and show the benefits of using MESFET GaAs in high frequency lighting (OPFET). The physical and electrical properties of GaAs and Schottky contacts were studied, finally presenting the MESFET GaAs optically controlled transistors and their operating principles. Subsequently, a study of the static properties of the OPFET components led us to define a general system of equations governing the behavior of the active regions. Everything Physical and geometric parameters involved in the operation of the proposed model identification and characterization of transistors. Finally, we checked its effectiveness by theoretical studies using analytical models from the literature, simulating is designed in MATLAB that have given results. Indeed, the main parameter Construct and simulate component characteristic.

## ملخص

يعتمد النمو الهائل في صناعة الدوائر المتكاملة حاليًا على تقليل حجم الأجهزة والمكونات النشطة مثل ترانزستورات التأثير تسمى مستشعرات حقل شبكة شوتكي بزرنبيد الغاليوم MESFET GaAs. سيسمح تحسين الخصائص الفيزيائية والهندسية للمكونات بأداء عالي. كذلك، تأثير المعلمات الفيزيائية مثل منشطات السطح النشط وقوانين التنقل، فضلًا عن آثار الأبعاد الهندسية وتأثير درجة الحرارة على الخصائص الثابتة للهيكلي. في هذا السياق، نقدم عائلة من الترانزستورات ذات التأثير المختلف. وبيان فوائد استخدام GaAs في الإضاءة عالية التردد (OPFET). تمت دراسة الخصائص الفيزيائية والكهربائية للتماس بين GaAs و Schottky، وقدمت أخيرًا ترانزستورات MESFET GaAs التي يتم التحكم فيها ضوئيًا وكذا مبادئ التشغيل الخاصة بها. بعد ذلك، قادتنا دراسة الخصائص الثابتة لمكونات OPFET إلى تحديد نموذج عام من المعادلات التي تحكم سلوك المناطق النشطة. كذلك كل الخصائص الفيزيائية والهندسية التي يتضمنها النموذج المقترح تسمح بتحديد ووصف الترانزستورات. أخيرًا، تحققنا من فعاليته من خلال دراسات نظرية باستخدام نماذج تحليلية ومحاكاة مصممة في MATLAB التي أعطت نتائج. في الواقع وهو المعيار الرئيسي لبناء ومحاكاة خصائص الجهاز.

## Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

### **Chapitre I : Généralités sur le composant MESFET GaAs (OPFET)**

I.1 Introduction .....	3
I.2 État de l'art des transistors à effet de champ .....	3
I.2.1 Le transistor à effet de champ à jonction (JFET).....	3
I.2.2 Principe de fonctionnement.....	5
I.3 Transistor à effet de champ à grille Métal-oxyde (MOSFET).....	6
I.3.1 Principe de Fonctionnement du MOSFET.....	7
I.3.1.1 Principe de Fonctionnement de MOSFET à canal N (NMOS).....	8
I.4 Le HEMT.....	9
I.4.1 Structure de HEMT.....	9
I.4.2 Principe de fonctionnement de HEMT.....	10
I.5 Transistor à effet de champ à contact Schottky (MESFET).....	10
I.5.1 Structure du MESFET.....	11
I.5.2 La structure cristalline de GaAs.....	11
I.5.3 La diode Schottky.....	12
I.5.4 Principe de fonctionnement de MESFET.....	14
I.5.5 MESFET sous l'éclairage.....	16
I.5.5.1 Structure de MESFET sous l'éclairage.....	17
I.5.5.2 Principe de fonctionnement .....	17

### **Chapitre II : Modélisation du MESFET optique GaAs(OPFET)**

II.1 Introduction.....	18
II.2 Répartition uniforme de la charge.....	18
II.3 Mécanisme de transport de porteurs de charges.....	18
II.4 Transistor à effet de champ optique à barrière de Schottky MESFET (OPFET).....	19

II.5 La durée de vie des porteurs minoritaires sous l'effet de la lumière.....	20
II.6 La tension photo-tension.....	21
II.7 Effet de mobilité variable.....	23
II.8 Effet de la température.....	23
II.9 Calcul de potentiel et du champ électrique.....	24
II.9.1 Résolution d'équation de poisson.....	26
II.9.2 Détermination du terme unidimensionnel du potentiel.....	27
II.10 Courant de drain dans le canal.....	29
II.11 Conductance $g_{d\ op}$ et transconductance $g_{m\ op}$ .....	32
II.11.1 Conductance $g_{d\ op}$ .....	32
II.11.2 Transconductance $g_{m\ op}$ .....	32
II.12 Détermination des capacités $C_{gs\ op}$ , $C_{gd\ op}$ .....	32

### **Chapitre III : Résultat et discussion**

III.1 Introduction.....	34
III.2 Logiciel de simulation.....	34
III.3 Les résultats de simulation.....	34
III.4. Caractéristiques statiques $I-V$ .....	35
III.4.1 Courant de drain $I_d$ .....	35
III.4.2 Effet des paramètres géométriques et physiques sur les caractéristiques $I-V$ .....	37
III.5 Caractéristiques capacités $C-V$ .....	40
III.5.1 Capacités grille-source « $C_{gs\ op}$ » et grille-drain « $C_{gd\ op}$ ».....	41
III.6 Effet de température.....	42
III.6.1 Effet de température sur la caractéristique $I-V$ .....	42

III.6.2 Effet de température sur la caractéristique $C-V$ .....	43
III.7 Transconductance $g_{mop}$ et Conductance de drain $g_{dop}$ .....	45
a. Transconductance $g_{mop}$ .....	45
b. Conductance de drain $g_{dop}$ .....	45
<b>Conclusion générale</b> .....	47
<b>Références Bibliographiques</b>	

# **Introduction générale**

## Introduction générale

La demande sans cesse croissante d'une utilisation plus large de moyens de communications lance des défis importants pour développer les systèmes de communication notamment les systèmes de communications optiques ou l'interaction de la lumière avec des dispositifs actifs joue un rôle principal dans ces applications. Parmi ces dispositifs, les transistors à effet de champ à barrière Schottky optique et particulièrement le MESFET GaAs sous l'éclairage nommé OPFET qui est utile pour les applications à haute vitesse.

Pour l'évaluation de performance d'un transistor à effet de champ il faut étudier ses caractéristiques et optimiser des structures par la simulation en cadre de la modélisation physique.

L'objectif de ce travail est de faire une étude sur le transistor à effet de champ MESFET a base de l'arséniure de gallium GaAs sous la lumière (OPFET) et de simuler leurs propriétés physiques, par la suite nous étudions l'effet de la température sur les propriétés physiques et géométriques du composant.

Ce mémoire s'organise en trois chapitres :

Au premier chapitre, nous avons étudié les propriétés physiques et électriques de l'arséniure de gallium, suivi d'une présentation du contact Schottky, après nous avons présenté les types de transistor à effet de champ JFET, MOSFET, HEMT, MESFET. Ensuite, nous montrons les caractéristiques importantes de MESFET GaAs et le principe de fonctionnement dans les régions linéaires et saturées. Enfin, nous précisons l'étude sur l'éclairage de MESFET GaAs et leur principe de fonctionnement.

Le deuxième chapitre est basé sur la présentation d'un modèle analytique dont le but est de décrire les phénomènes physiques régissant le comportement du MESFET GaAs optique (OPFET), et reconnaître l'influence des paramètres physiques et géométriques sur le composant, ainsi en introduisant l'effet de la température sur La largeur de la bande d'énergie interdite  $E_g$  du matériau semi-conducteur, La mobilité des porteurs et la vitesse de saturation par le modèle de Varshni.

Le troisième chapitre présente un logiciel de simulation MATLAB pour élaboré à partir des équations établies dans le deuxième chapitre en présentant l'ensemble des résultats de simulation des caractéristiques statiques des transistors MESFET GaAs optique (OPFET). Nous déterminons l'effet des paramètres physiques et géométriques sur les

caractéristiques (I-V) ainsi que une étude sur l'optimisation de performance par l'obtention des résultats de l'influence de la température sur les composants MESFET GaAs (OPFET) sous la lumière .

**Chapitre I**  
**Généralités sur le composant**  
**MESFET GaAs optique**  
**(OPFET)**

# Chapitre I Généralités sur le composant MESFET GaAs (OPFET)

---

## I.1 Introduction

L'OPFET basé sur l'arséniure de gallium GaAs est l'un des dispositifs les plus appréciés des transistors à effet de champ optique à grande échelle, ces matériaux ont des propriétés électroniques exceptionnelles. Ils sont largement utilisés pour les transistors RF haute puissance et les applications rapides car ils permettent des tensions d'alimentation élevées et des applications à haute température et en particulier possèdent une bonne conductivité thermique, l'OPFET GaAs a été étudié car leurs applications potentielles en tant qu'amplificateurs et photodétecteurs à commande optique qui nécessitent la compréhension d'une étude de l'effet photonique dans plusieurs facteurs tels que l'effet de la température, de sorte que ce facteur peut envisager leur influence sur le comportement de l'appareil. Un modèle analytique simple d'un MESFET GaAs est utile pour la conception assistée par ordinateur et pour les composants de circuits intégrés (CI). Plusieurs groupes de recherche ont étudié le fonctionnement des transistors MESFET à des températures de 300 à 400° [1] [2]. Des efforts considérables ont été faits pour améliorer les performances en puissance et en fréquence des GaAs-MESFET [3]. La recherche dans ce domaine ayant énormément augmenté, on voit l'émergence d'un grand nombre d'applications diverses telles que ; le contrôle optique des systèmes hyperfréquences, les réseaux d'antennes fibrées, l'électronique d'armement, l'utilisation de composants ou de systèmes optoélectroniques dans les dispositifs hyperfréquences est devenue une réalité commerciale. Dans ce mémoire, nous avons introduit dans notre modèle thermique qui prend en compte les effets de la température sur le photoconducteur et le photovoltaïque qui déterminent les caractéristiques de l'appareil dans les conditions d'éclairage. Les principaux facteurs les plus importants responsables de l'évolution des performances de l'OPFET avec la température sont l'énergie de la bande interdite, la mobilité électronique, la vitesse de saturation et la tension de seuil. Le modèle est ensuite étendu pour évaluer les caractéristiques C–V.

## I.2 État de l'art des transistors à effet de champ

### I.2.1 Le transistor à effet de champ à jonction (JFET)

Le transistor à effet de champ à jonction JFET est un composant de structure plane, il comporte trois électrodes :

- ❖ Une électrode par laquelle les porteurs entrent dans le canal : la source.
- ❖ Une électrode par laquelle les porteurs quittent dans le canal : Drain.
- ❖ Une électrode de commande ou est appliqué une tension : Grille.
- ❖ La section de semi-conducteur située sous la grille est appelée le canal.

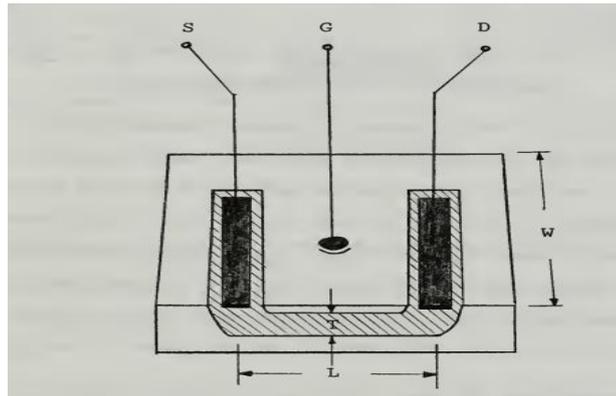


Figure I-1 : structure de transistor JFET [4].

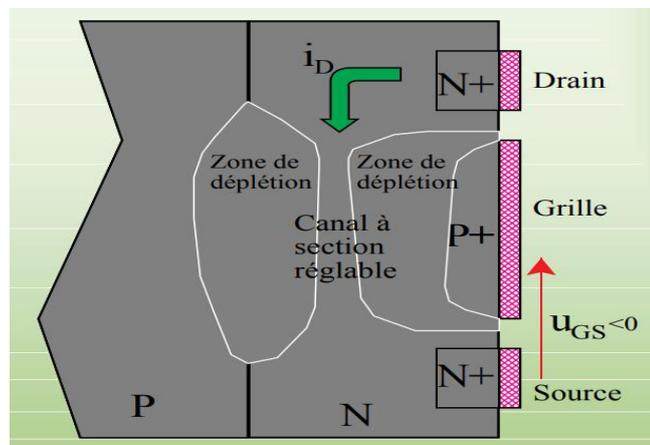


Figure I-2 : .Coupe schématique du JFET [5]

Il existe deux transistors JFET :

❖ A canal N :

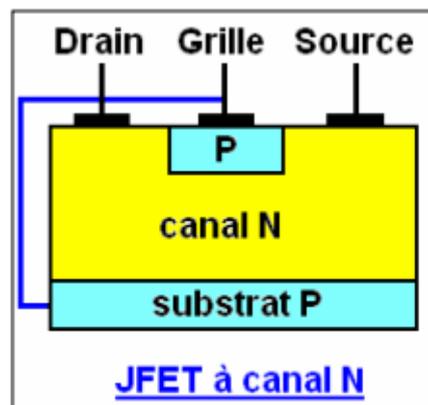


Figure I-3 : Structure de JFET à canal N [6]

❖ A canal P :

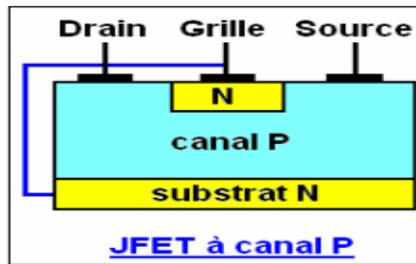


Figure I-4 : Structure de JFET à canal P [6]

## I.2.2 Principe de fonctionnement

En fonctionnement normal, la jonction grille-canal est une jonction PN polarisée en inverse donc le courant crée dans le canal est modulée par la tension de grille.

Supposons la tension de drain  $V_{ds}$  constante et faible, la tension de grille  $V_{gs}$  règle le courant de drain  $I_d$  circulée dans le transistor ;

❖ Pour  $V_{gs}=0$  V,  $I_d$  est maximal, le canal n comporte comme une résistance ohmique et la caractéristique  $I(V)$  est linéaire.

❖

❖ Pour une large valeur négative de  $V_{gs}$ , le régime est pincé donc le courant  $I_d$  devient zéro.

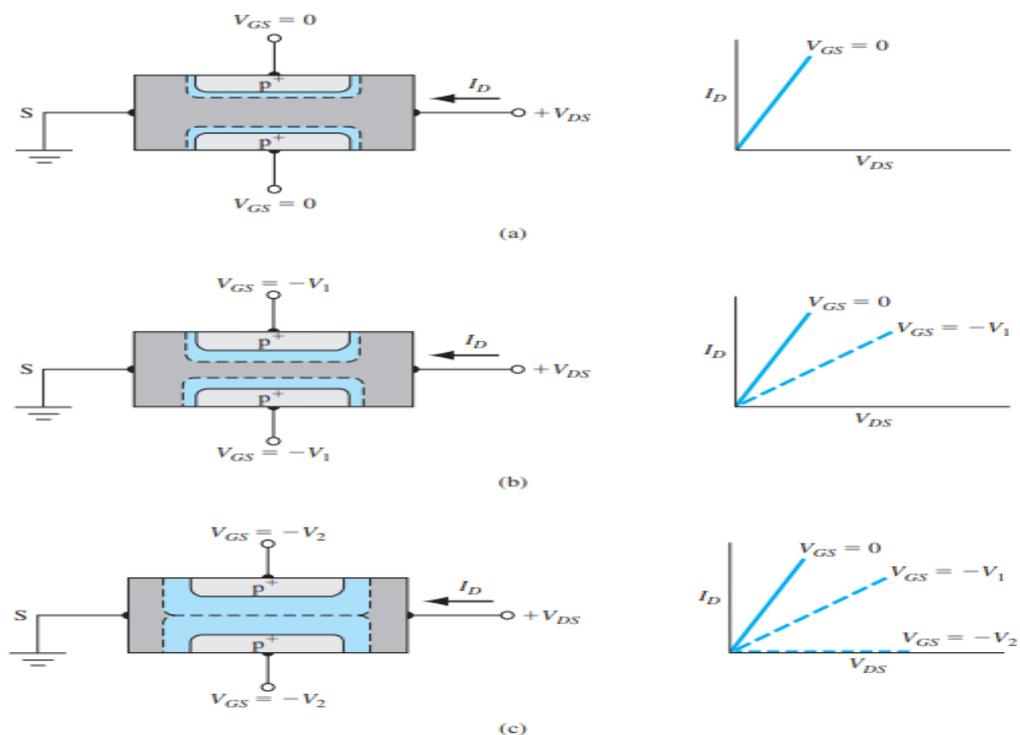


Figure I-5 : la zone de charge d'espace et la caractéristique courant –tension  $I(V)$  pour 3 cas :

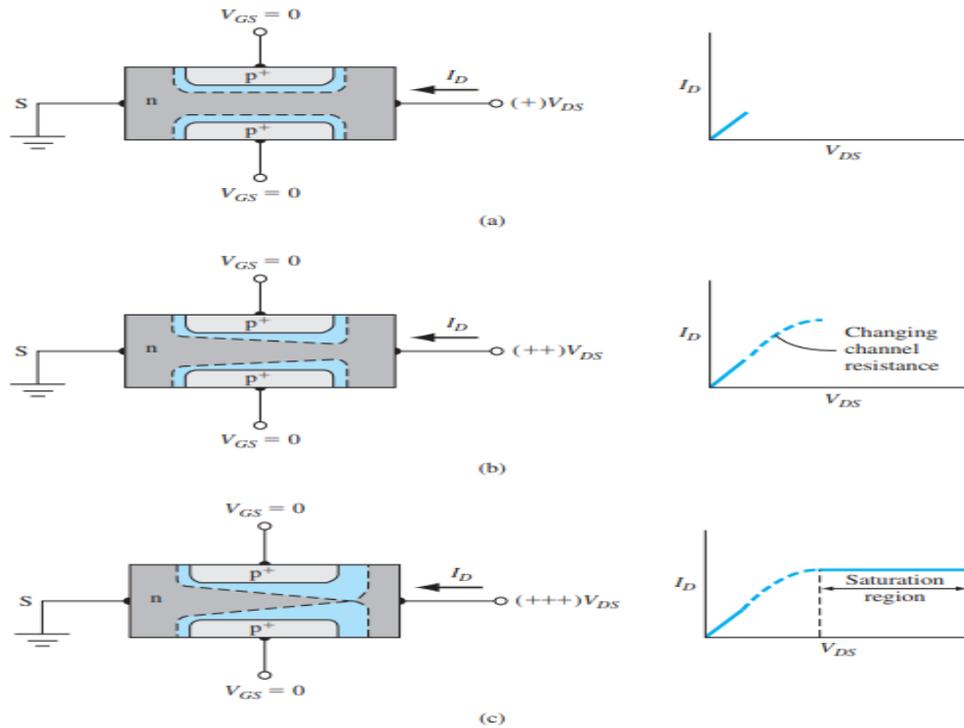
(a)  $V_{GS}=0$  et (b) des valeurs faibles de  $V_{GS}$ , (c) pour  $V_{GS}= V_p$  [7]

# Chapitre I Généralités sur le composant MESFET GaAs (OPFET)

Maintenant, supposons  $V_{GS} = 0\text{ V}$  et  $V_{DS}$  est modifiée.

Lorsque la tension  $V_{DS}$  augmente, le canal comporte comme une résistance et la tangente de caractéristique  $I(V)$  diminue.

Pour une valeur  $V_p$  suffisamment négative de  $V_{GS}$ , la conduction s'annule, on dit que le canal est pincé et que  $V_p$  est la tension de pincement [8].



**Figure I-6** : la zone de charge d'espace et la caractéristique courant –tension  $I(V)$  lorsque  $V_{GS} = 0\text{ V}$  pour les trois cas : (a) et (b) des valeurs faibles de  $V_{GS}$ , (c)  $V_{GS} = V_p$  [7].

## I.3 Transistor à effet de champ à grille Métal-oxyde (MOSFET)

Il y a un autre type de transistor c'est le transistor à effet de champ à grille isolée MOSFET (acronyme en anglais Métal Oxyde Field Effect Transistor). Le MOSFET est utilisé dans les circuits numériques intégrés CMOS (Complementary Métal Oxyde Semi-conducteur) qui englobe plus de 80% de la production mondiale et circuits intégrés grâce aux qualités de faible taille et de faible consommation [9]. Le principe de fonctionnement de MOSFET est similaire à celle de JFET avec certaine différence. Il comporte quatre accès : la **source** et le

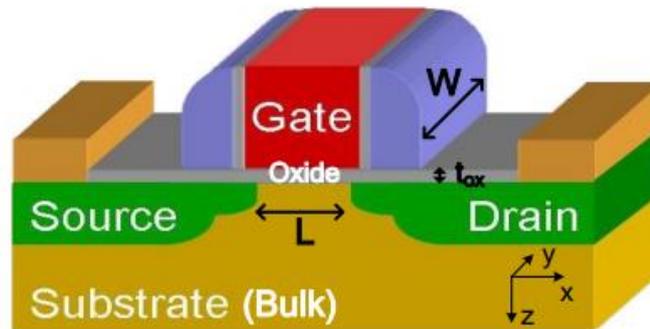
# Chapitre I Généralités sur le composant MESFET GaAs (OPFET)

**drain**, deux ilots de type opposé à celui de substrat, la grille, une couche d'aluminium déposé sur une très fine couche d'oxyde ( $SiO_2$ ) qui est un fort isolant électrique.

Il ya deux types de MOSFET [10] :

- ❖ MOSFET à appauvrissement D-MOSFET.
- ❖ MOSFET à enrichissement E-MOSFET.

Et dans chaque type on peut distinguer le MOSFET à canal N dont les porteurs sont des électrons et le MOSFET à canal P dont les porteurs sont des trous.



**Figure I-7 : Transistor MOSFET en 3D [11]**

La figure I-7 représente la structure de MOSFET ou  $t_{ox}$  est l'épaisseur d'oxyde, W, L sont respectivement la largeur et la longueur de la grille.

## I.3.1 Principe de Fonctionnement du MOSFET

La tension de grille permet de créer des porteurs de charges à l'interface de l'oxyde. Le transistor MOSFET fonctionne de différents modes en fonction de tension de grille (Tableau I-1) [11] :

- ❖ Lorsque  $V_{gs} < 0$ , il provoque un grand déplacement des trous à l'interface générant un excès des porteurs positive ; **l'accumulation.**
- ❖ Lorsque  $V_{gs} = 0$ , les atomes restent dans l'état naturel (sans excitation) ; **la déplétion.**
- ❖ Lorsque  $V_{gs} > 0$  il provoque une accroissance de la concentration d'électrons ; **l'inversion de charge.**

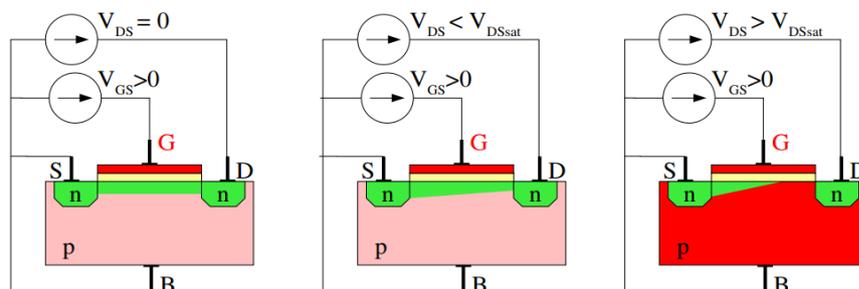
**Tableau 1-1 : Mode de fonctionnement du transistor MOSFET**

Accumulation	Déplétion	Appauvrissement	Inversion de charge
$V_{GS} < 0$	$V_{GS} = 0$	$V_{GS} > 0$	$V_{GS} \gg 0$

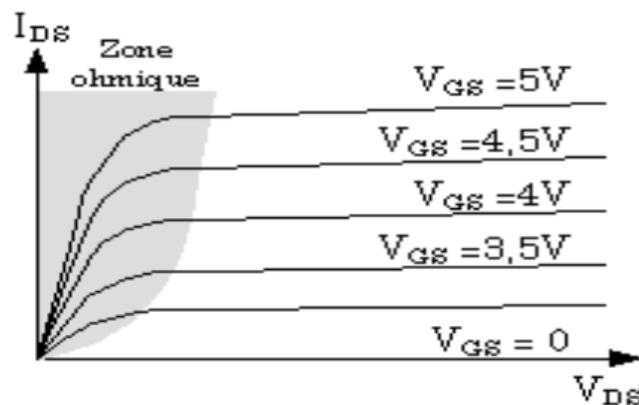
### I.3.1.1 Principe de fonctionnement de MOSFET à canal N (NMOS)

Supposons  $V_{gs} > 0$ , lorsqu'on applique une tension  $V_{ds}$ , le canal réduit du côté du drain [12].

- ❖ Pour  $V_{ds} < V_{dsat}$  : le régime de fonctionnement de NMOS est linéaire.
- ❖ Quand  $V_{ds}$  augmente au-delà de  $V_{dsat}$ , le canal est pincé, le transistor fonctionne en saturation et la valeur de courant  $I_{ds}$  dépend de  $V_{gs}$  (voici figure I-9).



**Figure I-8 : fonctionnement de transistor NMOS [12]**



**Figure I-9 : Caractéristique de sortie du MOS canal N [13]**

## I.4 Le HEMT

Cette nouvelle famille de transistor qui nommé HEMT (High electron mobility transistor) est apparus en 1980 par les équipes de THOMSON CSF [14] et de FUJITSU [15]. Il utilise dans les applications militaires, le radiotélescope, les récepteurs de télévision pour capter les signaux des satellites grâce au ces caractéristiques faibles en bruit [16].

### I.4.1 Structure de HEMT

La structure de HEMT est présentée dans la figure I-13 :

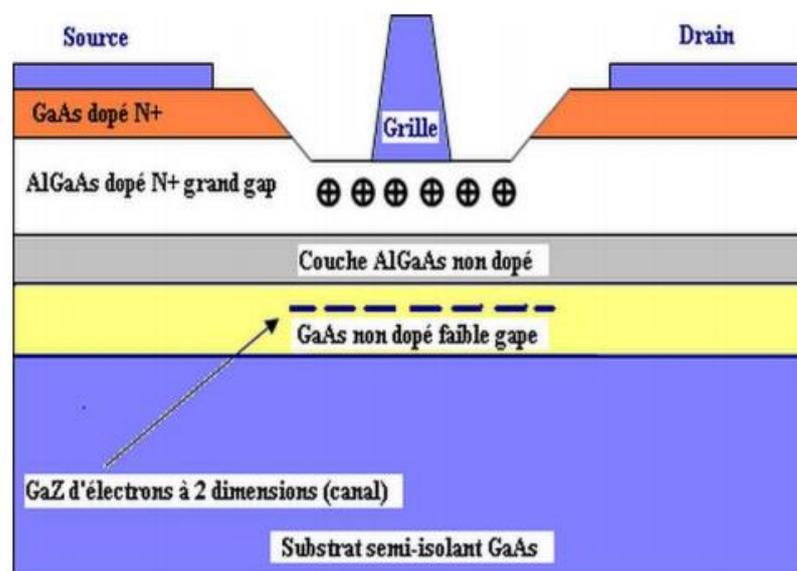


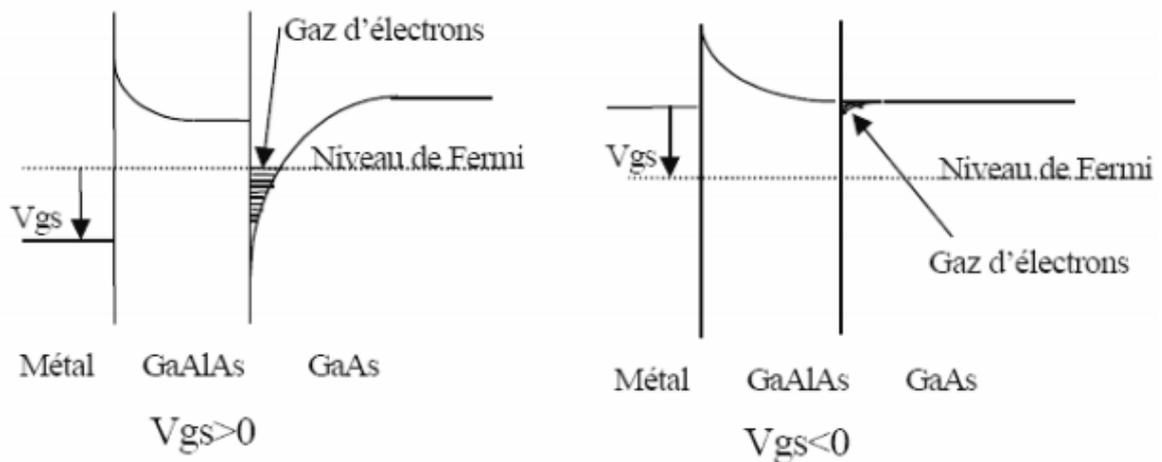
Figure I-13 : la structure de HEMT [18]

- ❖ La couche de contact ohmique : c'est un matériau fortement dopé à petit gap (ici GaAs n+) qui forme des contacts ohmiques de source et de drain de faible résistivité.
- ❖ Une couche qui est formée d'un semi-conducteur grand gap (AlGaAS n+) qui
- ❖ L'espaceur, constitué du même matériau à grand gap de la couche précédente à une épaisseur d'environ 5 nm.
- ❖ Le canal, composé d'un matériau à petit gap (ici GaAs) non dopé qui permet à un déroulement rapide des électrons grâce à la mobilité très élevée.
- ❖ Toutes ces couches sont épitaxiales sur un substrat semi-isolant (ici GaAs).

## I.4.2 Principe de fonctionnement de HEMT

Pour améliorer la performance de transistor, la position des couches dans HEMT sert à séparer les donneurs ionisés des électrons libres du canal.

Le fonctionnement de HEMT est illustré par le diagramme de bande figure I-14 :



**Figure I-14** : influence de la polarisation de grille sur le diagramme de bande [18].

Le contact de grille (contact Schottky) crée une zone dépeuplée dont l'épaisseur varie en fonction de la tension de grille  $V_{gs}$ .

Lorsque  $V_{gs}$  augmente, la profondeur de puits de potentiel aussi augmente, ce qui conduit à une diffusion de nombreux électrons dans le GaAs.

Lorsque la tension  $V_{gs}$  suffisamment négative, la zone dépeuplée atteint le substrat par conséquent le courant est annulé, on dit alors que le canal est pincé.

## I.5 Transistor à effet de champ à contact Schottky (MESFET)

Le transistor à effet de champ à barrière Schottky à l'arséniure de gallium est un des composants majeur utilisés dans la technologie micro-onde et dans les circuits intégrés, les circuits de petits signaux et dans les amplificateurs des puissances (oscillateur, commutateur, mixeur, atténuateur) [17] [18]. Il a été proposé par LARVER MEAD en 1966 [19] et produit par HOOPER et LEARER [20].

### I.5.1 Structure du MESFET

La structure de base du MESFET est très similaire à celle du MOSFET [21] mais sur un substrat semi-isolant distingué par une grande résistivité  $\rho \geq 10^7 \Omega.cm$ , on implante un canal conducteur appelé la couche active en GaAs type -n d'épaisseur 0.2 à 0.3  $\mu m$  avec une densité des impuretés de type donneur ( $N_d = 2.10^{17} cm^{-3}$ ) [22]. Ensuite, on réalise 3 électrodes :

## Chapitre I Généralités sur le composant MESFET GaAs (OPFET)

l'électrode de grille qui est concrétisé par le contact Schottky entre deux contacts ohmiques de source et de drain [23]. En plus, pour diminuer les résistances des contacts ohmiques de source et de drain, une couche Bienne dopée ( $N_d = 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), d'épaisseur de  $0.1 \mu\text{m}$  [24].

### I.5.2 La structure cristalline de GaAs

L'arséniure de gallium GaAs est un semi-conducteur composé de Ga élément de la colonne III et As élément de colonne V du tableau périodique des éléments. L'arséniure de gallium possède une structure cristallographique de type blende (figure I-10) qui est constitué de deux sous-réseaux cubiques à face centrée (cfc) décalés par un vecteur  $a_0 \left( \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4} \right)$  avec  $a_0$  est le paramètre cristallin de GaAs.

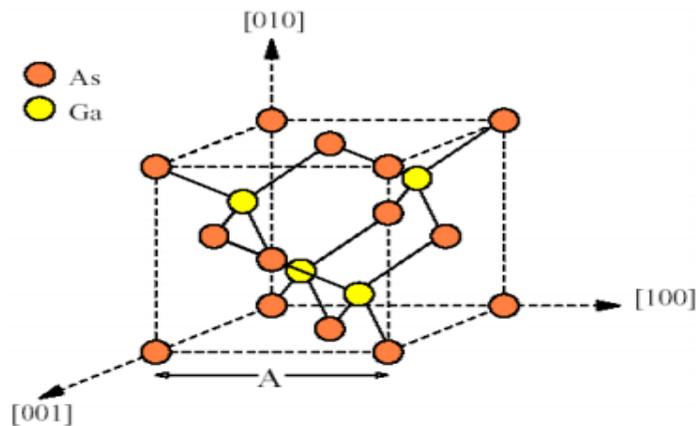
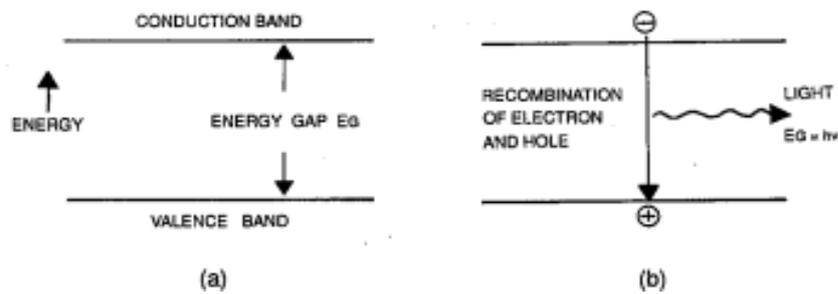


Figure I-10 : Structure cristalline du GaAs.

La structure de la bande interdite et directe de l'arséniure de gallium GaAs et la diminution résultante dans le taux de production des paires électron-trou conduit à :

- ❖ Une faible densité intrinsèque de transporteurs libres, donc, il est relativement facile d'ajouter dopants pour compenser ces porteurs et produire des semi-isolants (SI) de GaAs qui est très utile pour isoler les appareils adjacents et résister aux dommages causés par le rayonnement.
- ❖ Une recombinaison directe des électrons et des trous avec l'émission de lumière [25] de longueur d'onde susceptible d'être exploitée dans l'industrie optoélectronique (figure I-11).
- ❖ Une mobilité des électrons environ cinq fois plus élevée que celle de silicium Si (Tableau I-2).
- ❖ Une grande vitesse de saturation presque deux fois celle de silicium Si, ce qui lui permet de fonctionner à des fréquences supérieures à 250 GHz [26].
- ❖ La fabrication de diode avec hauteur de barrière élevée et par conséquent la réalisation de transistor à effet de champ à jonction métal-semi-conducteur (MESFET).



**Figure I-11** : recombinaison radiative de l'électron et du trou dans le gap direct.

**Tableau I-2** : Comparaison de quelques propriétés de Si et GaAs à 300 K [27]

Matériaux	Energie de bande interdite $E_g(eV)$	Paramètre de maille ( $\text{\AA}$ )	Mobilité électronique de matériau non intentionnellement dopé ( $cm^2/V.s$ )	Mobilité des trous de matériau non intentionnellement dopé ( $cm^2/V.s$ )	Vitesse maximale électrique ( $10^7 cm/s$ )
Si	1.12	5.431	1500	450	1
GaAs	1.42	5.653	8500	400	2.1

### I.4.3 La diode Schottky

Le contact métal-semi-conducteur est un dispositif unipolaire exploité dans nombreux composants électroniques. Généralement, lorsqu'on applique une tension à une jonction métal-semi-conducteur, une caractéristique courant/tension asymétrique est créée. La structure comporte comme un redresseur [28], c'est une diode Schottky qui est nommée d'après le physicien allemand WALTER H. SCHOTTKY. Lorsque le métal et le semi-conducteur sont en contact, il existe à l'interface une barrière de potentiel  $q\phi_b$  qui est égal à :

$$q\phi_b = q\phi_m - q\chi \quad (I-1)$$

Ou :

$q\phi_m$  : représente le travail d'extraction du métal (travail nécessaire pour arracher un électron du niveau Fermi du matériau au niveau de vide).

## Chapitre I Généralités sur le composant MESFET GaAs (OPFET)

---

$q\chi$  : représente l'affinité électronique de semi-conducteur qui représente l'énergie à fournir à un électron du bas de la bande de conduction pour l'extraire du semi-conducteur et le placer dans le vide, c'est une caractéristique du matériau.

$q\phi_b$  : le potentiel de barrière de la zone de charge d'espace.

Lorsqu'on applique une tension extérieure positive (polarisation directe), les électrons de la région N de semi-conducteur vont transiter vers le métal tandis que le niveau de Fermi du système (métal-semi-conducteur) est aligné.

Dans le cas de :

**Contact redresseur :  $\phi_m > \phi_s$**

Lors de la mise en contact des deux éléments, les électrons quittent le semi-conducteur vers le métal, ce phénomène s'arrête lorsque les deux niveaux de Fermi égalisent. Une zone désertée (ZCE) apparaît dans le semi-conducteur d'épaisseur  $W$ . dans ce cas on parlera d'une diode Schottky.

Après le contact sous l'incidence de la lumière, des paires électrons-trous sont créées dans la ZCE, les électrons passent vers la bande de conduction de semi-conducteur et les trous vers le métal sous l'influence d'un champ électrique produit dans la ZCE, une phototension est agrandie ce qui amoindrit la hauteur de la barrière  $q(V_{bi} - V_{op})$ , cette tension étant polarisée en réduisant l'épaisseur de déplétion de la jonction  $W$ .

**Contact ohmique :  $\phi_m < \phi_s$**

Lors de la mise en contact des deux éléments, les électrons de métal vont transiter vers le semi-conducteur. Il apparaît une zone de manquement de porteurs négatifs dans le métal et un rassemblement de porteurs dans le semi-conducteur et donc les niveaux de Fermi s'alignent, dans ce cas, on parle d'un contact ohmique [9].

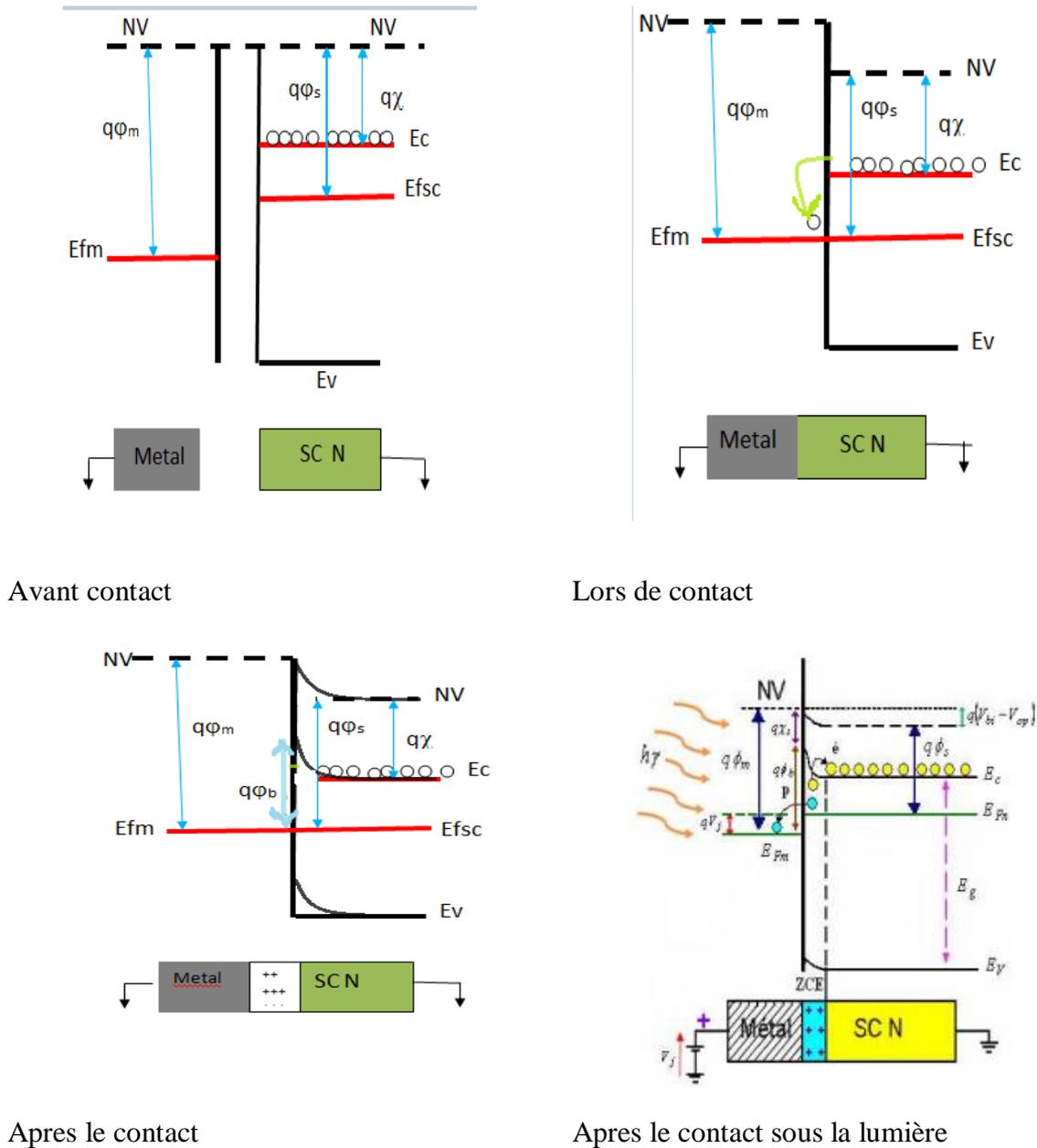


Figure I-10 : contact Schottky

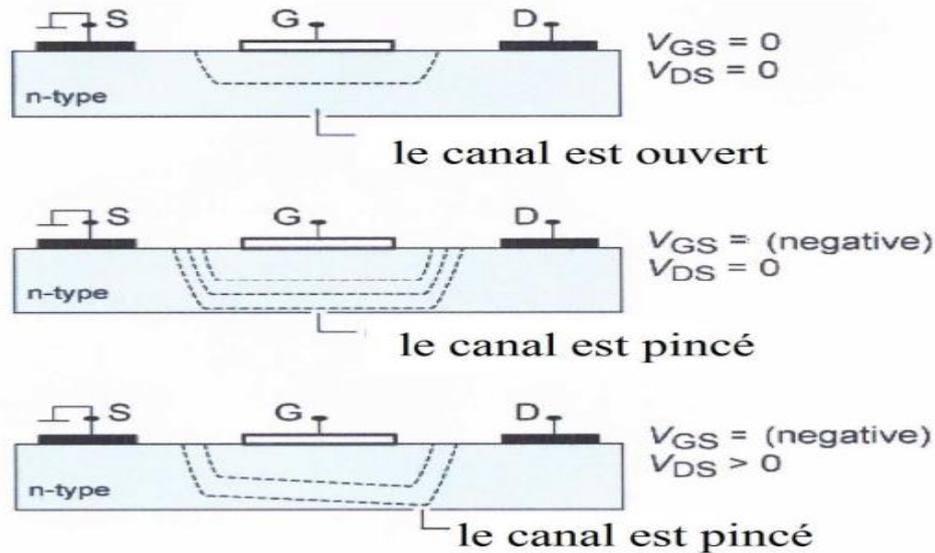
## I.5.4 Principe de fonctionnement de MESFET

Le fonctionnement du MESFET est similaire à celui de MOSFET mais le mécanisme qui cause la saturation était différent de l'un à l'autre [21]. Le principe de fonctionnement du MESFET GaAs est déterminé par la caractéristique de diode Schottky qui conduit à moduler le courant circulant entre la source et le drain. D'ailleurs la jonction métal-semi-conducteur crée une zone appauvrie sous la grille (métal) dans laquelle aucun courant ne peut passer, donc la section restante de semi-conducteur est la couche active (conductrice) ou le courant circule.

On résume le fonctionnement de MESFET par les étapes suivantes :

## Chapitre I Généralités sur le composant MESFET GaAs (OPFET)

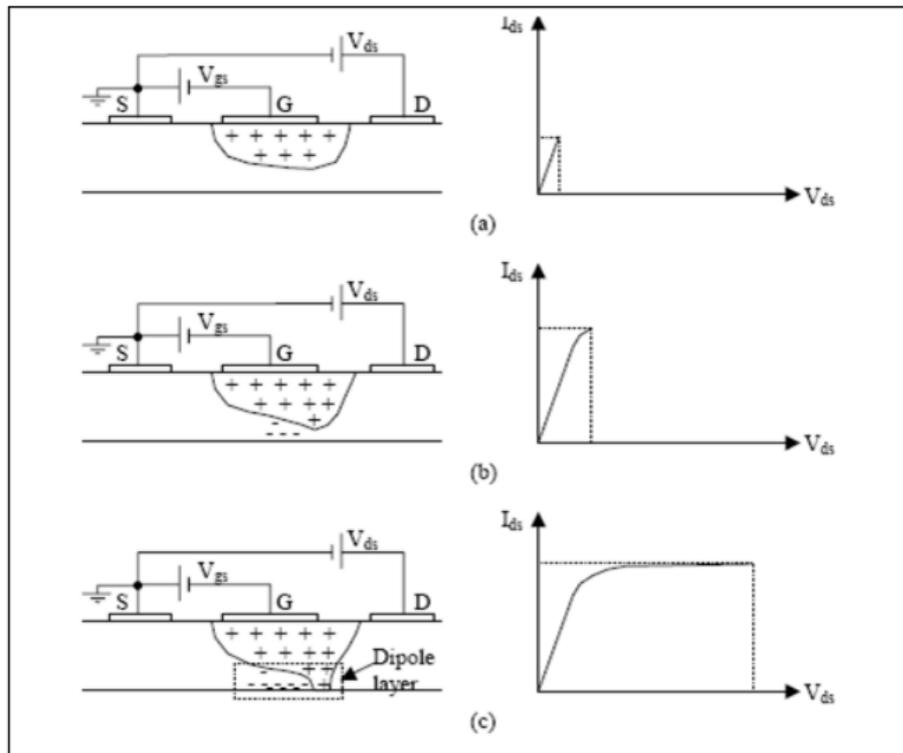
Lorsqu'on fixe la tension de drain  $V_d$ , et on polarise la grille ( $V_{gs} < 0$ ), l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) augmente, par conséquent le passage de courant dans la couche active diminue. Quand la tension de grille est raisonnablement négative la ZCE pénètre totalement le canal (figure I-10) donc le courant s'annule. On dit que le transistor est pincé.



**Figure I-10** : Pincement du canal de MESFET en fonction de  $V_d$ [29]

D'autre côté, lorsqu'on fixe la valeur de  $V_{gs}$  ( $V_{gs} \leq 0$ ) le courant de canal entre le drain et la source est contrôlé par variation de la tension  $V_{ds}$  (figure I-11). On distingue trois cas pour les caractéristiques  $I_{ds}(V_{ds})$  :

- ❖ Pour les faibles valeurs de  $V_{ds}$  ( $V_{ds} \ll V_{dsat}$ ), le courant  $I_{ds}$  est relié avec  $V_{ds}$  linéairement (figure I-11 (a)).
- ❖ Pour  $V_{ds}$  modéré ( $V_{ds} < V_{dsat}$ ), la relation entre  $I_{ds}$  et  $V_{ds}$  devient non-linéaire (figure I-11 (b)).
- ❖ Pour  $V_{ds}$  très élevé ( $V_{ds} = V_{dsat}$ ) le courant  $I_{ds}$  est constante (figure I-11 (c)).



**Figure I-11** : Principe de fonctionnement du MESFET GaAs à différentes valeurs de  $V_{ds}$  avec  $V_{gs} \leq 0$  V [30]

## I.5.5 MESFET sous l'éclairage

Lorsque la lumière pénètre les zones inter-électrodes ou la grille avec  $h\nu \geq E_g$  de semiconducteur, elle sera absorbée par le semi-conducteur cela conduit à la formation des paires électrons-trous dans la région de déplétion et suivi par diffusion des porteurs libres générés qui peuvent contribuer à la conduction dans le canal. Notons que les trous sont attirés vers le métal de grille et le substrat semi-isolant par contre les électrons sont entraînés vers le canal [30]. Donc, une photo-tension sera induit quand les porteurs sont entraînés par le champ électrique présent, alors, cette tension photonique fera diminuer l'épaisseur de la zone de charge, par conséquent, le canal sera large ce qui engendrera une croissance de courant circulant. On résulte qu' il y a deux effets participant à l'augmentation de courant entre la source et le drain de transistor : l'effet photo conducteur, c'est-à-dire la croissance de concentration des charges libres dans le canal, l'effet photovoltaïque qui amènera à agrandir largeur de canal [31].

### I.4.5.1 Structure de MESFET sous l'éclairage

# Chapitre I Généralités sur le composant MESFET GaAs (OPFET)

La sensibilité du MESFET à la lumière permet d'exploiter pour différentes applications optoélectronique. Le MESFET sous l'éclairage a été nommé OPFET (transistor à effet de champ optique), il possède une structure semblable à celle de MESFET GaAs, la figure I-12 illustre la chute verticale des faisceaux optique sur le métal de la grille semi-transparente (oxyde d'étain et d'indium ITO).

Pour cette structure, le courant circule de drain à source perpendiculairement au sens d'incidence de la lumière. Le flux de photons incident est distingué par sa densité de puissance optique  $P_{op}$  en ( $W/m^2$ ) [32].

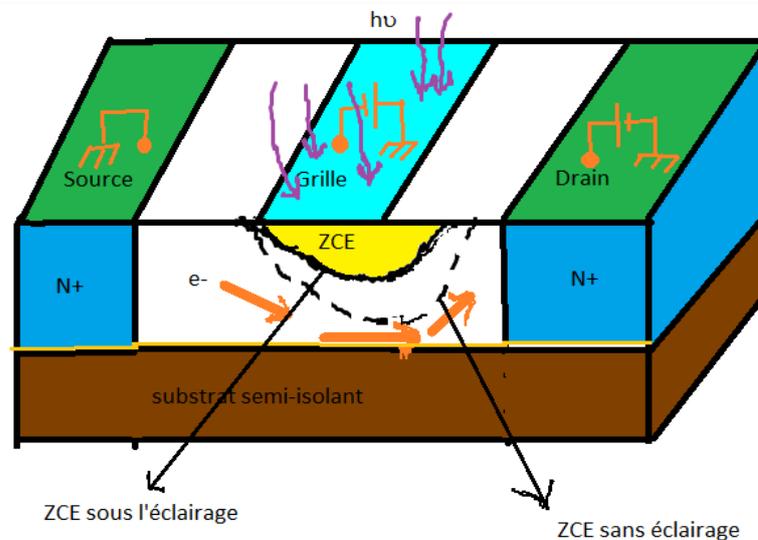


Figure I.12 : Structure du MESFET (OPFET) GaAs sous la lumière

## I.4.5.2 Principe de fonctionnement

On peut résumer le fonctionnement d'OPFET par les étapes suivantes :

- ❖ Le dispositif absorbe les photons de la lumière incidente.
- ❖ Génération des paires électrons-trous dans la zone du canal et dans la zone de charge d'espace de la jonction Schottky.
- ❖ Déplacement des électrons créés optiquement sous l'effet de la tension de drain appliquée vers le canal ou ils se contribuent au courant électrique.
- ❖ Déplacement des trous dans la direction opposée et recombinaison avec des états de surface.
- ❖ Développement de photo-tension à cause de passage des électrons de la jonction.
- ❖ Réduction de la largeur de la zone de charge d'espace en effet de cette photo-tension.

# **Chapitre II**

## **Modélisation du MESFET optique GaAS (OPFET)**

## II.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter un modèle analytique de MESFET (OPFET) en GaAs[33]. Afin de comprendre son comportement qui donne la variation de courant de drain en fonction de la tension par la loi  $I_{dsop} = f(Vg, Vd)$ . En prenant compte de l'effet de la lumière sur les propriétés du composant ainsi que l'effet de la variation de la mobilité en fonction du champ électrique[34], l'influence des paramètres géométriques et l'influence de la température sur les caractéristiques courant-tension (I-V) aussi capacitance-tension (C-V) [35].

## II.2 Répartition uniforme de la charge

Pour une région uniformément dopée  $N$ , en utilisant l'approximation de canal gradué, nous supposons que le semi-conducteur est homogène et que la densité de donneur est  $N_d$  ionisé à température ambiante et la densité des états d'interface est supposée négligeable. Nous supposons qu'il n'y a pas de porteurs libres dans la zone de charge d'espace (ZCE), nous appelons  $h(x)$  l'hauteur de cette zone qui varie graduellement entre la source et le drain, et la densité de charge dans le semi-conducteur s'écrit :

$$\rho(x, y) = q[N_D(y) - n(x, y)] \quad 0 < y < h(x) \quad (\text{II} - 1)$$

$$\rho(x, y) = 0 \quad y > h(x) \quad (\text{II} - 2)$$

$n(x, y)$  est la densité de charge libre dans la zone de charge d'espace sous la grille.

## II.3 Mécanisme de transport de porteurs de charges

Pour les cristaux semi-conducteurs isothermes, le flux de chaleur est négligeable compte tenu des gradients de potentiel et de concentration porteur, deux mécanismes peuvent être à l'origine du déplacement du porteur de charge électrique, c'est-à-dire courant de conduction et courant de diffusion. Pour le champ électrique  $E$  présent dans le semi-conducteur, il existe une densité de courant  $J_n$  et  $J_p$  lié aux électrons et aux trous. Lorsque les porteurs libres ne sont pas uniformément répartis dans le cristal, ils subissent un processus de diffusion caractérisé par un gradient de concentration des porteurs. Lorsque les deux mécanismes sont présents dans les semi-conducteur, L'équation fondamentale du transport des porteurs de charge est donnée par :

$$\text{Pour les électrons} \quad J_n = qn\mu_n E + qD_n \nabla_n \quad (\text{II} - 3)$$

Pour les trous  $J_p = qp\mu_p E + qD_p \nabla p$  (II – 4)

$\mu_n, \mu_p$  Sont les mobilités des électrons et trous par ordre

$D_n$  et  $D_p$  sont les coefficients de diffusion des électrons et des trous reliés par la relation d'Einstein :  $D_n = \frac{KT\mu_n}{q}$  ,  $D_p = \frac{KT\mu_p}{q}$  (II – 5)

Ainsi les équations de transport des porteurs de charge sont données par les équations de continuité :

Pour les électrons  $\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla J_n - G_n - R_n$  (II – 6)

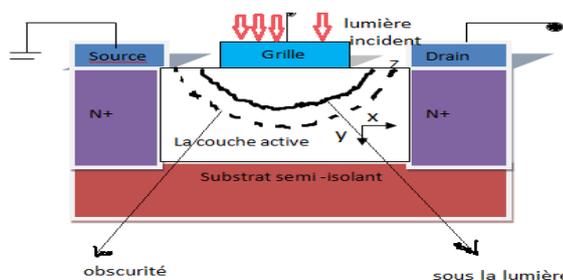
Pour les trous  $\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{-1}{q} \nabla J_p - G_p - R_p$  (II – 7)

$G_n, G_p$ : Le taux de génération recombinaison supposé identique pour les électrons et les trous: c'est la différence entre le nombre de porteurs créés et ceux qui disparaissent ou capturés pendant l'unité de temps et dans l'unité de volume:

$G = g_n(p) - r_n(p)$  (II – 8)

**II.4 Transistor à effet de champ optique à barrière de Schottky MESFET (OPFET) GaAs**

Comme un certain nombre de travaux d'études théoriques et expérimentaux ont été précisé sur OPFET GaAs. Un modèle analytique simple des ions implantés MESFET GaAs peuvent être utilisés pour la conception assistée par ordinateur composants et circuits intégrés (CI). Vérifier les propriétés optiques contrôlées de MESFET GaAs est nécessaire pour modéliser la photo détecteurs à l'aide de l'éclairage de grille du MESFET et tenir compte des effets de canal court (Voir Figure II-1).



**Figure II-1 :** Structure schématique du transistor MESFET GaAs avec un profil de couche active sous obscurité ( $P_{opt} = 0 \text{ w/m}^2$ ) et les conditions lumineuses

Dans l'analyse actuelle, le rayonnement incident a été distingué par la densité de puissance incidente optique  $P_{opt}$  (W/m<sup>2</sup>) qui subit une réflexion à la surface du métal ainsi qu'à l'interface métal-semi-conducteur. En supposant que la densité de puissance optique pour diminuer de façon exponentielle avec la profondeur de pénétration dans le semi-conducteur, les porteurs en excès générés par unité de volume à l'intérieur du semi-conducteur peuvent être s'écrit comme [36]:

$$\Delta n = G_{op} \tau_L = \frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt} \tau_L}{ah\gamma} (1 - \exp(-\alpha \cdot a)) \quad (\text{II} - 9)$$

Avec :

$G_{op}$ : Le taux de génération optique par unité de volume.

$\alpha$  : Le coefficient d'absorption optique.

$\tau_L$  : La durée de vie des porteurs minoritaires dans la condition d'illumination.

$R_m, R_s$  : Les coefficients de réflexion des surfaces métalliques et semi-conducteurs, respectivement, à la longueur d'onde de fonctionnement  $\lambda$ ,

$a$  : La largeur de la zone active,  $h$  : La constante de Planck,  $\gamma$  : La fréquence de fonctionnement.

### II.5 La durée de vie des porteurs minoritaires sous l'effet de la lumière

La durée de vie des porteurs minoritaires est affectée par les porteurs en excès générés dans la région en dessous de la grille de GaAs. La durée de vie des porteurs minoritaires sous l'éclairage  $\tau_L$  peut être s'écrit comme:

$$\tau_L = \left( \frac{n_i}{n_i + \Delta n} \right) \tau_p \quad (\text{II} - 10)$$

$n_i$  : La concentration intrinsèque des porteurs dans le semi-conducteur

$\tau_p$ : La durée de vie des porteurs minoritaires à l'équilibre.

$\Delta n$  : Les porteurs photo excédentaires générées dans le semi-conducteur.

On exprime  $\tau_L$  d'après l'association des equations (II. 10) et (II. 9) nous obtenons :

$$\tau_L = \frac{n_i \tau_p}{n_i + \frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt} \tau_L}{ah\gamma} (1 - \exp(-\alpha \cdot a))} \quad (\text{II} - 11)$$

$$\tau_L n_i + \frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}\tau_L^2}{ah\gamma} (1 - \exp(-\alpha.a)) = n_i \tau_p \quad (\text{II} - 12)$$

$$\frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}\tau_L^2}{ah\gamma} (1 - \exp(-\alpha.a)) + \tau_L n_i - n_i \tau_p = 0 \quad (\text{II} - 13)$$

Nous résolvons l'équation du deuxième degré par la formule quadratique et après quelque simplification [36] :

$$\tau_L = \frac{\left\{ 1 + \frac{4(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}\tau_p(1-\exp(-\alpha.a))}{an_i h\gamma} \right\}^{1/2} - 1}{\frac{2(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}(1-\exp(-\alpha.a))}{an_i h\gamma}} \quad (\text{II} - 14)$$

## II.6 La tension photo-tension

En raison de l'éclairage direct sur la grille, il y a un développement de la photo-tension  $V_{op}$  au contact de la grille Schottky, réduit efficacement la polarisation inverse appliqué à grille  $V_g$ .

Cependant, la tension induite par la lumière est forte influencée par la recombinaison de surface, la durée de vie des porteurs minoritaires et la résistance présentée dans les conditions d'éclairage et dans les circuits externes de polarisation de grille. Les modèles précédents ne prenaient pas en compte l'effet de recombinaison de surface et les modifications de la durée de vie.

Ce modèle calcule la photo-tension en considérant la recombinaison de surface et la durée de vie des porteurs minoritaires à l'état lumineux  $\tau_L$ . Les paires électron-trou générées dans la région de déplétion sont séparées par le champ électrique présent dans la région. Les électrons se déplacent vers le canal par contre les trous se déplacent vers la surface où ils se recombinent coté des pièges de surface. La recombinaison de surface produit un courant de fuite qui influence sur la photo-tension, ce qui entraîne un effet de rétroaction négative, c'est-à-dire par la source ou le substrat, il y a un excès d'états luminescents à l'état d'équilibre. Les deux effets diminuent l'amplitude de la photo-tension  $V_{op}$  qui a été observé pour des résistances de grille externes très élevées, l'effet photovoltaïque domine.

Dans notre analyse, nous supposons qu'il existe une résistance très élevée dans la grille du circuit. Cette approximation de la photo tension développée est égale à la tension en circuit ouvert de la photo tension ( $V_{op}$ .) qui affecte la polarisation de grille appliquée à la présence d'illumination. En circuit ouvert la photo tension généré à la grille Schottky en présence de la recombinaison de surface peut être écrite comme:

$$V_{op} = \left( \frac{\eta kT}{q_e} \right) \ln \left( \frac{q_e G_{op} \sqrt{(kT/q_e) \mu_p \tau_L - R q_e}}{J_s} \right) \quad (\text{II-15})$$

Avec :

$T$  : La température absolue

$K$  : Constant de Boltzmann

$q_e$  : La charge d'électron

$\eta$  : La constant dépendant du semi-conducteur

$\mu_p$  : La mobilité de trou de GaAs

$J_s$  : La densité du courant de saturation du métal-semi-conducteur dite contact Schottky

$R$  : Le taux de la surface de recombinaison

La densité de courant dans un semi-conducteur à forte mobilité tel que GaAs peut être approximée par la théorie de l'émission thermoïnique et exprimée sous la forme :

$$J_s = A^* T^2 \exp\left(\frac{q \phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (\text{II-16})$$

$A^*$  : La constant de Richardson effective pour l'émission thermoïnique.

$q \phi_{Bn}$  : La hauteur de la barrière du contact Schottky à l'équilibre thermique.

$R$  : Le taux de recombinaison de surface s'écrit comme :

$$R = \frac{N_T K_n K_p (n_s n_s - n_t p_t)}{K_n (n_s + n_t) + K_p (p_s + p_t)} \quad (\text{II-17})$$

Ou  $K_n$  et  $K_p$  : Les coefficients de capture des électrons et des trous respectivement.

$p_s$  et  $n_s$  : Les concentrations des porteurs en surface, avec :

$$n_s = \alpha P_{opt} (1 - R_m) (1 - R_s) \tau_n / h\nu \quad (\text{II-18})$$

$$p_s = \alpha P_{opt} (1 - R_m) (1 - R_s) \tau_p / h\nu$$

(II-19)

### II.7 Effet de mobilité variable

La loi de variation de la mobilité avec le champ électrique varie d'un matériau à l'autre, en fonction de la nature des bandes du semi conducteur.

Les expressions des mobilités dans notre choix [37] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_1(E) = \frac{\mu_n}{1 + \left(\frac{E}{E_c}\right)} \\ \mu_2(E) = \frac{\mu_n + v_s \left(\frac{E^3}{E_c^4}\right)}{1 + \left(\frac{E}{E_c}\right)} \\ \mu_3(E) = \frac{v_s}{E} \tanh\left(\frac{\mu_n E}{v_s}\right) \end{array} \right. \quad (\text{II-20})$$

$E_c = \frac{v_s}{\mu_n}$ , où  $\mu_n$  est la mobilité des électrons à faible champ électrique, et  $v_s$  est leur vitesse de saturation.

### II.8 Effet de la température

Les principaux paramètres responsables du changement des performances de l'OPFET avec la température sont l'écart de bande d'énergie interdite, la mobilité des électrons, la vitesse de saturation et la tension de seuil.

La tension de seuil est le paramètre le plus important dans l'étude de la dépendance de température des caractéristiques OPFET.

$$V_{th} = V_{bi} - V_p - V_{op}$$

La largeur de la bande d'énergie interdite  $Eg$  du matériau semi-conducteur est fortement liée à la température. Cette influence est bien exprimée par le modèle de Varshni

$$Eg(T) = Eg(T = 0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (\text{II-21})$$

Avec  $Eg(T)$  est la largeur de bande interdite à la température  $T$ ,  $Eg(T = 0)$  représente la largeur de bande interdite à la température  $0K$ ,  $\alpha$  est une constante exprimée en  $eV/K$ ,  $\beta$  est une constante proportionnelle à la température de Debye mesurée en  $k$ .

La mobilité des porteurs électrons à bas température dans le cas de l'arséniure de gallium GaAs et s'écrit par la relation :

$$\mu_n(T) = \mu_0(300 K) \left(\frac{T}{300}\right)^{1/2} \quad (\text{II-22})$$

La variation de la vitesse de saturation avec la température est donnée par

$$v_{sat}(T) = \frac{2.4 \times 10^5}{1 + 0.8 \exp\left(\frac{T}{600}\right)} \quad (\text{II-23})$$

$V_{bi}$  : Le potentiel de la hauteur de barrière Schottky qui peut être donné par

$$V_{bi}(T) = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i(T)}\right) + \frac{Eg(T)}{2} \quad (\text{II-24})$$

$n_i(T)$  : La concentration de porteurs libres dans la bande de valence et la bande de conduction du semi-conducteur intrinsèque qui a été créé en raison de l'excitation thermique d'un porteur de la bande de valence à la bande de conduction, elle est donnée par

$$n_i(T) = \sqrt{N_c(T)N_v(T)} \exp\left(-\frac{Eg(T)}{2KT}\right) \quad (\text{II-25})$$

Où  $N_c(T)$  et  $N_v(T)$  sont respectivement les densités effectives des états dans la bande de conduction et celle de valence, qui peuvent être évaluées par l'équation ci-dessous

$$N_c(T) = N_{c0} T^{3/2} \quad (\text{II-26})$$

$$N_v(T) = N_{v0} T^{3/2} \quad (\text{II-27})$$

## II.9 Calcul de potentiel et du champ électrique

La modélisation du MESFET nécessite plusieurs hypothèses simplificatrices car des problèmes posés par les conditions de bord. Notre première simplification est limiter la modélisation à la couche active du canal.

Pour calculer le potentiel électrique et le champ électrique, sur la base de la structure illustrée Figure (II-1), où l'axe  $-x$  représente la direction longitudinale le long du canal et l'axe  $y$  représente la direction horizontale de la surface. 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  $h_s$  de la source et  $h_d$  de drain.

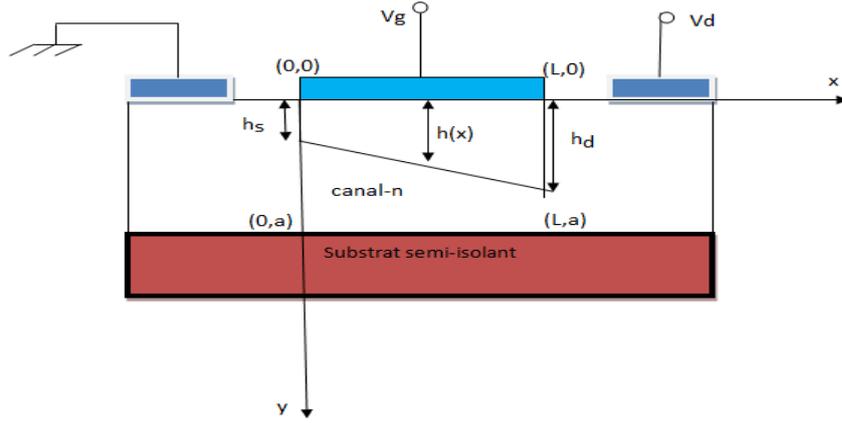


Figure II-2 : Structure idéalisée du MESFET

Notre démarche de modélisation consiste d'abord à déterminer l'équation analytique de la non-linéarité principale du MESFET, c'est-à-dire le courant de drain  $I_{ds,op}$  commandé par deux tensions  $V_{gs}$  et  $V_{ds}$  en plusieurs étapes ensuite, des calculs intermédiaires sont nécessaires :

La résolution de l'équation de Poisson (II-28) pour extraire l'expression du potentiel électrostatique analytique  $\psi(x, y)$ .

Nous allons illustrer notre démarche de modélisation physique, basée sur les paramètres physiques et électriques des transistors MESFET GaAs sous l'éclairage (OPFET) d'un doigt de grille. D'autre part, comme la longueur du canal est inférieure à l'épaisseur  $h$  de la région de charge d'espace, alors la variation du champ électrique est beaucoup plus grande dans le sens longitudinal que dans le sens perpendiculaire à la structure. Cela permet de réduire l'équation de Poisson à deux dimensions. Il est donc très intéressant d'avoir un modèle dont les principaux paramètres sont directement liés aux propriétés physiques et géométriques de composant MESFET GaAs (OPFET). Nous supposons dans ce modèle que les paramètres optiques et électriques de la grille transparente d'oxyde d'indium et d'étain (ITO) qui sont idéaux [38].

Le potentiel dans la zone de charge d'espace du canal est donné par l'intégration de l'équation de poisson [39] :

$$\frac{d^2 \psi(x,y)}{dx^2} + \frac{d^2 \psi(x,y)}{dy^2} = -\frac{q}{\epsilon} \left( N_d(y) - G \tau_n - \frac{r_s \tau_p}{a} \right) \quad (\text{II-28})$$

L'équation (II-20) a été résolu dans la section sous la grille qui représente la région de déplétion où

$\psi(x, y)$  : La distribution du potentiel à deux dimensions dans la couche active.

$N_d = N_d(y)$  : Densité de dopage uniforme correspond aux atomes donneurs.

$q$  : La charge électrique,  $\epsilon$  est la permittivité du GaAs.

$r_s$  : Le taux de recombinaison de surface.

$\tau_n$  et  $\tau_p$  : La durée de vie des électrons et des trous respectivement.

Pour des raisons liées aux techniques de fabrication, le dopage  $N_d(y)$  est homogène dans le plan de la structure mais peut varier dans la direction perpendiculaire. La concentration nette est :

$$N_D(y) = N_d(y) + G \tau_n - \frac{r_s \tau_n}{a} \quad (\text{II-29})$$

Les porteurs photo générés à l'état d'équilibre sont calculés par l'équation suivante [40]:

$$G \tau_n = \alpha \Phi \tau_n \exp(-\alpha y) \quad (\text{II-30})$$

Avec,  $\Phi$  est la densité de flux des photons

$$\Phi = \frac{(1-R_s)(1-R_m)P_{opt}}{h\gamma} \quad (\text{II-31})$$

$\alpha$  : Le coefficient d'absorption optique du semi conducteur à la longueur d'onde de fonctionnement.

$R_m, R_s$  : Les coefficients de réflexion à l'entrée et au niveau contact métal-semi conducteur.

$P_{opt}$  : La densité de puissance optique incidente

$h$  : La constante de Planck.

$\gamma$  : La fréquence du rayonnement incident.

### II.9.1 Résolution d'équation de poisson

Pour résoudre l'équation de poisson 2D, nous la divisons en : 1D l'équation différentielle ordinaire et 2D l'équation de Laplace.

La solution de l'équation (II-28) peut être obtenue à partir de :

$$\psi(x, y) = U(y) + \varphi(x, y) \quad (\text{II-32})$$

Où:

$$\frac{d^2U(y)}{dy^2} = -\frac{q}{\epsilon} \left( N_d(y) - G \tau_n - \frac{r_s \tau_p}{a} \right) \quad (\text{II-33})$$

Avec les conditions limites suivantes:

$$U(y)/_{y=0} = V_{bi} - V_{gs} - V_{op} \quad (\text{II-34})$$

$$\frac{\partial U(y)}{\partial y} /_{y=0} = 0 \quad (\text{II-35})$$

Le  $\varphi(x, y)$  peut être écrite par l'équation de Laplace suivante:

$$\frac{d^2 \varphi(x, y)}{dx^2} + \frac{d^2 \varphi(x, y)}{dy^2} = 0 \quad (\text{II-36})$$

Pour résoudre l'équation de Poisson, nous séparons les deux termes précédents. On cherche une solution unidimensionnelle du premier terme (équation II-33), et ensuite une solution bidimensionnelle du deuxième terme (équation II-36).

### II.9.2 Détermination du terme unidimensionnel du potentiel

On intègre les deux membres de (II-30) entre  $h(x)$  et  $y$ , avec la condition  $\frac{\partial U(y)}{\partial y} = 0$  en  $y=h(x)$ , on trouve [41]:

$$\frac{dU(y)}{dy} = \frac{1}{\epsilon} \left\{ \int_0^{h'(x)} q N_D(y) dy - \int_0^y q N_D(y') dy' \right\} = \frac{1}{\epsilon} \{ Q(h(x)) - Q(y) \} \quad (\text{II-37})$$

D'ailleurs, on intègre une fois de  $h(x)$  à  $y$  l'équation (II-34). Le premier membre s'écrit comme [42] :

$$\int_{h(x)}^y dU(y) = \int_0^y dU(y) - \int_0^{h(x)} dU(y) = U(y) - U(h(x)) \quad (\text{II-38})$$

Et le deuxième membre s'écrit:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\epsilon} \int_{h(x)}^y \{ Q(h(x)) - Q(y) \} &= \frac{1}{\epsilon} \int_0^y \{ Q(h(x)) - Q(y') \} dy' - \frac{1}{\epsilon} \int_0^{h(x)} \{ Q(h(x)) - Q(y) \} dy \\ &= \frac{1}{\epsilon} \int_0^y \{ Q(y) - Q'(y') \} dy' + \frac{1}{\epsilon} \int_0^y \{ Q(h(x)) - Q(y) \} dy' - \frac{1}{\epsilon} \int_0^{h(x)} \{ Q(h(x)) - Q(y) \} dy \end{aligned} \quad (\text{II-39})$$

Utilisons le passage :

$$\int_0^{h(x)} \{ Q(h(x)) - Q(y) \} dy = \int_0^{h(x)} y \rho(y) dy \quad (\text{II-40})$$

Pour le premier et le dernier terme, le second terme est simple, Il devient:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{\varepsilon} \int_{h(x)}^y \{Q(h(x)) - Q(y')\} dy' = \\
 & = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^y qN_D(y')y' dy' + \frac{1}{\varepsilon} y \int_y^{h(x)} qN_D(y') dy' - \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{h(x)} qN_D(y)y dy \\
 & = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^y qN_D(y')y' dy' + \frac{1}{\varepsilon} y \int_y^{h(x)} qN_D(y') dy' - U(h(x)) + U(y=0)
 \end{aligned} \tag{II-41}$$

Par identification entre (II-40) et (II-41) avec la condition  $U(y=0) = V_{bi} - V_{gs} - V_{op}$ , on obtient:

$$U(y) = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^y qN_D(y')y' dy' + \frac{1}{\varepsilon} y \int_y^{h(x)} qN_D(y') dy' - U(h(x)) + V_{bi} - V_{gs} - V_{op} \tag{II-42}$$

En intégrant l'équation (II-42) de 0 à y, on a déterminé le terme de  $U(y)$ , et on obtient:

$$U(y) = \frac{q}{\varepsilon} \left( \int_0^y N_D(y')y' dy' + y \int_y^{h(x)} N_D(y') dy' \right) \tag{II-43}$$

Après le remplacement de la concentration  $N_D(y)$  (voir l'équation II-21)

$$U(y) = \frac{qN_d}{2\varepsilon} y^2 - \frac{qr_s \tau_p}{2\varepsilon} y - \frac{q\theta \tau_n}{2\varepsilon} \left( y + \frac{1}{\alpha} \right) \exp(-\alpha y) + \frac{q\theta \tau_n}{\alpha \varepsilon} + V_{bi} - V_{gs} - V_{op} \tag{II-44}$$

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

$$h(x) = \left[ \frac{2\varepsilon}{qN_d} (V_{bi} + V(x) - V_{gs} - V_{op}) \right]^{\frac{1}{2}} \tag{II-45}$$

Et la largeur d'appauvrissement coté source et coté drain aux extrémités respectivement donnés par:

$$h_s = \left[ \frac{2\varepsilon}{qN_d} (V_{bi} - V_{gs} - V_{op}) \right]^{\frac{1}{2}} \tag{II-46}$$

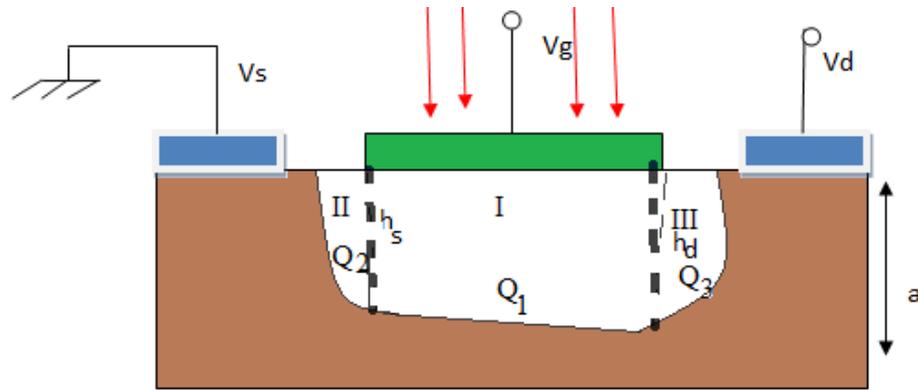
$$h_d = \left[ \frac{2\varepsilon}{qN_d} (V_{bi} + V_{ds} - V_{gs} - V_{op}) \right]^{\frac{1}{2}} \tag{II-47}$$

$V_{bi}$ : La tension de diffusion de la jonction, l'expression de cette tension est donnée par:

$$V_{bi} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{N_d}{n_i} \right) \tag{II-48}$$

## II.10 Courant de drain dans le canal

Pour trouver l'expression du courant de drain en fonction de la tension du dispositif MESFET GaAs sous l'effet de la lumière (OPFET) (voir Figure II-1), en intégrant la charge totale dans la couche non épuisée sous illumination. Les paires électron-trou en excès générées dans le canal modulent la conductivité. La largeur de la région d'appauvrissement est réduite par le développement de la barrière Schottky. Par conséquent, la conductivité du canal ainsi que la conductance du canal sont affectées à l'état éclairé. Il en résulte un changement significatif du courant de drain sous illumination. Cependant, dans GaAs, la recombinaison de surface MESFET tend à réduire cet effet dans une certaine mesure



**Figure II-3** : Structure d'un MESFET sous éclairage (OPFET)

La charge de canal due à des supports dopants et générés optiquement en tenant compte de l'effet de recombinaison de surface peut être obtenue comme suit :

$$Q_{c.op}(V_x) = qZL_g N_d a + \frac{qZL_g N_d}{2} \left[ \left( \frac{2\varepsilon}{qN_d} \right)^{1/2} \left\{ (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op})^{1/2} + (V_{bi} - V_g + V_x - V_{op})^{1/2} \right\} \right] + \frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}}{h\gamma} (1 - \exp(-\alpha \cdot a)) \times \tau_L Z q L_g - qRZ \tau_L L_g \quad (\text{II-49})$$

La concentration de porteurs par unité de surface dans le canal en présence d'une illumination en régime permanent peut être obtenue comme suit:

$$\rho_{c.op}(V_x) = \frac{N_d}{2} \left[ 2a - \left( \frac{2\varepsilon}{qN_d} \right)^{1/2} \left\{ (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op})^{1/2} + (V_{bi} - V_g + V_x - V_{op})^{1/2} \right\} \right] + \frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt} \tau_L}{h\gamma} (1 - \exp(-\alpha \cdot a)) - (R \tau_L) \quad (\text{II-50})$$

On trouve l'expression de courant de drain sous l'éclairage par l'intégrale de la concentration de porteurs par unité de surface  $\rho_{c.op}$  de 0 à  $V_{ds}$

$$I_{dop} = \frac{q\mu_n Z}{L_g} \int_0^{V_{ds}} \rho_{c.op}(V_x) dV_x \quad (\text{II-51})$$

En remplaçant la valeur de  $\rho_{c.op}(V_x)$  à partir de (II-50) et en intégrant, on trouve :

$$I_{dop} = \frac{q\mu_n N_d Z}{2L_g} \int_0^{V_{ds}} \left[ 2a - \left( \frac{2\varepsilon}{qN_d} \right)^{1/2} \left\{ (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op})^{1/2} + (V_{bi} - V_g + V_x - V_{op})^{1/2} \right\} \right] dV_x + \frac{q\mu_n N_d Z}{2L_g} \int_0^{V_{ds}} \frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}\tau_L}{h\gamma} (1 - \exp(-\alpha \cdot a)) - (R\tau_L) dV_x \quad (\text{II-52})$$

A partir de la solution approximative de l'équation de Poisson, l'épaisseur de la largeur de la zone de charge d'espace  $u_x$  est donnée par:

$$u_x = \left[ \frac{2\varepsilon}{qN_d} (V_{bi} - V_g + V_x - V_{op}) \right]^{1/2} \quad (\text{II-53})$$

Où  $V_x$  est le potentiel au point considéré, et la tension de pincement est donnée par

( $V_p = V_{bi} - V_g - V_{op}$ ), cette tension représente l'écart entre la barrière de potentiel  $V_{bi}$  du contact Schottky et la tension de seuil  $V_{th}$ , si la valeur de  $u_x$  est maximal ( $u_x = a$ ).

$a$  est l'épaisseur de la zone active du canal.

La tension  $V_{th}$  représente la tension de grille pour laquelle l'extension de la zone de charge d'espace dépeuplée de porteurs s'effectue dans tout le semi conducteur.

$$V_{th} = V_{bi} - V_p - V_{op} \quad (\text{II-54})$$

$V_{bi}$  est la tension de la barrière Schottky.

$$I_{dop} = \frac{q\mu_n N_d Z}{2L_g} \left[ 2aV_d - \left( \frac{2\varepsilon}{qN_d} \right)^{1/2} \left\{ (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op})^{3/2} + (V_{bi} - V_g + V_d - V_{op})^{3/2} \right\} \right] + \frac{q\mu_n Z}{2L_g} \left[ \frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}\tau_L}{h\gamma} (1 - \exp(-\alpha \cdot a)) - (R\tau_L) \right] V_d \quad (\text{II-56})$$

En posant :

$$V_p = \frac{qa^2 N_d}{2\varepsilon} \quad \text{et} \quad I_p = \frac{(qN_d)^2 \mu_n Z a^3}{2\varepsilon L_g} \quad (\text{II-57})$$

L'expression finale du courant  $I_{dop}$  devient comme suit :

$$I_{dop} = I_p \left[ \frac{V_d}{V_p} - \frac{2}{3} \left\{ (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op})^{3/2} + (V_{bi} - V_g + V_d - V_{op})^{3/2} \right\} \right] + \frac{q\mu_n Z}{2L_g} \left[ \frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}\tau_L}{h\gamma} (1 - \exp(-\alpha \cdot a)) - (R\tau_L) \right] V_d \quad (\text{II-58})$$

Cependant, cette équation détermine le courant de drain à les fonctions des deux tensions de polarisation sont réécrites différemment selon fonctionnement du transistor, qui dépend essentiellement de la valeur de la tension  $V_d$

Ces régimes sont :

- Régime linéaire, où le courant de drain varie linéairement avec la tension  $V_d$ .
- Régime de Saturation, le courant sature à la valeur  $I_{dsatop}$ .

#### ❖ Régime linéaire

Lorsque la tension de drain est faible et vérifie la condition suivante:

$$V_d \ll V_{bi} - V_p - V_{op}$$

L'équation (II- 58) devient comme suit :

$$I_{dop} = \frac{I_p}{V_p} \left\{ 1 - \sqrt{\frac{V_{bi} - V_g - V_{op}}{V_p}} \right\} V_d + \frac{q\mu_n Z}{2L_g} \left[ \frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}\tau_L}{h\gamma} (1 - \exp(-\alpha \cdot a)) - (R\tau_L) \right] V_d \quad (\text{II-59})$$

#### ❖ Régime saturé

Dans cette région, le courant se sature à la valeur  $I_{dsatop}$  Cette région de caractéristiques est connue comme étant la région de saturation [43].

Le courant dans ce cas peut être évalué à partir de l'équation (II-53), en évaluant le courant de drain au point de pincement, en posant  $V_p = V_{bi} - V_g - V_{op}$

$$I_{dsatop} = I_p \left\{ \frac{1}{3} - \left( \frac{V_{bi} - V_g - V_{op}}{V_p} \right) - \frac{2}{3} \left( \frac{V_{bi} - V_g - V_{op}}{V_p} \right)^{2/3} \right\} + \frac{q\mu_n Z}{2L_g} \left[ \frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}\tau_L}{h\gamma} (1 - \exp(-\alpha \cdot a)) - (R\tau_L) \right] V_{dsat} \quad (\text{II-60})$$

Avec :

$V_{dsat}$ : la tension de drain de saturation donner par :

$$V_{dsat} = V_p - V_{bi} + V_g + V_{op}$$

## II.11 Conductance $g_{d op}$ et transconductance $g_{m op}$

### II.11.1 Conductance $g_{d op}$

La conductance traduit la variation du courant de drain en fonction de la tension  $V_d$  à polarisation de grille  $V_g$  constante.

$$g_{d op} = \left( \frac{\partial I_{d op}}{\partial V_d} \right)_{V_g = cst} \quad (II-61)$$

Donc, l'expression de la conductance optique est:

$$g_{d op} = \frac{q\mu_n N_d Z}{2L_g} \left[ 2a - \left( \frac{2\varepsilon}{qN_d} \right)^{1/2} \left\{ (V_{bi} - V_g + V_d - V_{op})^{1/2} \right\} \right] + \frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}\tau_L}{h\nu} (1 - \exp(-\alpha \cdot a)) - (R\tau_L) \quad (II-62)$$

### II.11.2 Transconductance $g_{m op}$

La transconductance est l'expression du mécanisme de commande d'un transistor, c'est la variation du courant de drain en fonction de la polarisation de grille, à tension drain source constante. Elle n'est pas constante avec  $V_g$ .

$$g_{m op} = \left( \frac{\partial I_{d op}}{\partial V_g} \right)_{V_d = cst} \quad (II-63)$$

$$g_{d op} = \frac{q\mu_n N_d Z}{2L_g} \left( \frac{2\varepsilon}{qN_d} \right)^{1/2} \left\{ (V_{bi} - V_g + V_d - V_{op})^{1/2} - (V_{bi} - V_g - V_{op})^{1/2} \right\} \quad (II-64)$$

## II.12 Détermination des capacités $C_{gs op}$ , $C_{gd op}$

La capacité optique totale de la grille-source dans la condition éclairée [44]

$$C_{gs op} = \left( \frac{\partial Q_{cop}}{\partial V_g} \right)_{V_d = cst} \quad (II-65)$$

Alors

$$C_{gs op} = ZL_g \sqrt{\frac{qN_d}{8}} \left[ \frac{1}{(V_{bi} - V_g + V_s - V_{op})^{1/2}} \right] + \frac{qL_g a Z (1-R_m)(1-R_s) P_{opt} \tau_L}{2h\nu} \exp \left[ -\alpha \left( \frac{2\varepsilon}{qN_d} \right) (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op})^{1/2} \right] \times \left[ \frac{2\varepsilon}{qN_d (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op})} \right]^{1/2} + \frac{\pi\varepsilon Z}{2} \quad (II-66)$$

La capacité grille-drain à l'état éclairé

$$C_{gd\ op} = \left( \frac{\partial Q_{cop}}{\partial V_d} \right)_{V_g=cst} \quad (\text{II-67})$$

$$C_{gd\ op} = ZL_g \sqrt{\frac{qN_d}{8}} \left[ \frac{1}{(V_{bi}-V_g+V_d-V_{op})^{1/2}} \right] + \frac{qL_g \alpha Z (1-R_m)(1-R_s) P_{opt} \tau_L}{2h\nu} \exp \left[ -\alpha \left( \frac{2\varepsilon}{qN_d} \right) (V_{bi} - V_g + V_d - V_{op})^{1/2} \right] \times \left[ \frac{2\varepsilon}{qN_d (V_{bi}-V_g+V_d-V_{op})} \right]^{1/2} + \frac{\pi \varepsilon Z}{2} \quad (\text{II-68})$$

# **Chapitre III**

## **Résultats et Discussions**

## Chapitre III Résultats et discussion

---

### III.1 Introduction

Pour améliorer la performance du MESFET en GaAs optique (OPFET), nous étudions l'influence de la température sur ce composant et dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation ou nous utilisons des diverses équations et formules de chapitre II. Pour cet effet, nous avons mis au point un logiciel de simulation.

### III.2 Logiciel de simulation

Le logiciel de simulation qui est conçu et réalisé en MATLAB 7 est une application directe des formules et expressions établies aux chapitres II. Ce logiciel est interactif avec l'utilisateur il est composé de deux parties : Dans la première partie de ce logiciel, nous déterminons à partir des équations obtenues lors de la détermination des caractéristiques du courant de drain  $I_{dop}$  en fonction des tensions de polarisations et des paramètres physiques et géométriques du composant.

- ❖ Le courant de drain  $I_{dop}$  et sa variation avec  $V_d$  aux régimes linéaire et saturé pour différentes valeurs de densité optique  $P_{opt}$ .
- ❖ L'effet des paramètres physiques et géométriques ( $L_g, N_d, a$ ).
- ❖ Les capacités et ses variation avec  $V_{ds}$  pour différentes valeurs de densité optique  $P_{opt}$

Dans la deuxième partie de ce logiciel nous prenons compte l'effet de la température et nous déterminons

- ❖ Les caractéristiques  $I-V$  pour différentes valeurs de la température  $T$ .
- ❖ La variation des capacités en fonction de la température  $T$ .
- ❖ La variation des capacités en fonction de la tension  $V_d$  pour différentes valeurs de la température.

Les résultats de la simulation obtenus sont regroupés et stockés dans des fichiers puis utilisés à l'aide de Matlab7, pour tracer les différentes séries de courbes.

### III.3 Les résultats de simulation

Les paramètres typiques des simulations d'un OPFET utilisé expérimentalement sont représentés dans le tableau III-1 :

## Chapitre III Résultats et discussion

**Tableau III-1** : Paramètres de simulation des phototransistors MESFET (OPFET) GaAs

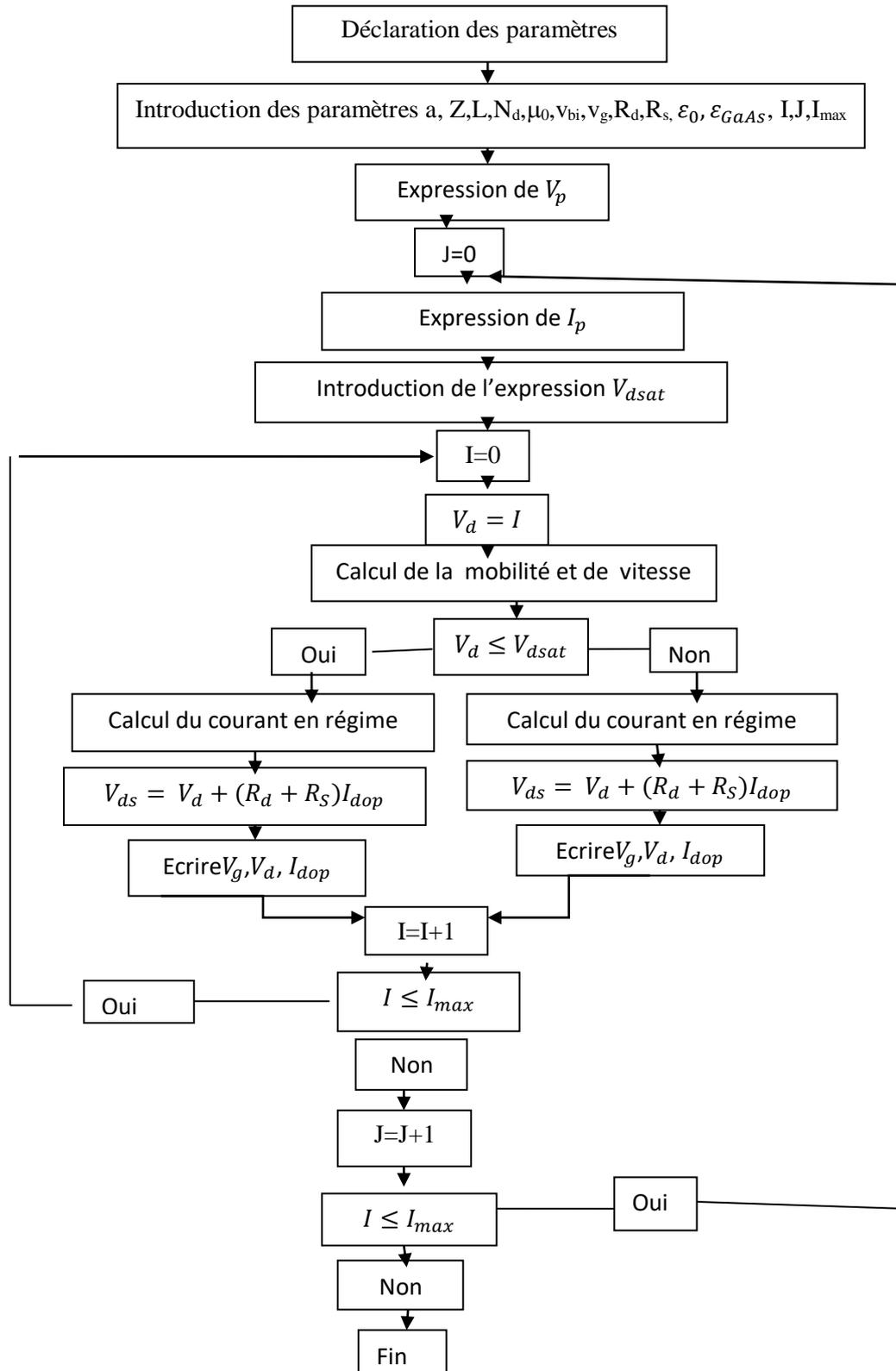
Paramètres	Valeurs
Coefficient d'absorption $\alpha$	$10^6$ /m
La durée de vie des porteurs minoritaires $\tau_L$	$10^{-8} s^{-1}$
La durée de vie des porteurs minoritaires en équilibre $\tau_p$	$10^{-8} s^{-1}$
Concentration en porteurs intrinsèque $n_i$	$1.79 \times 10^{12} m^{-3}$
Coefficient de réflexion à contact métallique $R_s$	10% of Popt
Coefficient de réflexion à l'entrée $R_m$	10% of Popt
Barrière de potentiel de la jonction Schottky $V_{bi}$	0.8 V
Mobilité de l'électron $\mu_n$	$0.85 m^2 V^{-1} s^{-1}$
Densité de courant de saturation $J_s$	0.1826 mA/m <sup>2</sup>
La permittivité $\epsilon_r \epsilon_0$	$1.1 \times 10^{12} F. cm^{-1}$
Facteurs qui dépendent de la semi-conducteur n	1.4
La longueur d'onde optique incidente	0.83 $\mu m$
Concentration de dopage $N_d$	$1.0 \times 10^{23} m^{-3}$
Largeur de grille Z	10 $\mu m$
Épaisseur du canal a	0.22 $\mu m$
Longueur de grille $L_g$	1 $\mu m$

### III.4. Caractéristiques statiques $I$ - $V$

#### III.4.1 Courant de drain $I_d$

Pour calculer numériquement le courant de drain en fonction des tensions de polarisation. On dispose aux expressions (II-21), (II-22), (II-23), (II-24), (II-25). L'organigramme de calcul est schématisé sur la figure (III-1).

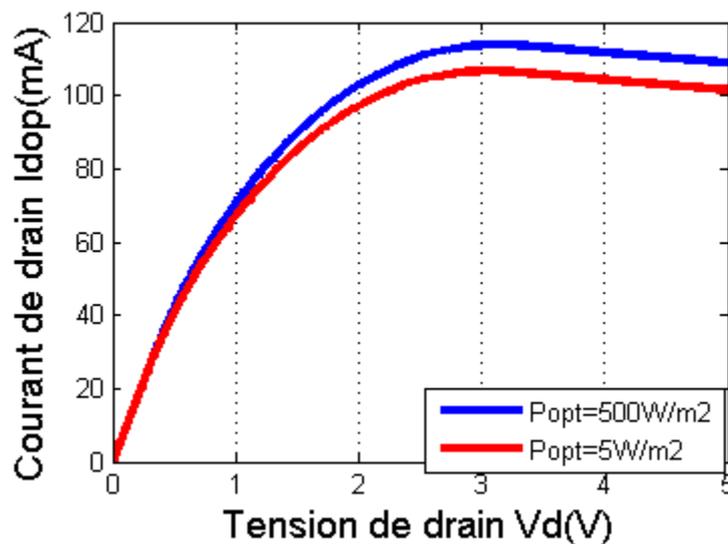
## Chapitre III Résultats et discussion



**Figure III-1** : Organigramme de calcul des caractéristiques statique I-V

## Chapitre III Résultats et discussion

La Figure III-2 présente la variation de courant de drain  $I_{d\ opt}$  en fonction de la tension appliquée de drain  $V_d$  pour différentes valeurs de densité de puissance optique  $P_{opt}(5, 500\ W/m^2)$  à condition ( $V_g=0\ V$ ) pour le transistor OPFET en GaAs à mobilité constante ( $\mu_n = cste$ ). Il ya trois régimes du courant  $I_{d\ opt}$  : Le régime linéaire ou le courant  $I_{d\ op}$  augmente linéairement avec  $V_d$ . Le régime de pincement ou le courant  $I_{d\ op}$  développe sous linéairement à une valeur limite. Le régime de saturation ou le courant devient constant pour une valeur de  $V_d$  nommé  $V_{dsat}$  tension de saturation. L'effet de la lumière incidente sur les caractéristiques  $I-V$  est clair car il y a une augmentation du courant de drain  $I_{d\ op}$  à l'état éclairé  $P_{opt} = 500\ W/m^2$  par rapport à l'état  $P_{opt} = 5\ W/m^2$ , cela est dû essentiellement à l'effet de photo-tension induite aux bornes de la polarisation de grille, Cependant, cette efficacité de la photo-tension tente le polariser la jonction grille-Schottky, par conséquent, diminuer la région d'appauvrissement ce qui augmente la hauteur de canal active et ainsi l'augmentation de courant de drain  $I_{d\ op}$ .



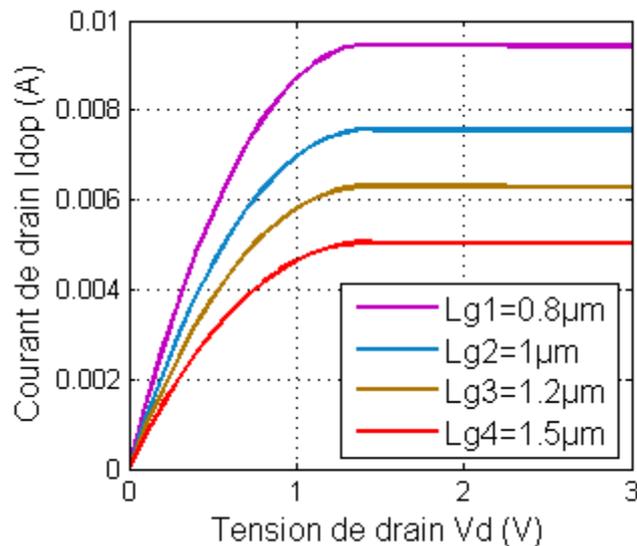
**Figure III-2 :** Variation du courant de drain  $I_{d\ op}$  en fonction de la tension de drain  $V_d$  dans des conditions d'éclairage  $P_{opt} = 5\ W/m^2$ ,  $P_{opt} = 500\ W/m^2$ .

### III.4.2 Effet des paramètres géométriques et physiques sur les caractéristiques $I-V$

Dans cette partie, nous montrons l'influence des paramètres «  $L_g$  », «  $a$  » et «  $N_d$  » sur le courant de drain. La performance de transistor dépend au choix de ses paramètres.

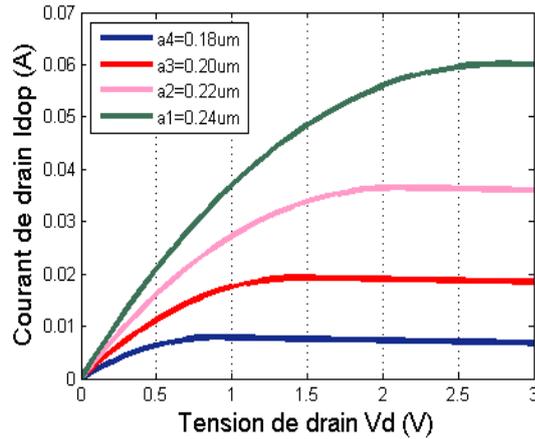
## Chapitre III Résultats et discussion

La figure III-4 présente la variation du courant de drain  $I_{dop}$  en fonction de la tension de drain  $V_d$  pour différentes valeurs de longueur de grille nous observons qu'il y'a une augmentation du courant de drain au fur et à mesure que la longueur de grille  $\ll L_g \gg$  diminue. En effet, l'extension latérale de la région de charge d'espace conduit à l'allongement du canal conducteur, tout en s'amincissant, ce qui limite le passage des électrons.

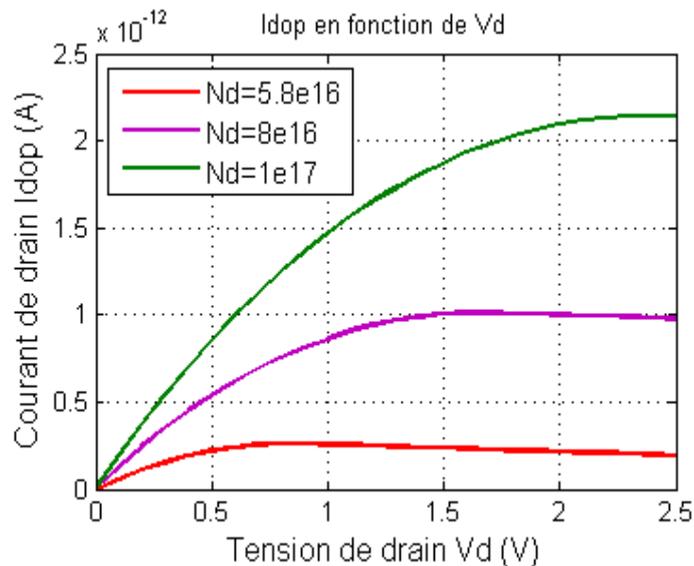


**Figure III-3:** Influence de la longueur de grille  $\ll L_g \gg$  sur les caractéristiques  $I - V$  du transistor OPFET GaAs. ( $V_g = -1$  V)

Les figures III-4 et III-5 présentent successivement l'évolution des caractéristiques  $I - V$  en fonction de l'épaisseur de la couche active  $\ll a \gg$  ainsi que en fonction de la concentration du dopage  $\ll N_d \gg$ . Nous constatons que le courant de drain  $I_{dop}$  augmente avec l'augmentation de ces paramètres. conformément à l'expression du courant (II - 58), on peut constater l'effet de ces paramètres. Les performances des structures sont liées étroitement au choix de ces paramètres. Il augmente avec la concentration du dopage  $\ll N_d \gg$  lorsque la résistivité des semi-conducteurs diminue avec l'augmentation de la concentration des porteurs, et il augmente avec l'augmentation de la largeur du canal et de l'épaisseur de la couche active  $\ll a \gg$  lorsque l'augmentation de ces paramètres entraîne une augmentation de la conductance  $\ll g_{dop} \gg$ .



**Figure III-4 :** Influence de l'épaisseur de la couche active  $\ll a \gg$  sur les caractéristiques I-V du transistor OPFET en GaAs

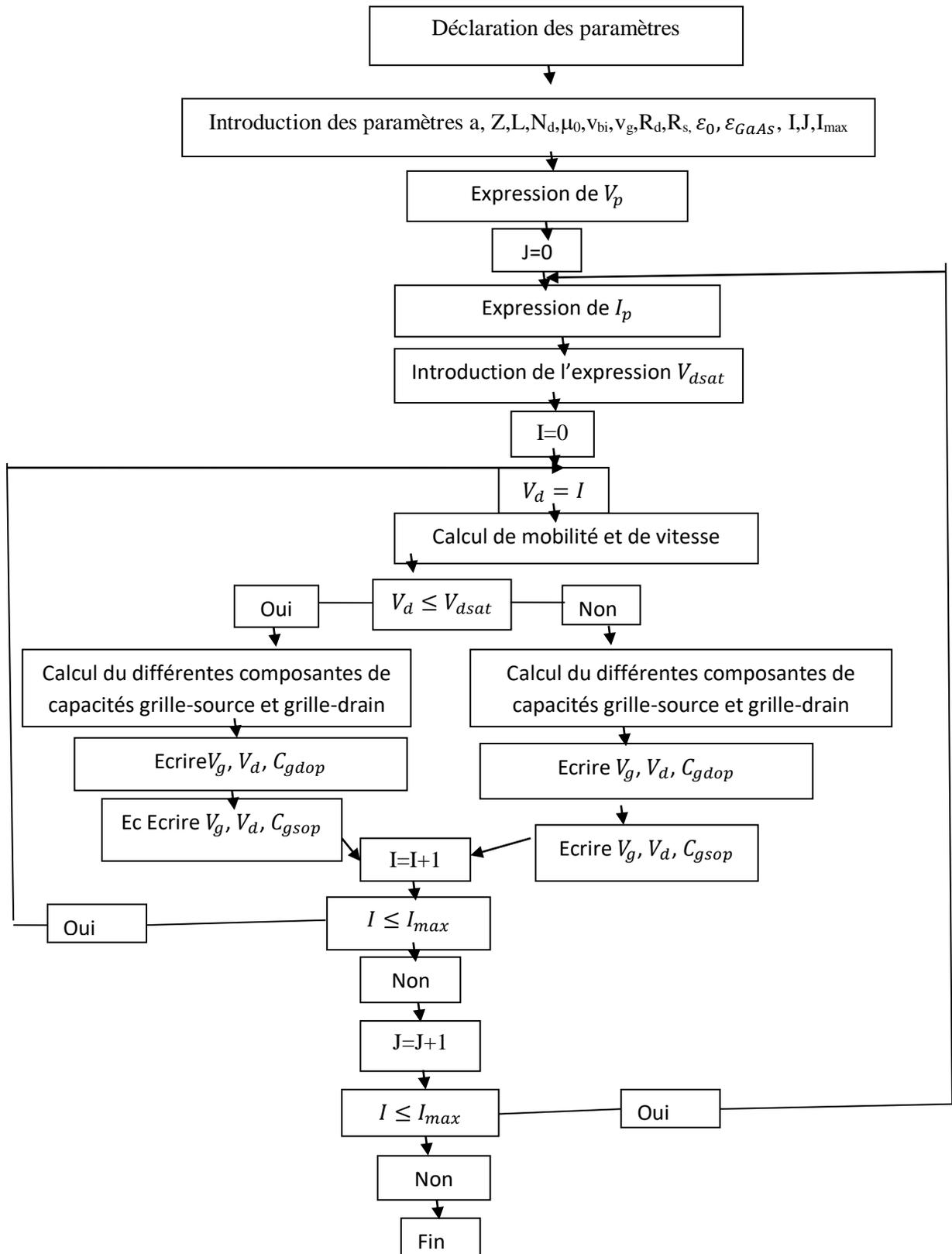


**Figure III-5 :** Influence de la concentration du dopage des porteurs  $\ll N_d \gg$  sur les caractéristiques I-V du transistor OPFET en GaAs.

### III.5 Caractéristiques capacité-tension C-V

Dans la détermination des capacités grille-source  $\ll C_{gsop} \gg$  et grille-drain  $\ll C_{gdop} \gg$  au régime linéaire et saturé, nous avons deux parties, la partie intrinsèque due à la région intrinsèque de la zone de déplétion est situé au dessous de la grille. L'autre partie extrinsèque due aux extensions de la zone de charge d'espace. Sur la base des expressions analytiques de ses composants, nous avons établi un programme dont l'Organigramme de calcul est représenté sur la figure III-6.

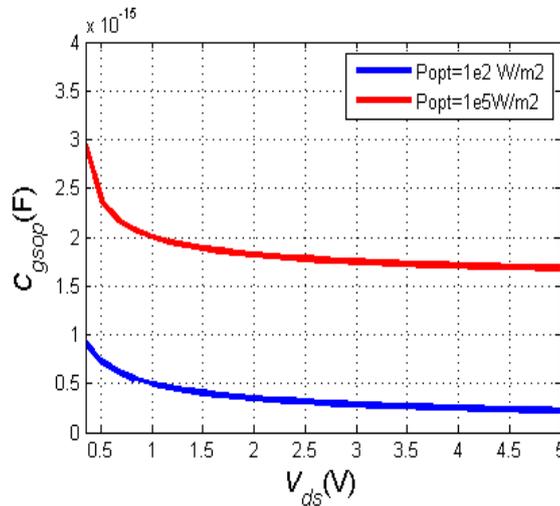
## Chapitre III Résultats et discussion



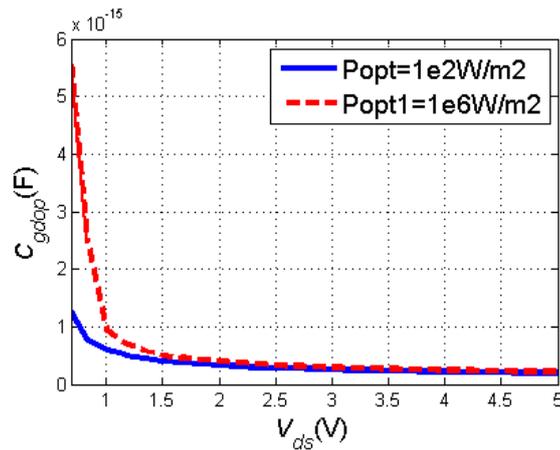
**Figure III-6 :** Organigramme de calcul des caractéristiques statiques C-V

### III.5.1 Capacités grille-source $\ll C_{gsop} \gg$ et grille-drain $\ll C_{gdop} \gg$

Les figures III-7 et III-8 représentent les variations de la capacité grille-source  $\ll C_{gsop} \gg$  et la capacité grille-drain  $\ll C_{gdop} \gg$  en fonction de la polarisation de drain-source  $V_{ds}$  en régime linéaire pour différentes valeurs de densité de puissance optique. Nous remarquons d'une part la décroissance de  $\ll C_{gsop} \gg$  et  $\ll C_{gdop} \gg$  avec l'augmentation de la polarisation de drain-source  $V_{ds}$ , d'autre part, pour une valeur donnée  $V_{ds}$  ( $V_{ds} = 2V$ ), la capacité augmente significativement pour la valeur la plus grande de densité de puissance optique  $P_{opt}$ . Cela peut être expliqué par le fait que la largeur de la région de déplétion se réduit sous la condition la plus forte d'illumination. Il y a un grand écart de la capacité grille-drain  $\ll C_{gdop} \gg$  entre les conditions d'éclairage  $P_{opt} = 10^2 w/m^2$  et  $P_{opt} = 10^5 w/m^2$  à faible tension  $V_d$  se produit en raison de la charge supplémentaire développée par la tension photo-induite  $V_{op}$ , qui est un contributeur majeur, mais en revanche si la tension  $V_d$  augmente on observe que l'écart diminue ce qui traduit l'augmentation de la barrière du potentiel donc la décroissance de la conductance ainsi que la croissance de la résistivité qui affaiblit à son tour le passage de la charge supplémentaire dans le canal conducteur.



**Figure III-7 :** la variation de capacité grille-source  $\ll C_{gsop} \gg$  en fonction de tension de drain-source  $V_{ds}$  pour différentes densités de puissance optique.



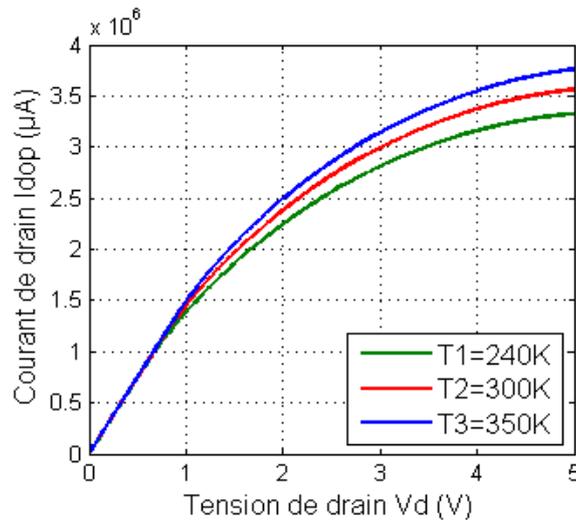
**Figure III-8:** La variation de capacité grille-drain  $\ll C_{gdop} \gg$  en fonction de tension de drain-source  $V_{ds}$  pour différentes densités de puissance optique.

### III.6 Effet de la température

Pour montrer l'effet de la température sur la performance de l'OPFET en GaAs, particulièrement les caractéristiques ( $I$ - $V$ ) et ( $C$ - $V$ ). Nous effectuons la simulation numérique avec la loi de mobilité  $\ll \mu_1 \gg$  et la vitesse de saturation  $\ll v_s \gg$  et de la tension de seuil  $\ll V_{th} \gg V_t$  et la largeur d'énergie interdite  $\ll E_g \gg$  en fonction de la température  $T$ . (Voir chapitre II)

#### III.6.1 Effet de la température sur les caractéristiques I-V

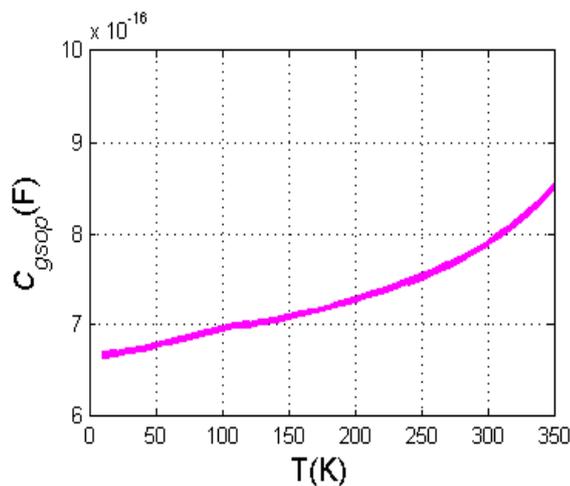
La figure III-9 Montre la variation du courant de drain  $I_{dop}$  en fonction de la tension de drain  $V_d$  pour différentes valeurs de la température, Nous observons que le courant de drain  $I_{dop}$  augmente lorsque la température augmente. Cela est dû à la hauteur de la barrière potentielle qui augmente avec l'augmentation de la température  $T$ , par conséquent la largeur de la zone de charge de l'espace augmente tandis que le canal conducteur se rétrécit, et ainsi le courant de drain  $I_{dop}$  diminue.



**Figure III-9 :** la variation de courant  $I_{dop}$  de drain en fonction de la tension de drain  $V_d$  pour différentes températures  $T$  (avec  $P_{opt} = 100 W/m^2$ )

### III.6.2 Effet de la température sur les caractéristiques C-V

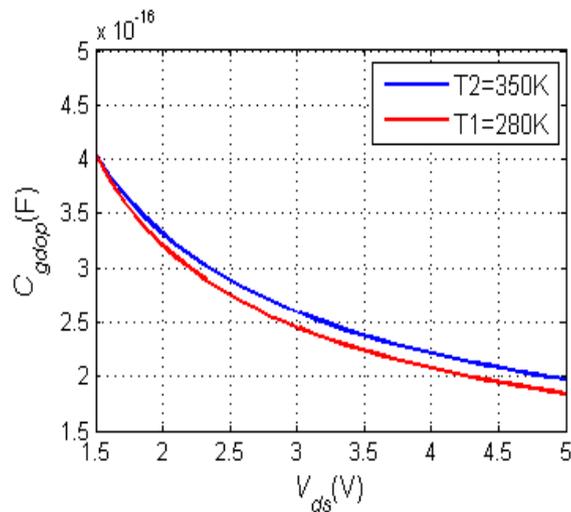
Sur la figure III-11 nous montrons la variation de capacité grille-source  $C_{gsop}$  en fonction de la température  $T$ . nous remarquons que la capacité grille-source  $C_{gsop}$  augmente avec l'augmentation de la température  $T$ . Cela peut être expliqué par le fait que la réduction de la mobilité des électrons avec l'augmentation de la température  $T$ . Nous notons également que l'élévation de la température améliore le contrôle du canal en augmentant la capacité.



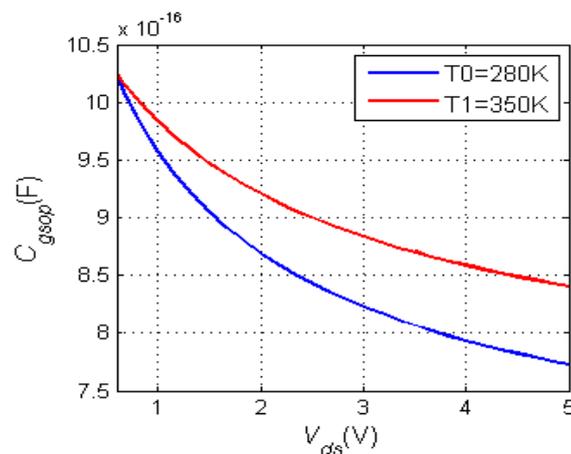
**Figure III-10:** la variation de capacité grille-drain  $C_{gsop}$  en fonction de température  $T$  (avec  $P_{opt} = 100 W/m^2$  et  $V_g = -0.5 V$ )

## Chapitre III Résultats et discussion

Les figures III-11 et III-12 représentent les variations de capacitance grille-drain  $C_{gdop}$  et capacitance grille-source  $C_{gsop}$  en fonction de la tension de drain  $V_d$  pour différentes valeurs de température. Nous observons d'une part la décroissance de  $C_{gsop}$  et  $C_{gdop}$  avec l'augmentation de la polarisation de drain-source  $V_{ds}$ , d'autre part, pour une valeur donnée  $V_{ds}$  ( $V_{ds} = 2V$ ), la capacité augmente significativement avec l'augmentation de la température, cela est due à la réduction de la mobilité des électrons et de la vitesse de saturation. On remarque également que l'élévation de la température améliore le control du canal en augmentant la capacité.



**Figure III-11** : la variation de capacitance grille- drain  $C_{gdop}$  en fonction de la tension de drain-source  $V_{ds}$  pour différentes températures  $T$  (avec  $P_{opt} = 100 W/m^2$  et  $V_g = 0 V$ )

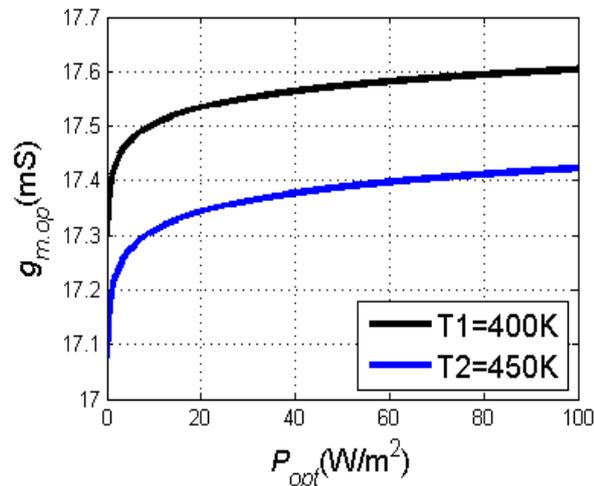


**Figure III-12** : la variation de capacitance grille- source  $C_{gsop}$  en fonction de la tension de drain  $V_{ds}$  pour différentes températures  $T$  (avec  $P_{opt} = 100 W/m^2$  et  $V_g = -1 V$ ).

### III.7 Transconductance $g_{mop}$ et conductance de drain $g_{dop}$

#### a. Transconductance $g_{mop}$

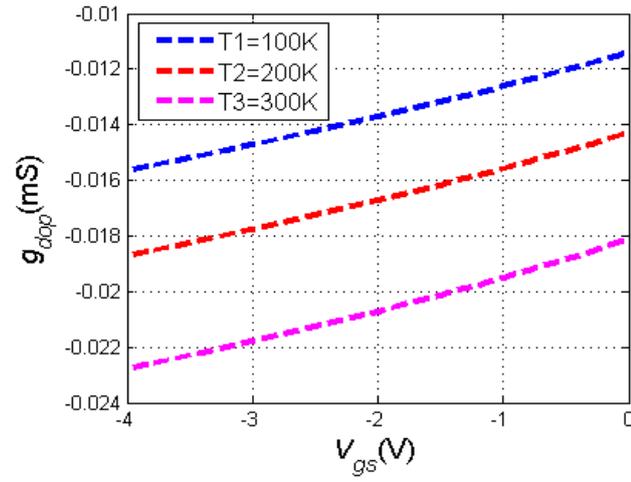
La figure (III-13) montre la variation de la transconductance en fonction de la densité de puissance optique incidente  $P_{opt}$  pour différentes valeurs de la température. On remarque que la transconductance augmente avec l'augmentation de la densité optique  $P_{opt}$  jusqu'à aller constante (régime saturé), l'effet de la température sur la transconductance est clair car il y a une diminution de la transconductance  $g_{mop}$  avec l'augmentation de la température qui est due à la diminution de la mobilité des électrons dans le canal et aussi la diminution de la vitesse des électrons. On note que l'élévation de la température induit une interaction intensive entre les porteurs de charge et les phonons optiques du réseau, ce qui conduit à la diminution de la mobilité et une limitation de la vitesse de saturation des porteurs.



**Figure III-13 :** la variation de Transconductance  $g_{mop}$  en fonction de la densité de puissance optique  $P_{opt}$  pour différentes températures.

#### b. Conductance de drain $g_{dop}$

La figure (III.14) représente la variation de la conductance optique de drain  $g_{dop}$  en fonction de la tension de grille-source  $V_{gs}$  pour différentes valeurs de la température  $T$  pour le MESFET GaAs. On remarque que la conductance augmente avec l'augmentation de la tension de grille-source  $V_{gs}$ , ainsi nous observons que la conductance diminue avec l'élévation de la température  $T$ , ce qui est exprimée par l'influence de la mobilité des électrons sur la conductance du canal.



**Figure III-14:** la variation de conductance  $g_{dop}$  en fonction de la tension de grille-source  $V_{gs}$  pour différentes températures.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'objectif de cette thèse a consisté à étudier les propriétés statiques du MESFET (OPFET) à base GaAs, le résumé du bilan de ce mémoire se fait par la présentation des trois chapitres principales de notre contribution.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les différents types de transistors à effet de champ (FET), ces structures et comment ils fonctionnent. Nous concentrons sur le FET à contact Schottky (MESFET) à GaAs dans l'obscurité et sous l'éclairage, ainsi nous étudions les propriétés de matériau semiconducteur GaAs.

Dans le deuxième chapitre, on conclure les relations qui représentent les phénomènes physiques régissant le comportement de transistor OPFET GaAs. Ses relations nous a permis de connaître l'effet de la mobilité ( $\mu$ ) en fonction du champ électrique ( $E$ ), des variations des paramètres géométriques ( $a$ ), ( $z$ ) et ( $L_g$ ) et des paramètres physiques ( $N_d, \mu$ ). Nous avons présenté aussi l'effet de la température ( $T$ ) sur les caractéristiques de sortie du MESFET (OPFET) en GaAs par le model de Varshni, ainsi la conductance et la transconductance.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté l'étude par simulation du transistor à effet de champ de type OPFET GaAs. Pour effectuer notre approximation, nous avons développé un logiciel de simulation utilisant les codes MATLAB qui nous permettent la résolution des équations nécessaires régissant le MESFET (OPFET) en GaAs et présentant les résultats sous forme graphique des caractéristiques de sortie du transistor étudié en tenant compte de l'influence des paramètres géométriques et l'influence de la température sur son comportement. Nos résultats sont concentrés dans la détermination de l'évolution du courant de drain en fonction de la tension de drain à différentes valeurs des paramètres  $\ll L_g \gg$ ,  $\ll a \gg$  et  $\ll N_d \gg$ , ainsi l'évolution des capacités en fonction de la tension de drain à différentes valeurs de densité de puissance optique, aussi le développement de courant de drain et des capacités et de la transconductance en fonction de la tension de drain à différentes valeurs de température dans le cas d'éclairage.

En conclusion, le modèle statique que nous avons établi permet de déterminer l'influence des paramètres physiques et géométriques sur le fonctionnement du transistor MESFET (OPFET) en GaAs, l'effet de la température sur les caractéristiques de sortie des composants MESFETs (OPFETs) et d'avoir une amélioration de performance de composant.

## References Bibliographiques

- [1] **N. Lakhdar and B. Lakehal**, “An Analytical Model for Submicron Dual Material Gate GaN MESFET including the Temperature Effects”, Proceedings of IEEE International Conference on Green Energy Conversion Systems, pp. 1-12 2017.
- [2] **A.R. Ullah** , “p-GaAs Nanowire Metal–Semiconductor Field-Effect Transistors with Near-Thermal Limit Gating”, NanoLetters, Vol. 18, No. 9, pp. 1-22, 2018.
- [3] **M.Djouder, A.Benfdila and A.Lakhlef**, “Effect of varying temperature on GaAs-MESFET electrical parameters”, ICTAC journal on microelectronics, JANUARY 2019, volume: 04, issue: 04.
- [4] **Pak Won Sim** , "Application of field effect transistors to RF power generation» Submitted in partial fulfillment for the degree of master of science in engineering electronics from the United States Naval postgraduate school, May 1966.
- [5] 6ème leçon : Le transistor à effet de champ à jonction : le JFET Université de CAEN.
- [6] Cours d'Electronique, Le transistor JFET (Junction Field Effect Transistor), university Henri Poincaré Nancy. <http://perso.orange.fr/fabrice.sincere>.
- [7] **Donald A. Neamen** «Semiconductor Physics and Devices Basic Principles» Fourth Edition.
- [8] **CHELBI Hassen**, ECUE n° 1 : Electronique Générale Chapitre 8 « Les Transistors à Effet de Champ: Transistor à Jonction (JFET) », ISET Nabeul
- [9] **MERAD FAIZA**, « Conception et simulation des caractéristiques électriques d'un transistor MOSFET nanométrique à conduction latéral de type Tri-Gate (FinFET) », diplôme de magister, Université ABOU BEKR BELKAID – Tlemcen, Soutenue en 11 / 09/2014.
- [10] **G. De Lentdecker & K. Hanson**, « Chapitre IV Les Transistors à Effet de Champ (FET) ».
- [11] **François FADHUILE-CREPY**, « Méthodologie de conception de circuits analogiques pour des applications radiofréquence à faible consommation de puissance », mémoire de doctorat, L'université de BORDEAUX, Soutenue le : 6 janvier 2015.
- [12] **C. PETER – V 3.0**, « Transistors a Effet de Champ », Polytech'Nice Sophia.

- [13] **Kaddour Chahrazed**, « Analyse des Transistors a Effet de Champ », Université LARBI BEN M'HIDI –OUM EL BOUAGHI, 2015
- [14] **D. Delagebeaudeuf, P. Delescluse, P Etienne, M. Laviron, J. Chaplart, T. Linh Nuyen**, « Two dimensional electron gas MESFET structure », Electronics Letters, vol. 16, n°17, pp 667-668, 1980.
- [15] **T. Mimura et al**, « A new field effect transistor with selectively doped GaAs /n-AlGaAs Heterojunction », Japanese journal of Applied Physics, vol. 19, n°5, pp 2225-2227, 1980
- [16] **Ikram El Makoudi**, « Etude et fabrication de Transistor a enrichissement de la filière InAlAs/InGaAs pour applications millimétriques faible bruit », mémoire de doctorat, Université de LILLE 1,2010.
- [17]**N.MERABTINE, S.KHEMISSI, C.KENZAI**, «Simulation bidimensionnelle des caractéristiques I-V de transistor MESFET GaAs », Sciences & Technologie A – N°22, Décembre (2004), pp. 69-74, (2004).
- [18] **HAMMA ISSAM**, « Contribution à l'étude des propriétés bidimensionnelles des Composants à effet de champs MESFET (OPFET) GaAs », mémoire de doctorat, Université d'Oum-Elbouaghi, 2014.
- [19]**GUIZA Douadi**,'' Analyse des transistors à effet de champ MESFET GaAs'', Mémoire de magister, université de Mentouri Constantine, 2009
- [20] **W.W. Hooper and W. L. Lehrer** «An epitaxial GaAs field effect transistor».
- [21] **Gabriel Cormier**, « GELE5223 Chapitre 7 : Circuits intégrés », Université e de Moncton, Automne 2010.
- [22] **CHERIET ABDERRAHMANE**, « Etude des propriétés des Transistors à Effet de Champ MESFET GaAs », mémoire de magister, Université d'Oum-Elbouaghi, 2010.
- [23] **BALTI Moez** « Extraction des paramètres intrinsèques des transistors à effet de champ en tenant compte des phénomènes de propagation ».Thèse de doctorat, Université de Cergyponoise, 2005.

[24] **Fatima Zohra KHELIFATI**, « Étude des conditions de polarisation sur les propriétés électriques d'un MESFET GaAs », thèse de magister, Université BADJI MOKHTAR Annaba, 2010.

[25] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Semi-conducteur>

[26] **GARY S. May, Simon M. Sze**, fundamentals of semiconductor fabrication, 2004.

[27] **BENBOUZA Mohamed Salah** «Conception assistée par ordinateurs des circuits intégrés MESFET GaAs» Université de LHADJ LAKHDHAR Batna.

[28] **Mr.bourouba Farid**, modélisation et simulation des contacts métal-semi-conducteur à barrière inhomogène, soutenu le 5/10/2010

[29] **E.F.Schubert**, JFETs and MESFETs, Rensselaer Polytechnic Institute, 2003.

[30] **T. Ytterdal, B. J. Moon, T. A. Fjeldly, M. S. Shur**, "Enhanced GaAs MESFET CAD model for a wide range of temperature" IEEE Trans on electron device, 42 (10), (1995), p1724.

[31] **LUC BOURBONNAIS**, «Effets photoniques dans les transistors à effet de champ au GaAs », Université d'ottawa, CANADA ,1987.

[32] **HAMLAOUI CHAHRAZED**, « Analytique des propriétés unidimensionnelles des composant optique a effet de champs MESFET GaAs », mémoire de master, université d' AKLI MOUHAND OULHADJ-Bouira, 2019/2020.

[33] **K.KANDIAH** "Radom telegraph signal currents and low frequency noise in Junction field effect transistor". IEEE Transactions on electron devices, vol. 41, N° 11, Nov.1994, p2006-2015.

[34] **L.K.J.VANDAMME** "Noise as diagnostic tool for quality and reliability of Electronic devices". IEEE Transactions on electron devices, vol. 41, n° 11, Nov.1994, p2006-2015

[35] **CHAKRABARTI, P., TIWARI, B. N., KUMAR, S.** Noise Behavior of an Optically Controlled GaAs MESFET. Journal of Light wave Technology, v. 22, n. 2, p. 534-542, Feb, 2004.

- [36] **CHAKRABARTI, P.SHRESTHA, S. K.SRIVASTAVA, A.SAXENA**, Switching Characteristics of on Optically Controlled GaAs-MESFET. IEEE Trans.Microwave Theory Tech., v. 42, n. 3, p. 365-375, Mar., 1994
- [37] **SZE, S. M., NG, K. K.** Physics of Semiconductor Devices. 3rd. Ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [38] **Dr B.K.Mishra, Lochan Jolly, and Kalawati Patil**, Two dimensional modeling of non-uniformly doped MESFET under illumination'', International Journal of VLSI Design & Communication Systems. 1, 23-35 (2010).
- [39] **Madheswaran Muthusamy and Kalaiarasi Kuppusamy**, "Numerical simulation of GaAs MESFET photodetector for OEIC receivers", Proc. of SPIE 5881, 2005.
- [40] **S. M. Sze**, «Physic of Semiconductor Devices», 2nd ed. INC. John.Willy and Sons, New York 1981
- [41] **H. Mathieu** « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 4eme Edition, Masson, Paris 1998.
- [42] **SAIDI WASSILA**,'' modélisation bidimensionnelle du MESFET GaAs'', mémoire de doctorat, université de MENTOURI Constantine, 2014
- [43] **A. Giorgio, A. G. Perri**, « An improved C-V mode of GaAs MESFETs for CAD of high speed circuits and broadband amplifiers », 5th European GaAs and related III-V compounds applications symposium, Bologna, Italy, 1997.
- [44] **S. D.Agostino, A.B. Berutto**, Physics based Expressions for non-linear Capacitance of the MESFET equivalent circuit // IEEE Trans. On M.T.T.42 (3), pp. 403-406, (1994

