

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

FACULTE de Technologie
DEPARTEMENT d'Electronique
N° :.....



DOMAINE : Sciences et Technologie
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : INSTRUMENTATION

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : ABASSI Fatima

RABHI Bouchra nour el houda

Intitulé

Étude et simulation des OPFETs à base de
GaAs

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. GUERMAT Noubel	Université M'sila	Président
Dr. KEBAILI Farida	Université M'sila	Rapporteur
Dr. SAADA KHALKHAL FAYCEL	Université M'sila	Examineur

Année universitaire : 2018 /2019

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur **Dr .KEBAILI Farida**, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail

.

Dedicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

À la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse: mon adorable mère.

À l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père

À mes frères, Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail.

À tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

À tous ceux que j'aime.

ABASSI Fatima

Dedicace

*Avant tous, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et
la patience pour réaliser*

Ce travail.

*Je dédie ce modeste travail à mes parents chers , mon mari pour leurs
sacrifices et qu'ils n'ont pas jamais a passé de coup encourager, que dieu les
gardes et les protèges pour leur soutien moral et financier, pour leurs
encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

A mes frères et ma sœur et toute ma famille

A tous ce que j'aime et qui m'aiment

Tous mes collègues d'études surtout ceux D'électronique .

RABHI bouchra nour elhouda

Résumé

Des sommes importantes ont été investies dans la recherche de circuits intégrés photoniques basé sur des matériaux semi-conducteurs, parmi lesquels l'arséniure de gallium (GaAs). L'arséniure de gallium peut être associé à une électrode métallique pour former une jonction Schottky du transistor à effet de champ métal-semi-conducteur (GaAs MESFET), le comportement de ce dispositif sous l'incidence d'un faisceau optique modulé dit OPFET sera discuté dans ce travail dont l'objectif est de comprendre les phénomènes responsables qui régissent ce composant photonique et de déterminer l'influence du faisceau optique, des paramètres physiques et géométriques sur les performances internes du dispositif, tels que les caractéristiques $I(V)$, les capacités entre grille et source, la transconductance, la conductanceetc. Cette étude est menée à l'aide d'un modèle analytique tiré de la littérature, la simulation est conçue en MATLAB.

Mots clés : OPFET , effet optique, photo détecteurs, transistor à effet de champ , GaAs

Abstract

Significant sums have been invested in the research of photonic integrated circuits based on semiconductor materials, among which gallium arsenide (GaAs). Gallium arsenide can be associated with a metal electrode to form a Schottky junction of the metal-semiconductor field effect transistor (GaAs MESFET), the behavior of this device under the influence of a modulated optical beam called OPFET will be discussed in this work whose objective is to understand the responsible phenomena that govern this photonic component and to determine the influence of the optical beam, physical and geometrical parameters on the internal performances of the device, such as the characteristics $I(V)$, capacitances between gate and source, transconductance, conductance ... etc. This study is conducted using an analytical model from the literature, simulation is designed in MATLAB.

Key words: OPFET, optical effect, photodetectors, field effect transistor, GaAs

ملخص

تم استثمار مبالغ كبيرة في البحث عن الدوائر المتكاملة الضوئية المعتمدة على مواد أشباه الموصلات ، ومنها زرنيخيد الغاليوم (GaAs) يمكن أن يرتبط زرنيخيد الغاليوم بقطب معدني لتشكيل تقاطع شوتكي لترانزستور تأثير مجال أشباه الموصلات (GaAs MESFET) ، وهو سلوك هذا الجهاز تحت تأثير شعاع ضوئي معدّل يسمى OPFET سيتم مناقشته في هذا العمل الذي يهدف إلى فهم الظواهر المسؤولة التي تحكم هذا المكون الضوئي وتحديد تأثير الحزمة الضوئية والمعلومات الفيزيائية والهندسية على الأداء الداخلي للجهاز ، مثل الخصائص (I (V) ، السعة بين البوابة والمصدر ، الموصلية ، التوصيل ... إلخ. أجريت هذه الدراسة باستخدام نموذج تحليلي من الأدب ، تم تصميم المحاكاة في MATLAB .

الكلمات المفتاحية: OPFET ، التأثير البصري ، الكاشفات الضوئية ، ترانزستور التأثير الميداني ، GaAs

Liste Des Abréviations

FET	Field Effect Transistor
MESFET	Metal Semiconductor Field Effect Transistor
OMMIC	Optical Microwave Monolithic Integrated Circuit
OPFET	Optically Controlled Field Effect Transistor
ITO	Indium tin oxide
IC	Circuit intégré

Liste Des Symboles

a	La largeur de la zone active
A^*	La constante de Richardson
α	Coefficient d'absorption optique
σ	Conductivité électrique
λ	Longueur d'onde optique incidente
q	Charge d'électron
L_g	Longueur de grille
Z	Largeur de grille
D_n	Coefficient de diffusion des électrons
D_p	Coefficient de diffusion des trous
$d(y)$	La densité de charge du canal
h	La constante de Planck
E	Champ électrique du GaAs
E_c	La bande de conduction
E_v	La bande de valence
E_g	La bande d'énergie
E_F	Énergie de fermi
J_n	Densité de courant des électrons
J_p	Densité de courant des trous
G_{op}	Taux de photo génération
$g_n(P)$	Taux de génération des électrons (trous)
$r_n(P)$	Taux de recombinaison des électrons (trous)
I_d	Courant de drain
I_{dsop}	Courant de drain-source optique
I_{dsat}	Courant de drain de saturation
K	Facteur d'atténuation du milieu
k	Constante de Boltzmann
K_n	Coefficients de capture des électrons
K_p	Coefficients de capture des trous
N_d	Concentration de dopage
N_T	Densité surfacique des pièges
n	Densité des électrons libres
n_i	La concentration intrinsèque des porteurs dans le semiconducteur
n_s	Concentration des électrons en surface
n_t	Concentration des électrons en surface lorsque $E_T = E_F$
p	Densité des trous
p_s	Concentration des trous en surface
p_t	Concentration des trous en surface lorsque $E_T = E_F$
ρ	Densité de charge dans le semi-conducteur
ρ_{cop}	Concentration des porteurs, par unité de surface, dans le canal sous éclaircissement

Q_{cop}	La charge de canal
Q_{sop}	La charge totale sous la grille dans la région de charge d'espace
P_{opt}	Densité optique
R	Taux de recombinaison en surface
R_m	Coefficients de réflexion du métal de grille
R_s	Coefficients de réflexion du semi-conducteur
V_d	Tension de drain
V_{ds}	Tension drain-source
V_{dsat}	Tension de drain de saturation
V_g	Tension de grille
V_{gs}	Tension grille-source
V_s	Tension de source
V_p	Tension de pincement
V_{bi}	Tension de diffusion
V_x	le potentiel au point considéré
V_{op}	Tension optique
V_{th}	Tension de grille pour laquelle l'extension de la zone de charge
ν	Fréquence du rayon optique
μ_p	Mobilité des trous
μ_n	Mobilité d'électrons
χ	Affinité électronique du semi-conducteur
ϕ_m	Travail de sortie du métal
ϕ_s	Travail de sortie du semi-conducteur
ϕ_{Bn}	La hauteur de la barrière du contact Schottky
ϵ	Permittivité
ϵ_r	Permittivité du GaAs
ϵ_0	Permittivité du vide
τ_p	La durée de vie des porteurs minoritaires
τ_L	Durée de vie des porteurs minoritaires
η	Facteur d'idéalité de la jonction Schottky
γ	La fréquence de fonctionnement
T	Température en Kelvin
GaAs	Arséniure de gallium
C_{dsop}	La capacité drain-source optique
C_{gsop}	La capacité grille-source optique
C_{dcop}	La capacité drain-canal optique
R_{dsop}	La résistance drain-source optique
g_{mop}	La transconductance optique
g_{dop}	La conductance optique

Liste Des Figures

Figure	Nom de figure	N° de page
Figure I-1 :	Transition directe	6
Figure I-2 :	Transition indirect	7
Figure I-3 :	Caractéristiques vitesse - champ électrique en régime de transport stationnaire pour quelques semiconducteurs à 300° K .	8
Figure I-4 :	Diagramme des bandes d'énergie des semiconducteurs	8
Figure I-5 :	Contact Schottky	12
Figure I-6 :	Diagramme énergétique d'un contact schottky	12
Figure I-7 :	Vue en coupe du MESFET GaAs .	14
Figure I-8 :	Vue en coupe et polarisation d'un MESFET	15
Figure I-9 :	Structure du MESFET (OPFET) GaAs sous la lumière.	18
Figure I-10 :	Principe de fonctionnement du MESFET (OPFET) GaAs sous la lumière.	18
Figure I-11 :	MESFET sous effet Photonique : (a) processus de génération des porteurs et (b) distribution spatiale des porteurs générés.	19
Figure II-1 :	Structure d'un MESFET éclairée .	25
Figure II-2 :	Circuit équivalent du MESFET (OPFET) .	31
Figure III-1 :	La relation entre le courant I_{dsop} et la tension V_{ds} dans des conditions sombres et éclairées.	38
Figure III-2 :	La variation drain de source I_{dsop} avec le V_{gs} sous illumination et dans des conditions sombres.	38
Figure III-3 :	La variation de la durée de vie des porteurs minoritaires τ_L en fonction de la densité de puissance optique P_{opt} .	39
Figure III-4 :	Variation du courant I_{dsop} et de la résistance R_{dsop} pour des valeurs élevées de densité de puissance optique incidente P_{opt} .	40
Figure III-5 :	La variation de taux de génération optique G_{opt} avec la densité de puissance optique P_{opt}	40

Figure III-6 :	La variation de la photo tension V_{opt} développée au niveau du contact Schottky avec la densité de puissance optique P_{opt}	41
Figure III-7 :	La variation de la photo tension V_{opt} développée au niveau du contact Schottky avec de la durée de vie des porteurs minoritaires τ_L	42
Figure III-8 :	Comportement des capacités C_{gsop} et C_{dcop} par la variation de tension V_{gs} en absence et en présence de lumière	43
Figure III-9 :	Comportement de la capacité C_{gdop} par la variation de la tension V_{gs} en absence et en présence de lumière	43
Figure III-10 :	Comportement de la capacité C_{gsop} par la variation de tension V_{ds} en absence et en présence de lumière	44
Figure III-11 :	Variation de la transconductance $g_{m.op}$ en fonction de la tension de grille-source V_{gs}	44
Figure III-12 :	Variation de la transconductance $g_{m.op}$ en fonction de la tension de drain-source V_{ds} .	45
Figure III-13 :	Variation de la transconductance optique en fonction de la puissance optique incidente P_{opt} .	45
Figure III-14 a :	Variation de la transconductance optique en fonction de la puissance optique incidente P_{opt} pour différentes valeurs de V_{ds} .	46
Figure III-14 b :	Variation de la transconductance optique en fonction de la puissance optique incidente P_{opt} pour différentes valeurs de V_{gs} .	46
Figure III-15 :	Variation de la capacité optique drain-canal, C_{dcop} avec longueur de grille, L_g , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage	47
Figure III-16 :	Variation de la capacité optique drain-canal, C_{dcop} avec largeur de grille, Z , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage.	48
Figure III-17 :	Variation de la capacité optique drain-canal, $C_{dc.op}$ avec la concentration du dopage, N_d , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage	48

Figure III-18 :	Variation de la capacité optique grille-source, C_{gsop} avec longueur de grille, L_g , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage	49
Figure III-19 :	Variation de la capacité optique grille-source, C_{gsop} avec largeur de grille, Z , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage.	50
Figure III-20 :	Variation de la capacité optique grille-source, C_{gsop} avec la concentration de dopage, N_d , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage .	50
Figure III-21 :	la variation de la transconductance g_{mop} avec la longueur de grille, L_g , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage	51
Figure III-22 :	la variation de la transconductance g_{mop} avec largeur de grille, Z , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage	51
Figure III-23 :	Variation de la transconductance g_{mop} avec les concentrations de dopage, N_d , dans des conditions d'obscurité et d'éclairage	52

Liste Des Tableaux

Tableau	Nom de tableau	de N° page
Tableau I-1	Propriétés physiques des différents semiconducteurs .	10
Tableau I-2	Famille des transistors à effet de champ .	13
Tableau III-1	Paramètres de simulation MESFET GaAs (OPFET)	36

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Abstract

ملخص

Sommaire

Liste des abréviations

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I : Généralités

I.1 Introduction	5
I.2 Définition d'un semi conducteur	5
I.3 Propriétés électroniques et physiques des semiconducteurs.....	6
I.3.1 Transition directe	6
I.3.2 Transition indirect.....	6
I.3.3 Mobilité et vitesse des porteurs.....	7
I.3.4 Bandes d'énergie	8
I.4 Propriétés électronique et optique du matériau GaAs.....	9
I.5 Diode Schottky.....	10
I.6 Transistor à effet de champ.....	13
I.6.1 Transistor à effet de champ a contact SCHOTTKY (MESFET)	14
I.6.1.1 Historique	14
I.6.1.2 Description.....	14
I.6.1.3 Principe de fonctionnement	15
I.6.2 Conséquence de l'éclairage de MESFET	16

I.6.2.1 Effet photovoltaïque	16
I.6.2.2 Effet photoconducteur.....	16
I.6.2.3 Effet Photo-tension.....	17
I.8 MESFET GaAs sous l'incidence de la lumière (OPFET).....	17
I.8.1 Structure.....	17
I.8.2 Principe de fonctionnement	18
I.8.3 Phénomènes de génération – recombinaison dans un OPFET GaAs	18
I.9 Conclusion	20
Chapitre II : Modélisation du MESFET optique GaAs OPFET	
II.1 Introduction.....	22
II.2 Mécanismes de transport des porteurs de charge	22
II.3 Equation de fonctionnement du MESFET GaAs.....	23
II. 4 Présentation du Modèle de P. CHAKRABARTI.....	25
II. 4.1 Effet de l'éclairage sur la vie des transporteurs minoritaires.....	26
II. 4.2 Tension photo-induite.....	27
II. 4.3 Les caractéristiques courant-tension.....	28
II. 4.4 Schéma équivalent d'un OPFET.....	31
II. 4.5 Détermination des capacités	32
II. 4.6 La résistance drain-source.....	33
II. 4.7 Transconductance et Conductance.....	33
II. 5 Conclusion.....	34
Chapitre III : Résultats et discussion	
III.1 Introduction	36
III.2 Structure simulée : (paramètres géométriques et physiques)	36
III.3 Logiciel de simulation	37
III.4 Résultats de la simulation	37
III.4.1 Caractéristiques I (V_{ds}).....	37
III.4.2 Caractéristiques I (V_{gs}).....	38
III.4.3 durée de vie $f(P_{opt})$	39

III.4.4 Variation $I_{dsop}, R_{dsop} f(P_{opt})$	39
III.4.5 Variation $G_{opt} f(P_{opt})$	40
III.4.6 Variation $V_{opt} f(P_{opt})$	41
III.4.7 Variation $V_{opt} f(\tau_L)$	41
III.4.8 Capacités « C_{gsop} », « C_{gdop} » et « C_{dcop} »	42
III.5 Transconductance g_{mop} et Conductance de drain g_{dop}	44
III.5.1 Transconductance g_{mop}	44
III.5.2 Conductance de drain g_{dop}	46
III.6) Effet des paramètres « L_G », « N_d », et « Z » les caractéristiques « C_{dcop} », « C_{gsop} » et « g_{mop} »	47
III.6.1 les caractéristiques « C_{dcop} ».....	47
III.6.2 les caractéristiques« C_{gsop} ».....	49
III.6.3 les caractéristiques« g_{mop} ».....	51
III.7 Conclusion	52

Introduction

générale

Introduction générale

L'optoélectronique offre une gamme de plus en plus large d'applications qui inclut les systèmes de communications optiques, l'enregistrement de données optiques, la détection optique, etc. Elles concernent principalement l'interaction de la lumière avec des dispositifs actifs; les transistors à effet de champs à barrière Schottky, MESFETs, se classent parmi ces dispositifs [1]. Notons que le MESFET GaAs éclairé se distingue d'une considération particulière grâce à son application potentielle comme un photo-détecteur à haute vitesse [2]. Également le MESFET GaAs à commande optique, communément appelé OPFET GaAs, est considéré comme un dispositif clé utilisé dans la conception de MMIC [3].

Le développement ou l'amélioration des nouvelles filières de transistor à effet de champ ne peut s'envisager sans l'appui de la modélisation physique qui permet la prédétermination des caractéristiques et l'optimisation des structures par la simulation.

Ce travail rentre dans le cadre de la modélisation et de la simulation des transistors à effet de champ à barrière Schottky optique dit OPFET .

Pour décrire son fonctionnement, nous avons développé un modèle analytique, dont la mise en œuvre est efficace, pour montré l'effet du dopage, l'épaisseur effective du canal et les tensions de polarisation sur le comportement statique du transistor.

Ce mémoire s'organise en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur le MESFET GaAs, En rappelant les notions de base nécessaires à la compréhension de sa structure et son principe de fonctionnement avec et sans l'influence de la lumière, ses caractéristiques principales en précisant les trois régions linéaire, sous linéaire et saturée. Ensuite la diode grille Schottky et les phénomènes de transport de charge

Le deuxième est basé sur la présentation d'un modèle analytique dont le but est de décrire les phénomènes physiques régissant le comportement du MESFET optique, et reconnaître l'influence des paramètres physique et des paramètres technologiques sur son comportement électrique.

Le troisième chapitre présente un programme de simulation a travers le logiciel de simulation MATLAB 9, élaboré à partir des équations établies dans le deuxième chapitre en présentant l'ensemble des résultats de simulation des caractéristiques statiques et dynamiques des transistors MESFET GaAs dans les deux conditions (éclairage et obscurité). Au cours de cette présentation, l'interprétation des résultats obtenus est faite en détaille .

En fin une conclusion générale couronne ce mémoire, et une liste bibliographique pour guider le lecteur intéressé

Chapitre I :

Généralités

I.1 Introduction

Dans ce chapitre , nous présentons en premier lieu les propriétés physique et électronique des semi-conducteur ,aussi nous décrivons les propriétés optiques de l'arsenic de Gallium en particulier qui possède des caractéristique très importants .

Par la suite , nous décrivons la jonction Schottky et les différentes familles des transistor à effet de champs et spécialement le MESFET GaAs , nous parlons du dispositif lui-même ,sa structure les caractéristiques et le principe de fonctionnement lorsqu'il est soumis à la lumière (conséquence de l'éclairage) d'ou l'appellation OPFET GaAs .

I.2 Définition d'un semi conducteur

Du point de vue électrique, on différencie trois types des matériaux : les isolants, les conducteurs et les semi conducteurs. Ces derniers sont intermédiaires entre les métaux et les isolants : à $T = 0\text{ K}$ un semi conducteur se comporte comme un isolant. Néanmoins, il conduit l'électricité dès que la température augmente. La résistivité des semi conducteurs varie entre $10^{-3}\Omega\text{cm}$ et $10^9\Omega\text{cm}$, alors que celle des métaux est de l'ordre de $10^{-6}\Omega\text{cm}$ et celle des isolants peut atteindre $10^{22}\Omega\text{cm}$. Un semiconducteur est donc un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique est suffisamment important. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et des isolants [4].

Le comportement électrique des semiconducteurs est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi conducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses bornes, un faible courant électrique apparait, provoqué à la fois par le déplacement de tels électrons et celui des « trous » qu'ils laissent dans la bande de valence. Dans un semi conducteur il existe deux types de conduction : la conduction par électrons et la conduction par trou. Lorsque dans un cristal certaines liaisons entre atomes se cassent, les électrons sont libres de se déplacer. L'emplacement de la liaison cassée est appelé trou. Sous l'effet du champ électrique les électrons se déplacent dans le sens inverse du champ et les trous se déplacent dans le sens de champ [4].

I.3 Propriétés électroniques et physiques des semiconducteurs

Les semiconducteurs sont des matériaux présentant une conductivité électrique intermédiaire entre les métaux et les isolants. Les semiconducteurs sont primordiaux en électronique, car ils offrent la possibilité de contrôler, par divers moyens, aussi bien la quantité de courant électrique susceptible de les traverser, que par la direction que peut prendre ce courant. La famille des matériaux semiconducteurs, peut être classée en deux familles. Les matériaux à gap direct, comme la plupart des composés issues des colonnes III-V du tableau périodique des élément chimiques et les matériaux à gap indirect comme le silicium (colonne IV)[5] .

I.3.1 Transition directe

On appelle transition directe le passage d'un électron d'un niveau énergétique à un autre sans que sa quantité de mouvement ne soit modifiée. Sur la figure I-1, on a représenté la transition directe d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction dans un semiconducteur à bande interdite directe (direct gap), ce même semiconducteur dans lequel le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont caractérisés par le même vecteur d'onde[6].

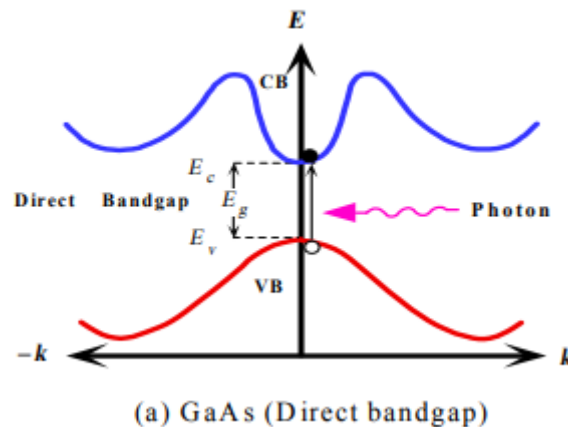


Figure I-1: Transition directe.

I.3.2 Transition indirect

On appelle transition indirecte le passage d'un électron d'un niveau énergétique à un autre nécessitant une modification de sa quantité de mouvement. Sur la figure I-2, on a représenté la transition indirecte d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction dans un semiconducteur à bande interdite indirecte (indirect gap), dans lequel le

minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont caractérisés par des vecteurs d'onde K différents[6].

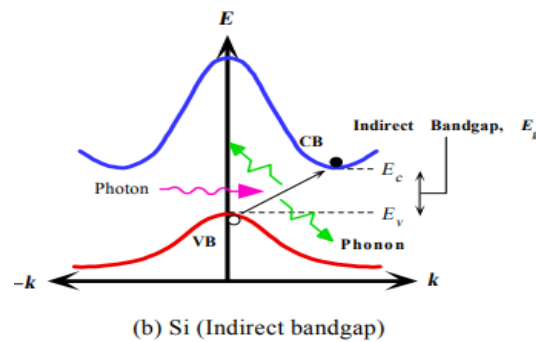


Figure I-2: Transition indirect .

I.3.3 Mobilité et vitesse des porteurs

La mobilité et la vitesse des porteurs représentent deux grandeurs physiques très intéressantes caractérisant les matériaux semiconducteurs. Nous traçons la vitesse des électrons en fonction du champ électrique appliqué pour quelques semiconducteurs (GaAs, InP, GaInAs), nous obtenons alors les courbes représentées sur la figure I-3. Pour les faibles champs électriques, nous vérifions une proportionnalité entre l'augmentation de la vitesse des électrons et celui du champ électrique. Pour les forts champs la vitesse présente une partie de résistance différentielle négative. L'explication simplifiée de ce phénomène est que lorsque le champ électrique devient important, les interactions des porteurs avec les vibrations du réseau entraînent une diminution de la mobilité des électrons. Cette diminution de la mobilité se traduit par une variation non linéaire de la vitesse des électrons. Si l'on conserve la définition habituelle de la mobilité comme étant le rapport entre la vitesse électronique et le champ électrique.

$$v = \mu(E) \times E \quad (\text{I-1})$$

Alors la mobilité des électrons n'est pas constante et varie fortement avec l'augmentation du champ électrique.

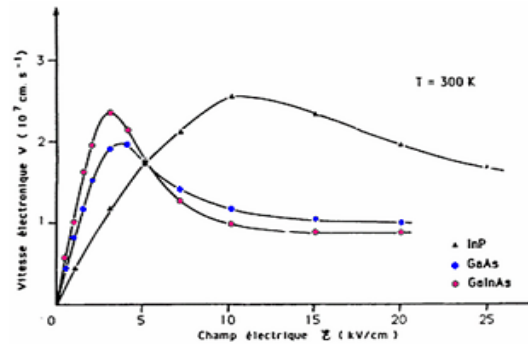


Figure I-3: Caractéristiques vitesse - champ électrique en régime de transport stationnaire pour quelques semiconducteurs à 300° K [7].

I.3.4 Bandes d'énergie

Bien que les électrons d'un atome isolé aient des niveaux d'énergie permis bien définis, le comportement de ces électrons dans un réseau cristallin périodique est différent. Si la distance entre les atomes est suffisamment petite, comme dans le cas du réseau cristallin du silicium, la présence des atomes voisins génère une sorte d'interférence entre les niveaux permis de chaque atome. Cela entraîne une multitude quasi continue d'états autour de chaque niveau permis de l'atome individuel. Cet ensemble d'états, très proches entre eux, est plutôt considéré alors comme une bande d'énergie permise, avec une densité d'états associée. Les niveaux d'énergie des électrons de valence et le niveau d'énergie d'ionisation génèrent ainsi deux bandes d'énergies permises particulièrement intéressantes, la bande de valence et la bande de conduction, séparées par une bande dépourvue de niveaux permis, nommée bande interdite (Figure I.4). La particularité de ces bandes permises tient au fait que les électrons peuvent circuler librement dans toute la maille cristalline et ainsi générer des courants de conduction électrique (s'agissant d'électrons partagés par les atomes du réseau cristallin)

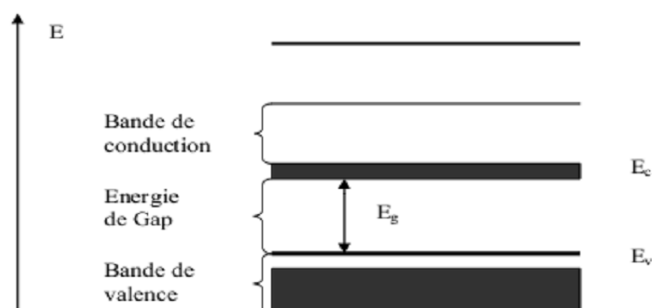


Figure I-4: Diagramme des bandes d'énergie des semiconducteurs

A des températures très basses, la bande de conduction se trouve vide d'électrons et la bande de valence est complètement occupée, car l'énergie thermique n'est pas suffisamment importante pour ioniser les atomes du réseau cristallin. A des températures normales un bon nombre des atomes ionisés ont déjà cédé leurs électrons à la bande de conduction, dans laquelle ils participent à la conduction électrique avec une charge négative.

La bande de valence, même quasiment pleine, présente un nombre de niveaux inoccupés (trous) égal au nombre d'électrons dans la bande de conduction (dans le cas d'un semi conducteur intrinsèque); ces niveaux inoccupés peuvent être occupés par un électron de valence d'un atome voisin et ainsi se déplacer dans le réseau cristallin, et participer à la conduction électrique comme s'ils étaient des particules chargées positivement

Au voisinage de chacune des limites E_v et E_c , respectivement de la bande de conduction et de la bande de valence, la densité d'états permis $N(E)$ peut être estimée avec l'approximation parabolique suivante [6] :

$$N_v(E) = K_v(E_v - E)^{1/2} \quad (\text{I- 2})$$

$$N_c(E) = K_c(E - E_c)^{1/2} \quad (\text{I- 3})$$

K_c et K_v étant des constantes pratiquement indépendantes de la température.

I.4 Propriétés électronique et optique du matériau GaAs

Le GaAs est un matériau semi-conducteur **III-V** composé de l'élément gallium (Ga) de la colonne **III** et de l'élément arsenic (As) de la colonne **V** du tableau périodique des éléments[8]. Le GaAs a été obtenu par Goldschmidt en 1929, mais les premières propriétés électroniques rapportées des composés **III –V** comme semi-conducteurs ne sont apparues qu'en 1952.

L'arséniure de gallium, GaAs, possède beaucoup d'avantages parmi lesquels on cite : un gap direct, une mobilité d'électrons élevée, une excellente résistance thermique, etc .[9]. De plus, l'arséniure de gallium est le plus ciblé des composés semi-conducteurs **III-V**, en raison de ses excellentes propriétés photoélectriques [9] et son vaste domaine d'application.

Des travaux de recherche [9, 10 , 11] récents montrent l'importance des propriétés optiques du GaAs. A. P. Craig et all en 2015, ont mis en évidence son rendement important dans différents domaines d'application, particulièrement comme photo-détecteur. Les résultats de R.

Ramesh et al en 2013 montrent que le photo-curant généré, la distribution de la mobilité, la résistivité ainsi que la transconductance d'un Fin Field Effect Transistors, FinFET photo-detectors à base de GaAs sont meilleurs que ceux d'un finFET photodetectors à base de Si. Plusieurs travaux se sont intéressés aux propriétés du GaAs. Le **tableau I.1** résume quelques propriétés physiques des différents semiconducteurs

Propriété GaAs	GaAs	Ge
Structure du cristal	Zinc blende	Diamant
Constante du réseau	5.65 Å	5.65 Å
Densité	5.32 g/cm ³	5.323 g/cm ³
Poids moléculaire	144.64 g/mole	104.6 g/mole
Coefficient de dilatation thermique	5.8 10 ⁻⁶ K ⁻¹	5.9 10 ⁻⁶ K ⁻¹
La chaleur spécifique	0.327 J/g.K	0.31 J/g.K
La conductivité thermique	0.55 W/cm. °C	0.6 W/cm. °C
Constante diélectrique	12.85	16
Bande d'énergie interdite	1.424 eV	0.66 eV
Mobilité des électrons	8500 cm ² /V.s	3600 cm ² /V.s
Mobilité des trous	400 cm ² /V.s	1900 cm ² /V.s

Tableau I-1 Propriétés physiques des différents semiconducteurs

I.5 Diode Schottky

Une diode Schottky utilise une jonction métal-semiconducteur (au lieu d'une jonction p-n comme les diodes conventionnelles). Alors que les diodes standard en silicium ont une tension de seuil d'environ 0.6 volt, les diodes Schottky ont une tension de seuil (pour une polarisation directe d'environ 1 mA) dans la gamme de 0.15V à 0.45 V, ce qui les rend utiles en limitation de tension et en prévention de saturation des transistors. La différence fondamentale entre les deux composants est que le fonctionnement fait appel aux porteurs majoritaires dans la diode SCHOTTKY alors que ce sont les porteurs minoritaires qui interviennent dans la diode PN.[12]

Lorsque un métal et un semi-conducteur sont en contact, il existe à l'interface une barrière de potentiel $q\phi_b$ qui est égale à : $q\phi_b = q\phi_m - q\chi$

Où :

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

$q\chi$: représente l'affinité électronique du semi-conducteur .

V_b : est le potentiel de barrière de la ZCE

ZCE : Zone de charge d'espace.

Lorsqu'on applique une polarisation direct à la diode Schottky les électrons de la région N vont transiter vers le métal tandis que le niveau de Fermi du système est aligné.

Le contact métal-semiconducteur est ohmique ou redresseur suivant la différence des travaux de sortie et le type du semi-conducteur.

Si $q\phi_m > q\phi_s$

Le contact métal-semiconducteur (n) est redresseur.

Le contact métal-semiconducteur (p) est ohmique.

Si $q\phi_m < q\phi_s$

Le contact métal-semiconducteur (n) est ohmique.

Le contact métal-semiconducteur (p) est redresseur.

Dans le cas de : $q\phi_m > q\phi_s$

Lors de la mise en contact du métal et du semi-conducteur, les électrons du semi-conducteur situés près de l'interface possèdent une plus grande énergie que ceux du métal. Ils vont donc transférer vers le métal en laissant derrière eux les atomes donneurs positifs fixes. Du côté métal, le surplus d'électrons se concentre avec une densité d'états d'énergie d'ordre 10^{22} cm^{-3} . Ce phénomène s'arrête lorsque l'alignement des niveaux de FERMİ est réalisé. Une zone désertée (ZCE) apparaît donc dans le semi-conducteur d'épaisseur W dans ce cas en parlera d'une barrière métal-semiconducteur ou encore d'une diode SCHOTTKY.[12]

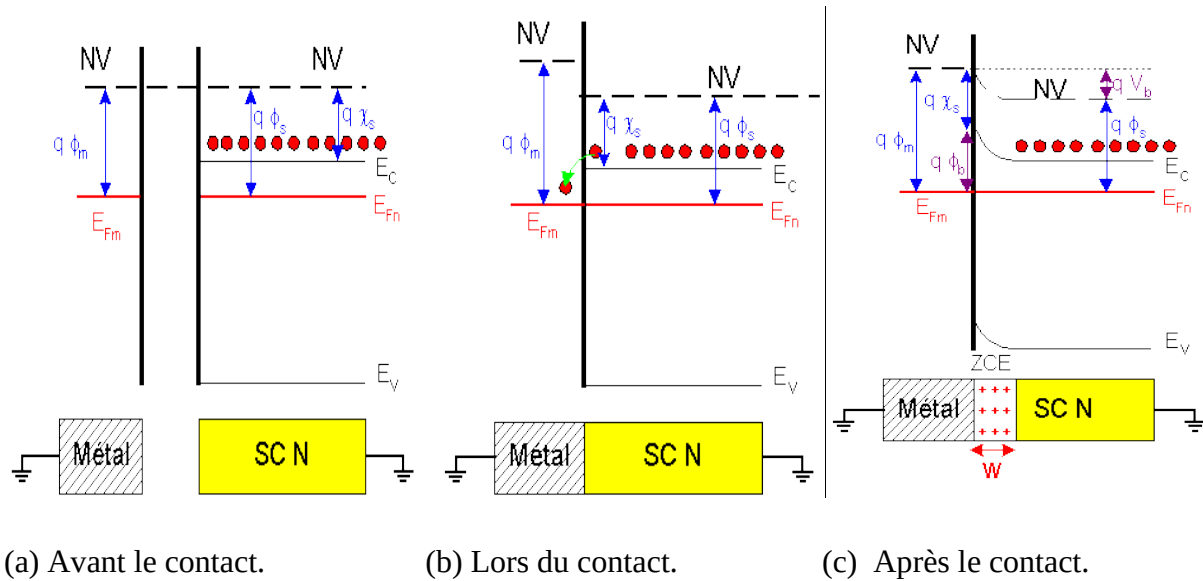
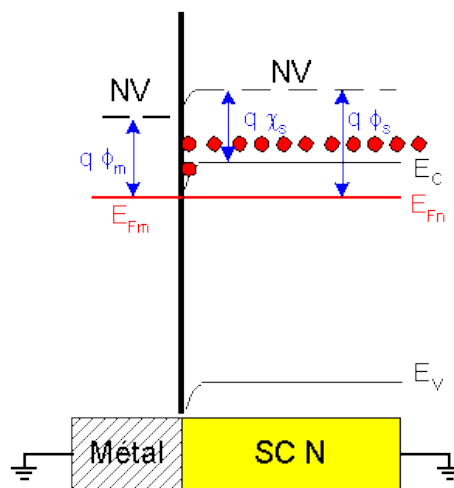


Figure I-5 : Contact Schottky

Dans le cas de : $q\phi_m < q\phi_s$

Lors de la mise en contact du métal et du semi-conducteur, les électrons du métal situés près de l'interface possèdent une plus grande énergie que ceux du semi-conducteur. Ils vont donc transférer vers ce dernier. Il apparaît une zone de déficit de porteurs négatifs dans le métal et une accumulation de porteurs dans le semi-conducteur, le niveau de FERMİ s'aligne. Pour une application d'une tension on parlera donc d'un contact ohmique[12].



(d) Après le contact

Figure I-6 : diagramme énergétique d'un contact Schottky

I.6 Transistor à effet de champ

Le transistor à effet de champ dénommé FET ou TEC repose sur le fonctionnement d'un dispositif semi-conducteur unipolaire, c'est-à-dire. qu'un seul type de porteur intervient. Ainsi, pour une utilisation aux hautes fréquences, il est préférable que le type de porteur responsable de l'effet transistor soit celui présentant les meilleures propriétés de transport : mobilité, vitesse et coefficient de diffusion. Les électrons possèdent des propriétés plus intéressantes que les trous les FET sont essentiellement élaborés sur du matériau de type N. Leur principe peut être comparé à une résistance semi-conductrice dont la section est modulée par une jonction polarisée en inverse, principe décrit pour la première fois en 1952 par W. Shockley [13]. Sur ce principe, différentes structures de transistors à effet de champ correspondant à différents contacts de grille ont été élaborées : [14]

- grille à jonction PN pour le transistor JFET (Junction Field Effect Transistor),
- grille métallique isolée pour le transistor MOSFET (Metal Oxide Semi-conductor Field Effect Transistor).
- grille métallique à barrière Schottky pour le transistor MESFET (Metal Semi-conductor Field Effect Transistor).

Les procédés de fabrication de composants à effet de champs sont regroupés dans le tableau qui suit:

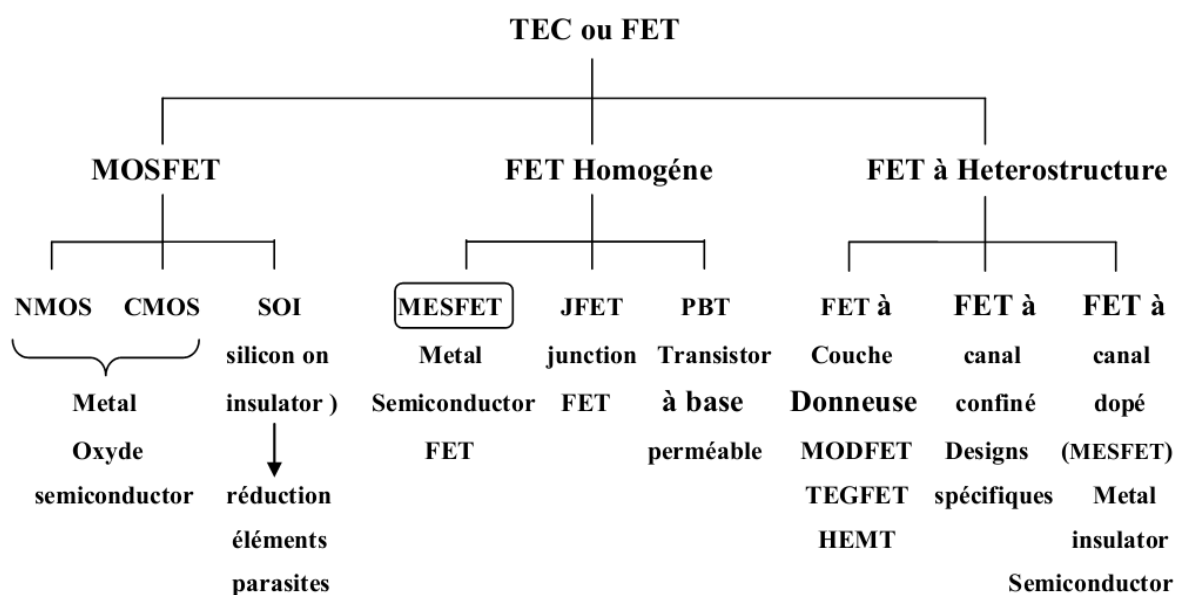


Tableau I-2: Famille des transistors à effet de champ [15]

I.6.1 Transistor à effet de champ a contact SCHOTTKY (MESFET)

I.6.1.1 Historique[16]

Le MESFET (Metal Semi-conducteur Field Effect Transistor) fut le premier composant à être fabriqué à partir d'un composé **III-V**. En 1966 Carver Mead [17] proposa en premier lieu de remplacer le Silicium des premiers FET par un semi-conducteur **III-V** tel que l'Arséniure de Gallium (GaAs), puis réalisé par Hoop [18]. Cette évolution au niveau matériau a permis l'utilisation des MESFET aux fréquences micro-ondes, et depuis cette date de nombreux travaux ont été effectués pour réaliser des transistors de plus en plus performants à base de matériau à grand gap. Les premiers résultats obtenus avec un MESFET au carbure de silicium (4H-SiC) datent de 1994.

I.6.1.2 Description[19]

Dans l'état de l'art aujourd'hui, la structure du Transistor à effet de champ à contact Schottky repose sur une couche active (canal) directement implantée dans le substrat semi isolant. Ensuite, la grille en métal réfractaire est déposée pour matérialiser le contact schottky. Puis les zones N⁺ sont implantées en se servant du métal comme d'un masque pour obtenir deux zones d'accès auto alignées sur la grille.

La figure (I-4) présente une coupe schématique d'un MESFET. La structure présentée met en évidence les différentes couches utilisées pour sa réalisation. La couche active est généralement une couche du type N qui repose sur un substrat semi-isolant. Les contacts de source et de drain sont des contacts ohmiques contrairement au contact Schottky de grille.

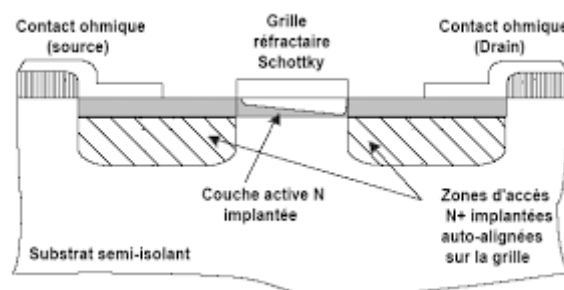


Figure I-7 : Vue en coupe du MESFET GaAs .

I.6.1.3 Principe de fonctionnement [16]

La base du fonctionnement d'un MESFET est la possibilité de moduler l'épaisseur du canal sous la grille (figure I-8). Le contact de grille est de type Schottky. Une couche dépeuplée d'électrons libres, appelée zone de charge d'espace (ZCE), se crée sous la grille. Aucun courant ne peut traverser cette couche. La région où le courant peut circuler est donc réduite à la fraction de la couche active non dépeuplée. En régime de fonctionnement normal le drain est polarisé positivement par rapport à la source, tandis que la grille est polarisée négativement, toujours par rapport à la source.

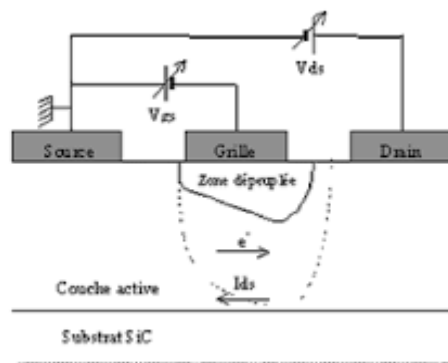


Figure I-8 : Vue en coupe et polarisation d'un MESFET

- A tension de drain fixée, la polarisation négative de la grille a pour effet d'augmenter la pénétration de la zone de charge d'espace dans la couche active, diminuant ainsi le passage du courant. Lorsque la tension de grille est suffisamment négative, la ZCE vient complètement obstruer le canal (en pointillé sur la figure I-8), ne laissant plus passer le courant. Le transistor est alors dit « pincé » et la tension appliquée sur la grille est alors appelée tension de pincement (V_p).
- A tension de grille fixée, l'augmentation de la tension positive de drain crée un champ électrique dans le canal. Ce champ entraîne les électrons de la source vers la grille, établissant ainsi un courant I_{ds} (drain- source).
- Avec l'accroissement de la tension de drain, la section de la zone dépeuplée (zone de charge d'espace) commence à se déformer en devenant beaucoup plus importante côté drain que côté source. Ce resserrement du canal provoque un ralentissement de la croissance du courant de drain. Arrivé à un certain stade, l'augmentation de la tension V_d n'a quasiment plus aucune influence sur le courant. On nomme le courant de saturation (I_{dsat}), lorsque le courant de drain

(I_d) du transistor commence à rentrer dans la zone de saturation pour une tension de polarisation de grille V_g nulle

I.6.2 Conséquence de l'éclairage de MESFET

Lorsqu'un semi-conducteur est soumis à une énergie lumineuse dont l'intensité est supérieure ou égale au gap, il apparaît une création de paires électron-trous en excès. Ce phénomène est à l'origine de variations de certaines caractéristiques du MESFET qui se trouvent modulées par l'effet photonique. Parmi les propriétés affectées, nous citons particulièrement :

- Génération de porteurs en excès: effet photovoltaïque [20].
- Conduction dans les régions inter-contacts: entre Source-Grille et Drain-Grille: effet de photoconductivité [20].
- Apparition d'une photo-tension [21]
- Variation de la largeur de la zone de déplétion [20].

I.6.2.1 Effet photovoltaïque

L'éclairage d'un MESFET à travers les zones inter-électrodes ou la grille par une intensité d'éclairage supérieure au gap crée des porteurs photo-générés en excès sous la grille, dans la couche active ce qui module le composant. L'effet photovoltaïque provoque une modification de la tension interne de la grille Schottky ainsi que de la conductivité du canal. Comme conséquence de l'effet photovoltaïque, l'apparition d'une tension directe à travers la jonction métal-semi-conducteur qui augmente avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement incident[22]

I.6.2.2 Effet photoconducteur

La création de paires électron-trou dans la région active, diminue les résistances parasites drain-source. Ainsi, l'augmentation de la densité d'éclairage augmente la conductivité de l'OPFET entre le drain et la source dans le canal actif [20]. L'OPFET acquerra l'effet photoconducteur si le temps de transit des électrons est inférieur à la durée de vie des trous dans le composant [20]. Il est évident que l'augmentation du nombre des porteurs en excès conduit à l'augmentation de la conductivité du canal conducteur et par conséquent l'amélioration du courant de sortie [23]

I.6.2.3 Effet Photo-tension

Le passage du photo-courant de la couche active vers la grille développe une photo-tension à travers la jonction Schottky [24]. Ainsi, il se développe une tension-photoélectrique à travers la jonction Schottky qui se superpose à la polarisation de grille de manière à ce que la polarisation de la jonction de grille soit en direct. La tension-photonique développée modifie la hauteur de la barrière Schottky [25], modulant ainsi la zone de charge d'espace. Par conséquent, le canal effectif se trouve également modulé; ce qui améliore les paramètres caractéristiques de l'OPFET [23]. Ce résultat a été prouvé expérimentalement par A. A. A. D. Salles [23] dans le cas où une résistance élevée ($R_G \geq 50 \text{ k}\Omega$) est connectée en série avec la grille. Notons que la tension photonique développée augmente avec l'augmentation de la densité d'illumination, ensuite elle se sature. Cette saturation est attribuée à la diminution de la durée de vie des porteurs en excès causée par l'augmentation du taux de recombinaison qui limite la photo-génération de ces porteurs [24]

I.8 MESFET GaAs sous l'incidence de la lumière (OPFET)

I.8.1 Structure

Le MESFET (Metal Semi-conducteur Field Effect Transistor) est le premier composant réalisé sur GaAs. IL comporte le plus souvent une couche active de type N, réalisée sur substrat semi-isolant (SI), deux contacts ohmiques (source et drain) et une grille métallique déposée entre la source et le drain dans des conditions créant une barrière Schottky[26].

la structure OPFET GaAs est semblable à celui du classique MESFET GaAs, pour la présente analyse, on suppose que le faisceau optique se concentre verticalement vers le métal de la grille semi-transparente supposé qu'elle est fabriquée d'Indium Tin Oxide (ITO) à cause de sa transmittance optique plus élevé, avec la condition que les coefficients de réflexion et de transmission des interfaces ne dépendent que des caractéristiques correspondantes électromagnétique. On notera qu'en fonction de la géométrie de la structure proposée, le courant entre les bornes de drain et de source s'écoule perpendiculairement à la direction d'incidence du faisceau optique. Par conséquent, le flux de charge se produit dans le sens horizontal. Le rayonnement incident est caractérisé par sa densité de puissance optique P_{opt} en watts par mètre carré (W/m^2), et subir une réflexion à la surface du métal et à l'interface métal-semiconducteur [26].

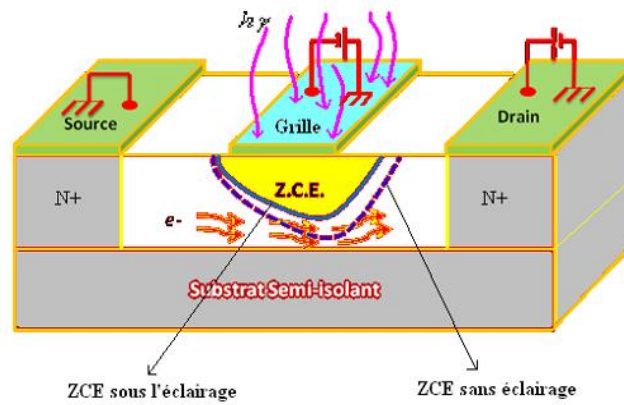


Figure I-9: Structure du MESFET (OPFET) GaAs sous la lumière.

I.8.2 Principe de fonctionnement

La figure II-11 présente le principe de fonctionnement du MESFET GaAs sous la lumière, où le courant drain-source s'écoule le long de la direction ox avec un rayonnement lumineux incident à travers le long de la direction oy du dispositif. Quand le dispositif est allumé, les photons transmis de la lumière sont absorbés, par conséquent des paires électron-trou sont produits dans la région du canal et dans la zone de charge d'espace de la jonction Schottky. Quand la tension de drain est appliquée les électrons générés optiquement se déplacent dans la direction du canal où ils se contribuent au courant tandis que les trous se déplacent dans la direction opposée où ils se recombinaient avec des états de surface. Pour cette raison les électrons traversant la jonction, une phototension est développée. Cette tension étant polarisée en réduisant la largeur de la zone de déplétion[26].

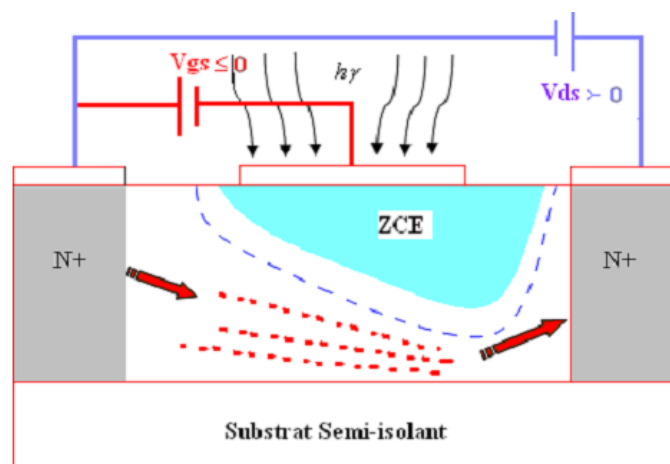
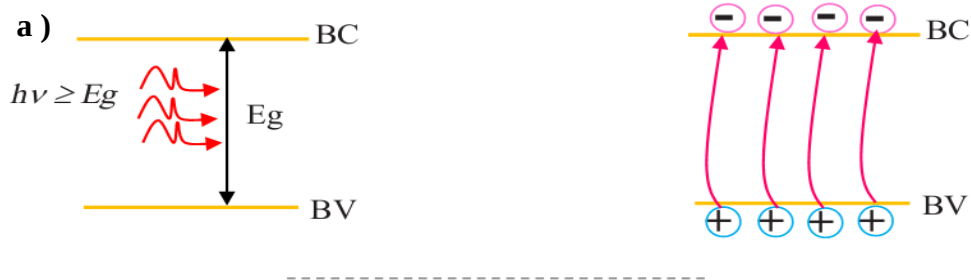


Figure I-10: Principe de fonctionnement du MESFET (OPFET) GaAs sous la lumière.

I.8.3 Phénomènes de génération – recombinaison dans un OPFET GaAs

Dans un matériau semi-conducteur, l'absorption d'un photon d'énergie supérieure à son énergie de gap induit la photo-génération de paires électron-trou (Figure I.11 a). En effet, cette création de porteurs en excès modifie sensiblement les caractéristiques telles que la conductivité et la résistivité. Plusieurs processus interviennent pour que le semi-conducteur revienne à l'état d'équilibre. L'un de ces processus est la recombinaison des électrons avec les trous. Notons que cette recombinaison peut se produire soit directement avec émission d'un photon, ou sans émission de photon par l'intermédiaire d'un défaut, dislocations, lacunes, impuretés chimiques ou l'interaction avec la surface.

Dans le cas d'un OPFET, dans les régions neutres et en absence de tout champ électrique appliqué, le transport des porteurs est assuré par des processus de diffusion et de recombinaison. Cependant, dans les régions de déplétion, les phénomènes de dérive et de recombinaison sont à l'origine de ce transport [27]. Notons que les trous générés dans une région de déplétion sont respectivement entrainés vers le métal de grille et le substrat semi isolant par la présence d'un fort champ électrique dans cette région. Quant aux trous en excès, photo-générés dans la région neutre du canal, diffusent vers la région de déplétion et, ensuite vers le métal de la grille (figure I.11 b).



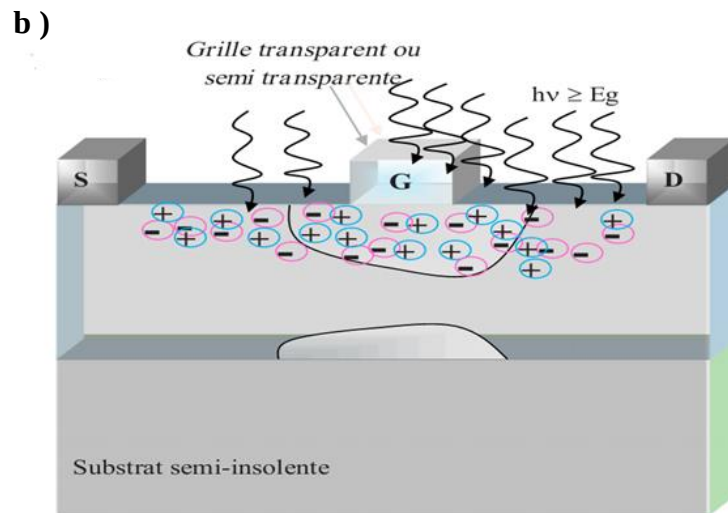


Figure I-11 : MESFET sous effet Photonique : **(a)** processus de génération des porteurs et **(b)** distribution spatiale des porteurs générés.

Par contre, les électrons créés dans la région de déplétion sont déplacés vers le canal ainsi que les électrons photo-générés dans le substrat près de la jonction canal/substrat [28]. Le paramètre responsable de ce processus est la différence de potentiel entre le métal et le semi-conducteur. Il est évident que les électrons et les trous créés participent au processus de conduction. Notons que les trous qui se recombinent avec les centres de piégeage influencent les propriétés électriques du composant via l'apparition d'un courant de fuite de grille. Par ailleurs, il existe plusieurs modèles qui prennent en considération la recombinaison des trous avec les pièges de la surface afin de déterminer les caractéristiques d'un MESFET éclairé [28, 29].

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté, une étude sur les propriétés physiques et électriques des matériaux semiconducteurs ,et l'arséniure de gallium GaAs en particulier qui possède des caractéristiques très importantes pour les composants par la suite, nous présentons la diode Schottky et les différentes familles des transistor à effet de champs et spécialement le MESFET GaAs , et puis les caractéristiques principales du composant MESFET GaAs sous l'incidence de la lumière en précisant la structure OPFET, et le principe de fonctionnement .

Chapitre II :

Modélisation du MESFET optique GaAs OPFET

II.1 Introduction

La détermination de la caractéristique du (OPFET) donné par la loi $I_{dsop} = f(V_g, V_d)$ est primordiale pour comprendre son comportement, plusieurs expressions analytiques ont été proposées depuis 1952 [30,31].

Dans ce chapitre, nous présentons un modèle analytique du OPFET GaAs. Pour déterminer les propriétés statiques de ce composant. En prenant compte de l'effet de la lumière sur les propriétés du composant ainsi l'influence des paramètres géométrique et physique sur ses caractéristiques.

II.2 Mécanismes de transport des porteurs de charge

Pour des cristaux semiconducteurs isothermes où les flux de chaleurs sont négligeables et en tenant compte des gradients de potentiel et de concentration des porteurs, deux mécanismes peuvent être à l'origine du déplacement des porteurs de charges, c'est-à-dire des courants de la conduction et de la diffusion.

- Pour un champ électrique E qui règne dans le semi-conducteur, il existe une densité de courant $J_n(J_p)$ relative aux électrons et aux trous [32].

$$J_n = qn\mu_n E \quad (\text{II-1})$$

$$J_p = qn\mu_p E \quad (\text{II-2})$$

Lorsque les porteurs libres ne sont pas uniformément distribués dans le cristal, ils subissent un processus de diffusion caractérisé par un gradient de concentration des porteurs.

Les densités de courant des électrons et des trous qui leur sont associées sont données par :

$$J_n = qD_n \nabla n \quad (\text{II-3})$$

$$J_p = qD_p \nabla p \quad (\text{II-4})$$

D_n et D_p sont les coefficients de diffusion des électrons et des trous

Lorsque dans un semiconducteur les deux mécanismes sont présents, le courant total s'écrit:

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \nabla n \quad (\text{II-5})$$

$$J_p = qn\mu_p E + qD_p \nabla p \quad (\text{II-6})$$

Avec $D_n = \frac{KT\mu_n}{q}$, $D_p = \frac{KT\mu_p}{q}$

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

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla J_n - G_n - R_n \quad \text{Pour les électrons} \quad (\text{II-7})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{-1}{q} \nabla J_p - G_p - R_p \quad \text{Pour les trous} \quad (\text{II-8})$$

G_n est le taux de génération recombinaison supposé identique pour les électrons et les trous: c'est la différence entre le nombre de porteurs générés ou créés et ceux qui disparaissent ou capturés pendant l'unité de temps et dans l'unité de volume [32]:

$$G = g_n(P) - r_n(P) \quad (\text{II-9})$$

II.3 Equation de fonctionnement du MESFET GaAs

La densité de courant J_x en un point du canal conducteur s'écrit [33]:

$$J_x = \sigma(x, y, z) \cdot E_x = \sigma(y) \cdot E_x = -\rho(y) \cdot v(E_x) \quad (\text{II-10})$$

Avec $\sigma(y) = d(y) \cdot \mu(E_x)$ et $v(E_x) = -\mu(E_x) \cdot E_x$

Aussi $\rho(y) = q \cdot n(y)$

- E_x est le champ électrique longitudinal suivant $\overrightarrow{Ox}$
- $v(E_x)$ est La vitesse des porteurs de charge.
- $n(y)$ est la densité des porteurs.
- $d(y)$ est la densité de charge du canal
- σ c'est la conductivité électrique

Le potentiel dans la zone de charge d'espace du canal se calcul a partir de l'équation de poisson :

$$\Delta V = \frac{d^2V}{dx^2} + \frac{d^2V}{dy^2} + \frac{d^2V}{dz^2} = \frac{-\rho(x,y,z)}{\epsilon} \quad (\text{II-11})$$

En ce qui concerne le potentiel, nous pouvons écrire pour des raisons de symétrie, qu'il est constant dans la direction Z de sorte que $(d^2V/dz^2 = 0)$ D'autre part nous ferons l'hypothèse du canal graduel, le potentiel le long du canal et par suite la largeur h de la

(ZCE) varie graduellement entre la source et le drain. Cette largeur est h_s côté source et h_d côté drain. Le canal étant conducteur et sa longueur étant beaucoup plus importante que la largeur h de la ZCE, la variation du champ électrique est plus importante dans la direction perpendiculaire à la structure que dans la direction longitudinale. On peut donc ramener l'équation de Poisson à une dimension [12]:

$$\Delta V = \frac{d^2V}{dy^2} - \frac{dE_y}{dy} = \frac{-\rho(y)}{\varepsilon} \quad (\text{II-12})$$

On considère que le dopage du canal est homogène, la densité de charge est constante donc, on peut écrire:

$$\rho(y) = q \cdot N_d \quad \text{et} \quad \frac{d^2V}{dy^2} = -\frac{q \cdot N_d}{\varepsilon} \quad (\text{II-13})$$

N_d : La concentration des électrons.

q : La charge élémentaire.

Après une première intégration de l'équation du Poisson, nous obtenons, avec la condition $E = 0$ pour $y \geq h$:

$$\frac{dV}{dy} = -\frac{q \cdot N_d}{\varepsilon} \left(h \cdot y - \frac{y^2}{2} \right) \quad (\text{II-14})$$

Par l'intégration du potentiel deux fois, on obtient:

$$V(y) = -\frac{q \cdot N_d}{\varepsilon} (h - y) \quad (\text{II-15})$$

L'équation du potentiel prend une valeur maximale à la tension de diffusion V_b à ($y = h$). Cette tension de diffusion est donnée par la différence des travaux de sortie du métal et du semi-conducteur.

$$qV_{bi} = q \cdot (\Phi_m - \Phi_s) \quad (\text{II-16})$$

Elle correspond à la différence de potentiel entre les deux bornes de la zone de charge d'espace du semi-conducteur

$$V_{bi} = V(y = h) - V(y = 0) \quad (\text{II-17})$$

$$h = \left[\frac{2\varepsilon V_{bi}}{q \cdot N_d} \right]^{-1/2} \quad (\text{II-18})$$

Pour une structure polarisée par une tension V , la barrière de potentiel devient $V_{bi} - V$ et la largeur de la zone de charge d'espace devient:

$$h = \left[\frac{2\varepsilon (V_{bi} - V)}{q \cdot N_d} \right]^{-1/2} \quad (\text{II-19})$$

II. 4 Présentation du Modèle de P. CHAKRABARTI

Comme un certain nombre de recherches, des travaux théoriques et expérimentaux ont été signalés sur la commande optique MESFET. Un modèle analytique simple d'un ion implanté MESFET GaAs est utile pour la conception assistée par ordinateur de composants et circuits intégrés (IC). Examiner les caractéristiques optiques contrôlées de MESFET GaAs est nécessaire d'utiliser un modèle de grille éclairé photodétecteur MESFET [26].

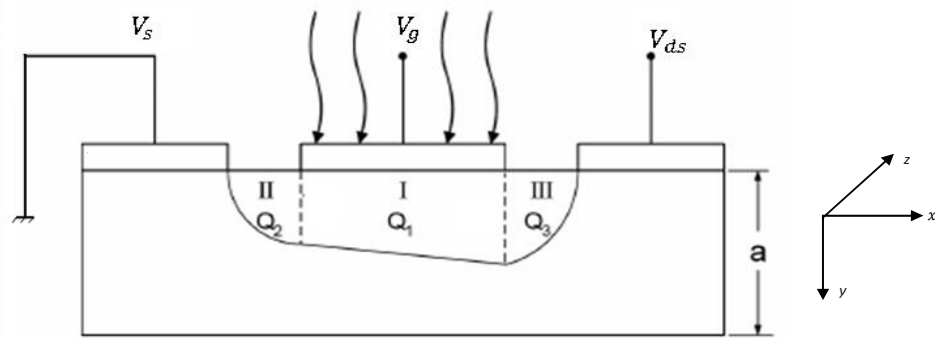


Figure II-1: Structure d'un MESFET éclairée [34].

Dans la présente analyse, le rayonnement incident a été caractérisé en termes de densité de puissance incidente optique $P_{opt}(W/m^2)$ qui subit une réflexion à la surface du métal ainsi qu'à l'interface métal-semiconducteur. En supposant que la densité de puissance optique pour diminuer de façon exponentielle avec la profondeur de pénétration dans le semiconducteur, les porteurs en excès générés par unité de volume à l'intérieur du semiconducteur peuvent être s'écrit comme [33].

$$\Delta n = G_{op}\tau_L = \frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}\tau_p}{ah\gamma} (1 - \exp(-\alpha a)) \quad (II-20)$$

Où G_{op} est le taux de génération optique par unité de volume, α est le coefficient d'absorption optique, τ_L est la durée de vie des porteurs minoritaires dans la condition d'illumination, R_m et R_s , sont les coefficients de réflexion des surfaces métalliques et semiconducteurs, respectivement, à la longueur d'onde de fonctionnement, a est la largeur de la zone active, h est la constante de Planck γ est la fréquence de fonctionnement.

D'après les équations de Fresnel [34], le coefficient de réflexion du champ sur toute l'interface de deux milieux dépend de la différence entre leurs indices de réfraction. Si l'épaisseur de l'un des moyens est finie. Ils doivent être pris en compte également un facteur associé à des

réflexions multiples dans la moyenne et un facteur associé au signal d'absorption. Ceci est le résultat d'une atténuation dans un environnement non nulle de conductivité. Cette analyse considère que l'incidence du faisceau optique est normale à la surface d'entrée. En général, lorsque la conductivité est élevée, la correction de la valeur finale du coefficient de réflexion associé au facteur d'absorption n'est pas calculée en raison de l'erreur introduite qui est très faible [35]. Par conséquent, comme le coefficient de réflexion de puissance est égal au module du champ carré du coefficient de réflexion, la valeur utiliser dans l'équation de taux de génération pour les coefficients de réflexion optique R_s sur la surface de GaAs est calculée par: [36]

$$R_s = \frac{(1 - n_r)^2 + K^2}{(1 + n_r)^2 + K^2} \quad (\text{II-21})$$

Où n_r est l'indice de réfraction obtenue par la racine carrée du produit de la permittivité relative ϵ_r de l'arséniure de gallium et sa perméabilité relative μ_r . Une fois que le semiconducteur est un matériau non magnétique, la partie réelle de l'indice de réfraction est déterminée uniquement par la constante diélectrique du matériau. Le paramètre K est lié au facteur d'atténuation du milieu par :

$$K = \frac{\alpha \lambda_{op}}{4\pi} \quad (\text{II-22})$$

λ_{op} : la longueur d'onde optique de la lumière incidente.

II. 4.1 Effet de l'éclairage sur la vie des transporteurs minoritaires

Les porteurs en excès générés dans la région en dessous de la grille de GaAs affectent la durée de vie des porteurs minoritaires. La durée de vie des porteurs minoritaires dans les conditions lumineux τ_L peut être obtenue à partir de:

$$\frac{\tau_L}{\tau_p} = \frac{n_i}{n_i + \Delta n} \quad (\text{II-23})$$

Où n_i est la concentration intrinsèque des porteurs dans le semiconducteur, τ_p est la durée de vie des porteurs minoritaires à l'équilibre et Δn sont les porteurs photo excédentaires générées dans le semiconducteur.

Une façon d'exprimer τ_L consiste à développer (II-23), en les associant avec l'équation (II-20), nous trouvons

$$\tau_L = \frac{n_i \tau_p}{n_i + \frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}}{ah\gamma} \tau_L (1 - \exp(-\alpha.a))} \quad (\text{II-24})$$

$$n_i \tau_L + \frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}}{ah\nu} \tau_L^2 (1 - \exp(-\alpha \cdot a)) = n_i \tau_p \quad (\text{II-25})$$

$$\frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}}{ah\nu} \tau_L^2 (1 - \exp(-\alpha \cdot a)) + n_i \tau_L - n_i \tau_p = 0 \quad (\text{II-26})$$

Nous résolvons l'équation du deuxième degré par la formule quadratique

$$\tau_L = \frac{-n_i \pm \sqrt{n_i^2 + \frac{4(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}}{ah\nu} (1 - \exp(-\alpha \cdot a)) \times n_i \tau_p}}{\frac{2(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}}{ah\nu} (1 - \exp(-\alpha \cdot a))} \quad (\text{II-27})$$

Après quelques simplifications simples, on peut écrire l'expression de τ_L comme suit :

$$\tau_L = \frac{\left\{ 1 + \frac{(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}\tau_p(1 - \exp(-\alpha a))}{an_i h\nu} \right\}^{1/2} - 1}{\frac{2(1-R_m)(1-R_s)P_{opt}(1 - \exp(-\alpha a))}{an_i h\nu}} \quad (\text{II-28})$$

II. 4.2 Tension photo-induite

En raison de l'éclairage direct de la grille, il se produit un développement de la photovoltage V_{op} au contact de grille de Schottky, ce qui réduit efficacement la polarisation inverse appliquée sur la grille V_g . Cependant, la tension photo-induite est fortement influencée par la recombinaison de surface, la durée de vie des porteurs minoritaires à l'état éclairé et la résistance externe présente dans le circuit de polarisation de grille. Les modèles précédents [23], [21], [37] ne tiennent pas compte de l'effet de la recombinaison de surface ni de la modification de la durée de vie des porteurs minoritaires sur la tension photo-induite. Le modèle actuel calcule la photo-tension en prenant en compte la recombinaison de surface et la durée de vie des porteurs minoritaires dans la condition éclairée (τ_L), qui s'est révélée être significativement différente de la durée de vie des porteurs minoritaires à l'équilibre (τ_p). Les paires de trous d'électrons générées dans région d'appauvrissement sont séparés par le champ existant dans la région. Les électrons se déplacent vers le canal tandis que les trous se déplacent vers la surface où ils se recombinent via les pièges de surface. La recombinaison de surface produit un courant de fuite qui affecte la photo-tension, ce qui génère un effet de retour, soit à travers la source, soit sur le substrat [13]. Les transporteurs de photos générés en excès affectent également la durée de vie des transporteurs de minorités

À l'état illuminé en état d'équilibre. Les deux effets ont tendance à réduire l'amplitude de la phototension V_{op} . Il a été observé que l'effet photovoltaïque est dominant pour une résistance de polarisation de grille externe très élevée uniquement [23].

Dans notre analyse, nous avons supposé une très haute résistance à être présent dans la grille du circuit. Cette approximation de la photo tension développée est égale à la tension en circuit ouvert de la phototension (V_{op}) qui affecte la polarisation de grille appliquée à la présence d'illumination. En circuit ouvert la phototension généré à la grille Schottky en présence de la recombinaison de surface peut être obtenue comme:

$$V_{op} = (\eta kT/q) \ln \left[\frac{q G_{op} \sqrt{\frac{kT}{q}} \mu_p \tau_L - Rq}{J_s} \right] \quad (\text{II-29})$$

Où T est la température absolue, k est la constante de Boltzmann, q est la charge électronique, η est la constante en fonction du semi-conducteur [23], μ_p est la mobilité de trou de GaAs et J_s est la densité de courant de saturation. Pour un semi-conducteur à forte mobilité tel que GaAs, la densité de courant J_s peut être approximée par la théorie de l'émission thermoionique et exprimée sous la forme [23]:

$$J_s = A^* T^2 \exp \left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT} \right) \quad (\text{II-30})$$

$q\phi_{Bn}$: est la hauteur de la barrière du contact Schottky à l'équilibre thermique et A^* est la constante de Richardson effective pour l'émission thermoionique.

Le taux de recombinaison de surface R peut être écrit comme [33]

$$R = \frac{N_T K_n K_p (n_s n_t - p_t)}{K_n (n_s + n_t) + K_p (p_s + p_t)} \quad (\text{II-31})$$

Où N_T est la densité de surface des pièges, K_n et K_p sont les facteurs de capture. Les concentrations de porteurs de surface n_s et p_s en condition éclairée sont données par:

$$n_s = \alpha P_{opt} (1 - R_m) (1 - R_s) \tau_n / h\nu \quad (\text{II-32})$$

$$p_s = \alpha P_{opt} (1 - R_m) (1 - R_s) \tau_p / h\nu \quad (\text{II-33})$$

qui prennent les valeurs n_t et p_t , respectivement, lorsque le niveau de Fermi se situe dans les pièges.

II. 4.3 Les caractéristiques courant-tension

Les caractéristiques de tension de courant du dispositif peuvent être obtenues en intégrant la charge totale dans la région de canal non épuisée sous éclairage. La paire de trous

d'électrons en excès générée dans le canal module la conductivité. La tension photoélectrique développée à travers la barrière de Schottky réduit la largeur de la région d'appauvrissement. Ainsi, la conductivité du canal ainsi que la conductance du canal sont affectées à l'état éclairé. Cela entraîne une modification importante du courant de drain sous illumination. Cependant, dans GaAs, la recombinaison de surface MESFET tend à réduire cet effet dans une certaine mesure.

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 [33]:

$$Q_{cop}(V_x) = aqZL_gN_d - \frac{qZL_gN_d}{2} \left[\left(\frac{2\varepsilon}{qN_d} \right)^{1/2} \left\{ (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op})^{1/2} + (V_{bi} - V_g + V_x - V_{op}) \right\} \right] + \frac{P_{opt}}{h\nu} (1 - R_m)(1 - R_s)(1 - \exp(-\alpha a)) \times \tau_L Z q L_g - q R Z L_g \tau_L \quad (\text{II-34})$$

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

$$\rho_{cop}(V_x) = \frac{N_d}{2} \left[2a - \left(\frac{2\varepsilon}{qN_d} \right)^{1/2} \left\{ (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op})^{1/2} + (V_{bi} - V_g + V_x - V_{op}) \right\} \right] + \frac{P_{opt}}{h\nu} \tau_L \times (1 - R_m)(1 - R_s)(1 - \exp(-\alpha a)) - (R\tau_L) \quad (\text{II-35})$$

Le courant de drain sous illumination peut être obtenu en intégrant ce qui précède de la source au drain de la manière suivante:

$$I_{dop} = \frac{q\mu_n Z}{L} \int_0^{V_{ds}} \rho_{cop}(V_x) dV_x \quad (\text{II-36})$$

En substituant la valeur de $\rho_{cop}(V_x)$ à partir de (II-35) et en intégrant, on obtient

$$I_{dop} = \frac{q\mu_n Z N_d}{2L_g} \int_0^{V_{ds}} \left\{ \left[2a - \left(\frac{2\varepsilon}{qN_d} \right)^{1/2} (V_{bi} - V_g + V_x - V_{op})^{1/2} \right] dV_x + \frac{q\mu_n Z}{L_g} \int_0^{V_{ds}} \left\{ \left[\frac{P_{opt}}{h\nu} \tau_L (1 - R_m)(1 - R_s)(1 - \exp(-\alpha a)) - R\tau_L \right] \right\} \right\} \quad (\text{II-37})$$

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 [26]:

$$u_x = \left[\frac{2\varepsilon}{qN_d} (V_{bi} - V_g + V_x - V_{op}) \right]^{1/2} \quad (\text{II-38})$$

V_x : est le potentiel au point considéré, on définit la tension de pincement $V_p = V_{bi} - V_g - V_{op}$ lorsque la valeur de u_x est maximale ($u_x = a$), a est l'épaisseur de la zone active du canal.

V_p : La tension de pincement du canal représente l'écart entre la barrière de potentiel (V_{bi}) du contact Schottky et la tension de seuil (V_{th}).

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

$$V_{th} = V_{bi} - V_p - V_{op} \quad (II-39)$$

V_{bi} : est appelé la tension de la barrière Schottky ou interne supportée par la zone de déplétion.

$$I_{dop} = \frac{q\mu_n Z N_d}{2L_g} \left\{ 2aV_d - \frac{2}{3} \left[\left(\frac{2\varepsilon}{qN_d} \right)^{1/2} (V_{bi} - V_g + V_d - V_{op})^{3/2} - (V_{bi} - V_g - V_{op})^{3/2} \right] \right\} + \frac{q\mu_n Z}{L_g} \left[\frac{P_{opt}}{h\nu} \tau_L (1 - R_m)(1 - R_s)(1 - \exp(-\alpha \cdot a)) - (R\tau_L) \right] V_{ds} \quad (II-40)$$

En posant:

$$I_p = \frac{(qN_d)^2 \mu_n Z a^3}{2\varepsilon L_g} \quad \text{et} \quad V_p = \frac{q a^2 N_d}{2\varepsilon} \quad (II-41)$$

Ainsi, l'expression finale du courant I_{dsop} est :

$$I_{dop} = I_p \left\{ \frac{V_d}{V_p} - \frac{2}{3} \left[\left(\frac{V_{bi} - V_g + V_d - V_{op}}{V_p} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_{bi} - V_g - V_{op}}{V_p} \right)^{3/2} \right] \right\} + \frac{q\mu_n Z}{L_g} \left[\frac{P_{opt}}{h\nu} \tau_L (1 - R_m)(1 - R_s)(1 - \exp(-\alpha \cdot a)) - (R\tau_L) \right] V_d \quad (II-42)$$

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

- Le régime linéaire, où le courant de drain varie linéairement avec la tension de drain V_d .
- Le régime de saturation, le courant se sature à la valeur I_{dsop} . Cette région de caractéristiques est connue comme étant la région de saturation.

Dans ce qui suit, nous allons à partir de l'équation (II-42), déterminer les équations correspondantes aux deux régimes:

Régime linéaire

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

$$V_d \ll V_{bi} - V_g - V_{op} \quad (II-43)$$

Ainsi, l'équation (II-42), se réécrit:

$$I_{dop} = \frac{I_p}{V_p} \left\{ 1 - \sqrt{\frac{V_{bi} - V_g - V_{op}}{V_p}} \right\} V_d + \frac{q\mu_n Z}{L_g} \left[\frac{P_{opt}}{h\nu} \tau_L (1 - R_m)(1 - R_s)(1 - \exp(-\alpha \cdot a)) - (R\tau_L) \right] V_d \quad (\text{II-44})$$

Régime saturé

Le courant dans ce cas peut être évalué à partir de l'équation (II-42), en évaluant le courant de drain au point de pincement, soit en posant: $V_p = V_{bi} - V_g - V_{op}$

$$I_{dsat} = I_p \left\{ \frac{1}{3} - \left[\left(\frac{V_{bi} - V_g - V_{op}}{V_p} \right) - \frac{2}{3} \left(\frac{V_{bi} - V_g - V_{op}}{V_p} \right)^{2/3} \right] \right\} + \frac{q\mu_n Z}{L_g} \left[\frac{P_{opt}}{h\nu} \tau_L (1 - R_m)(1 - R_s)(1 - \exp(-\alpha \cdot a)) - (R\tau_L) \right] V_{dsat} \quad (\text{II-45})$$

La tension de drain de saturation correspondante est donnée par:

$$V_{dsat} = V_p + V_g - V_{bi} + V_{op} \quad (\text{II-46})$$

II. 4.4 Schéma équivalent d'un OPFET

Une analyse de la structure du transistor au premier ordre fait apparaître un Schéma équivalent à éléments localisés correspondant au fonctionnement dans la zone saturée. Chaque élément représente un comportement physique ou une propriété électrique du transistor à effet de champ. La topologie du modèle complet contenant les éléments du MESFET éclairé est reportée sur la figure II-2.

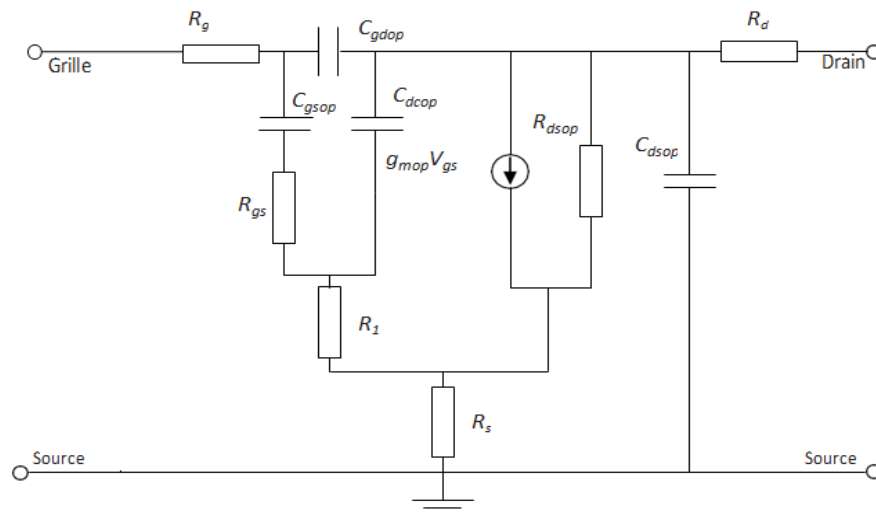


Figure II-2: Circuit équivalent du MESFET (OPFET) [33].

II. 4.5 Détermination des capacités

En supposant que le canal n soit dopé uniformément avec la concentration en donneur $N_d(m^{-3})$ et en considérant une tension directe à développer (V_{op}) à travers la grille de Schottky sous illumination, la charge totale sous la grille dans la région de charge d'espace peut être écrite ainsi [33]:

$$Q_{sop} = Q_{1op} + Q_{2op} + Q_{3op} \quad (II-47)$$

La capacité grille-source $C_{gs.op}$ à l'état éclairé peut être obtenue comme suit:

$$C_{gs.op} = \left(\frac{\partial Q_{sop}}{\partial V_s} \right) V_{gd} = constant \quad (II-48)$$

La charge d'espace totale sous la grille à l'état éclairé peut être obtenue comme suit:

$$Q_{sop} = \frac{1}{2} q N_d Z L_g a \left[\left\{ \frac{V_{bi} - V_g + V_s - V_{op}}{V_p} \right\}^{1/2} + \left\{ \frac{V_{bi} - V_g + V_d - V_{op}}{V_p} \right\}^{1/2} \right] + \frac{P_{opt}}{h\nu} (1 - R_m)(1 - R_s) \tau_L Z L_g \times$$

$$\left[1 - \exp \left\{ -\alpha \left(\frac{2\varepsilon}{q N_d} (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op}) \right)^{1/2} \right\} \right] + \frac{\pi}{4} a^2 q N_d Z \left\{ \frac{V_{bi} - V_g + V_s - V_{op}}{V_p} \right\} - q R Z L_g \tau_L +$$

$$\frac{\pi}{4} a^2 q N_d Z \left\{ \frac{V_{bi} - V_g + V_d - V_{op}}{V_p} \right\} \quad (II-49)$$

La tension de pincement est donnée par

$$V_p = \frac{q a^2 N_d}{2\varepsilon} \quad (II-50)$$

La capacité optique totale de la grille-source dans la condition éclairée a été obtenue en tant que

$$C_{gsop} = Z L_g \sqrt{\frac{q N_d \varepsilon}{8}} \left[\frac{1}{(V_{bi} - V_g + V_s - V_{op})^{1/2}} \right] + \frac{q P_{opt} (1 - R_m)(1 - R_s) \tau_L Z L_g \alpha}{2 h \nu} \exp \left\{ -\alpha \left(\frac{2\varepsilon}{q N_d} (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op}) \right)^{1/2} \right\} \times$$

$$\left[\frac{2\varepsilon}{q N_d (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op})} \right]^{1/2} + \frac{\pi \varepsilon Z}{2} \quad (II-51)$$

La capacité grille-drain C_{gdop} à l'état éclairé peut être obtenue comme suit [26]:

$$C_{gdop} = \left(\frac{\partial Q_{sop}}{\partial V_d} \right) V_g = constant \quad (II-52)$$

La capacité optique totale de la grille-drain dans la condition éclairée a été obtenue en tant que

$$C_{gdop} = ZL_g \sqrt{\frac{qN_d\epsilon}{8}} \left[\frac{1}{(V_{bi}-V_g+V_d-V_{op})^{1/2}} \right] + \frac{qP_{opt}(1-R_m)(1-R_s)}{2h\gamma} \times (\tau_L ZL_g \alpha) \times \exp \left\{ -\alpha \left(\frac{2\epsilon}{qN_d} (V_{bi} - V_g + V_d - V_{op})^{1/2} \right) \right\} \times \left[\frac{2\epsilon}{qN_d} \left(\frac{1}{(V_{bi}-V_g+V_d-V_{op})} \right) \right]^{1/2} + \frac{\pi\epsilon Z}{2} \quad (II-53)$$

La capacité drain-source du dispositif dans la condition éclairée peut être obtenue en prenant la dérivée de la charge totale du canal dans la condition éclairée par rapport à la tension de drain [33].

$$C_{dcop} = \left(\frac{\partial Q_{sop}}{\partial V_d} \right) V_g = constant \quad (II-54)$$

La capacité drain-canal dans l'état éclairé peut être obtenue comme

$$C_{dcop} = \frac{1}{4} ZL_g \left[\frac{2\epsilon q N_d}{V_{bi}+V_d-V_g-V_{op}} \right]^{1/2} \quad (II-55)$$

II. 4.6 La résistance drain-source

La résistance drain-source à une tension de grille appliquée constante en présence d'un éclairage optique peut être obtenue comme suit [33]:

$$R_{dsop} = \frac{1}{\left(\frac{dI_{ds}}{dV_{ds}} \right)_{V_{gs}=cst}} \quad (II-56)$$

$$R_{dsop} = \frac{L_g}{q\mu_n Z} \left[\frac{N_d}{2} \left\{ 2a - \left(\frac{2\epsilon}{qN_d} (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op}) \right)^{1/2} - \left(\frac{2\epsilon}{qN_d} (V_{bi} - V_g + V_d - V_{op} + V_{ds}) \right)^{1/2} + \frac{P_{opt}}{h\gamma} \tau_L (1 - R_m)(1 - R_s)(1 - \exp(-\alpha.a)) \right\} - (R\tau_L) \right]^{-1} \quad (II-57)$$

II. 4.7 Transconductance et Conductance

L'expression de I_{dop} permet de calculer les deux paramètres fondamentaux du transistor que sont la transconductance g_{mop} , et la conductance du canal appelée plus communément conductance de drain g_{dop}

La transconductance est l'expression du mécanisme de commande d'un transistor : elle représente la variation du courant dans le canal modulé par la tension de grille, à tension drain source constante [39].

L'expression de la transconductance optique est:

$$g_{mop} = \left(\frac{\partial I_{dop}}{\partial V_g} \right)_{V_d=cst} \quad (II-58)$$

La transconductance est donnée par:

$$g_{mop} = \frac{q\mu_n Z N_d}{2L_g} \left(\frac{2\varepsilon}{qN_d} \right)^{1/2} \times \left[\frac{V_{ds}}{2} (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op} - V_d)^{1/2} + (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op} - V_d)^{1/2} - (V_{bi} - V_g + V_s - V_{op})^{1/2} \right] \quad (II-59)$$

La conductance traduit la résistance du canal : c'est la variation du courant de drain en fonction de la variation de la tension à polarisation de grille constante.

Son expression est donnée par [26] :

$$g_{dop} = \left(\frac{\partial I_{dop}}{\partial V_d} \right)_{V_g=cst} \quad (II-60)$$

Donc on trouve l'expression de la conductance optique comme suit [26]:

$$g_{dop} = \frac{qZ\mu_n N_d}{2L_g} \left[2a - \left(\frac{2\varepsilon}{qN_d} \right)^{1/2} (V_{bi} - V_g + V_d - V_{op})^{1/2} \right] + \frac{qZ\mu_n \tau_L}{L_g} \times \frac{P_{opt}}{h\nu} (1 - R_m)(1 - R_s)(1 - \exp(-\alpha \cdot a)) - (R\tau_L) \quad (II-61)$$

II. 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle analytique décrivant les propriétés statiques de l'OPFET au GaAs. En prenant compte de l'effet de la lumière sur les propriétés du composant. Nous avons établi l'ensemble des relations qui décrivent les phénomènes physiques régissant le comportement du transistor OPFET GaAs. Ces relations nous permettent de reconnaître l'influence des paramètres physiques et des paramètres géométriques sur le comportement électrique du composant.

Chapitre III :

Résultats et discussion

III.1 Introduction

Ce chapitre est concerné à la présentation et la discussion des résultats réalisés en MATLAB, en application des relations mathématiques vues dans le chapitre précédent pour pouvoir étudier les caractéristiques du L'OPFET GaAs et étudier par la suite l'effet des paramètres géométriques et physiques sur son comportement électronique.

III.2 Structure simulée (paramètres géométriques et physiques)

Les paramètres à introduire peuvent être regroupés selon deux catégories «géométriques et physiques» figurés dans la **Tableau III-1**

Paramètres	Valeurs
La durée de vie des porteurs minoritaires τ_L	$10^{-8}s$
La durée de vie des porteurs minoritaires en équilibre τ_p	$10^{-8}s$
Coefficient d'absorption α	10^6s
Mobilité de l'électron μ_n	$0.85 m^2/Vs$
Mobilité des trous μ_p	$0.04 m^2/Vs$
Concentration en porteurs intrinsèque, n_i	$1.79 \times 10^{12}/m^3$
La permittivité $\epsilon_0 \epsilon_r$	$1.1 \times 10^{-12}F/cm$
Coefficient de réflexion à l'entrée, R_m	0.1
Barrière de potentiel de la jonction Schottky, V_{bi}	0.8 V
La longueur d'onde optique incidente λ	0.83 μm
Température, T	300 K
Concentration de dopage N_d	$10^{23}m^{-3}$
Largeur de grille Z	10 μm
Épaisseur du canal a	0.22 μm
Longueur de grille L_g	1 μm

Tableau III-1 : Paramètres de simulation MESFET GaAs (OPFET) [33].

III.3 Logiciel de simulation

Le logiciel de simulation est réalisé en MATLAB 9 , l'exécution des programme selon la théorie du modèle Chakrabarti établie au chapitre II , nous a permis d'avoir des courbes désignant les caractéristiques fonctionnelles de l'OPFET comme suit :

- ✓ Le courant de drain I_{dsop} et sa variation avec V_{ds} et V_{gs} sous illumination et dans des conditions sombres .
- ✓ La variation de la durée de vie des porteurs minoritaires τ_L en fonction de la densité de puissance optique P_{opt} .
- ✓ La variation de taux de génération optique G_{opt} avec la densité de puissance optique P_{opt} .
- ✓ La variation de la phototension V_{opt} développée au niveau du contact Schottky avec la densité de puissance optique P_{opt} .
- ✓ La variation de la phototension V_{opt} développée au niveau du contact Schottky avec de la durée de vie des porteurs minoritaires τ_L .
- ✓ Les caractéristiques capacités C_{gsop} , C_{dcop} et C_{gdop} et sa variation V_{gs} sous illumination et dans des conditions sombres .
- ✓ La variation de la transconductance g_{mop} et la conductance g_{dop} en fonction de la puissance optique incidente P_{opt} .
- ✓ Effet des paramètres « L_g », « N_d » et « Z » sur les caractéristiques C_{dcop} , C_{gsop} et g_{mop} .

III.4 Résultats de la simulation

III.4.1 Caractéristiques I(V_{ds})

La figure III-1 montre la variation du courant de drain I_{dsop} avec la tension appliquée de drain V_{ds} pour différentes valeurs de tension de grille V_g aux conditions d'éclairage et d'obscurité. La différence entre les courbes est accentuée lorsque la tension V_{ds} se rapproche de la tension de pincement V_p . Sa valeur de $V_p = 3.52 V$ a été obtenue par (II.41). Ce changement est dû aux deux effets photoélectriques, le photovoltaïque et le photoconducteur. Par conséquent, à mesure que l'intensité de la lumière augmente, l'action de ces effets s'intensifie et le courant de drain augmente. De plus, pour les V_{ds} supérieurs à V_p Le courant de drain entrerait dans la région de saturation, avec de très petites variations.

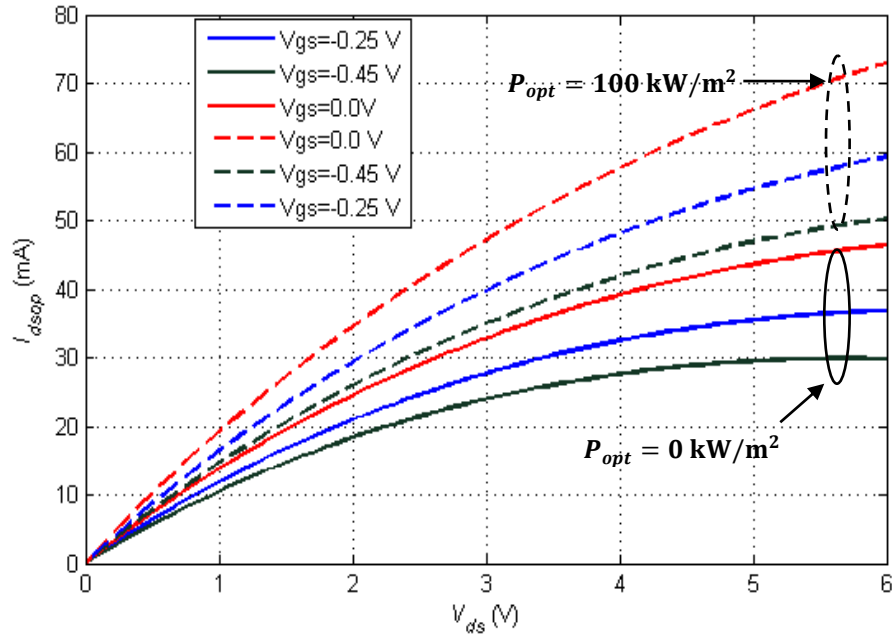


Figure III-1: La relation entre le courant I_{dsop} et la tension V_{ds} dans des conditions sombres et éclairées.

III.4.2 Caractéristiques I (V_{gs})

Figure III-2 montre le comportement du courant I_{dsop} en fonction de la tension V_{gs} , dans des conditions d'éclairage et en l'absence du faisceau optique. Le courant I_{dsop} augmente avec l'augmentation de la tension source-grille appliquée et nous observons un excès de I_{dsop} en condition d'éclairage par rapport à la condition sombre.

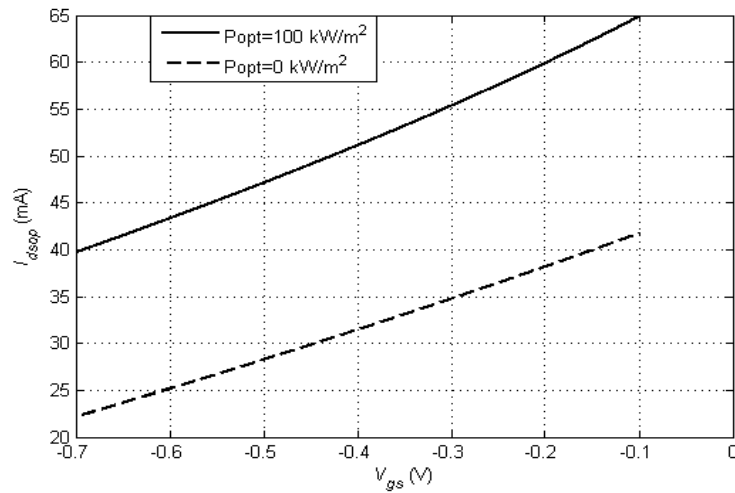


Figure III-2: la variation drain de source I_{dsop} avec le V_{gs} sous illumination et dans des conditions sombres.

III.4.3 durée de vie $f(P_{opt})$

La figure III.3 représente la variation de la durée de vie sous illumination des porteurs minoritaire avec la densité de puissance optique incidente. On voit que τ_L diminue avec l'augmentation de la densité de puissance optique incidente. Cette diminution de la durée de vie des porteurs minoritaires limite à son tour la valeur de la tension photoélectrique V_{op} . Cela signifie que V_{op} ne peut pas augmenter indéfiniment avec l'augmentation du taux de génération optique causée par une augmentation de la densité de puissance optique incidente.

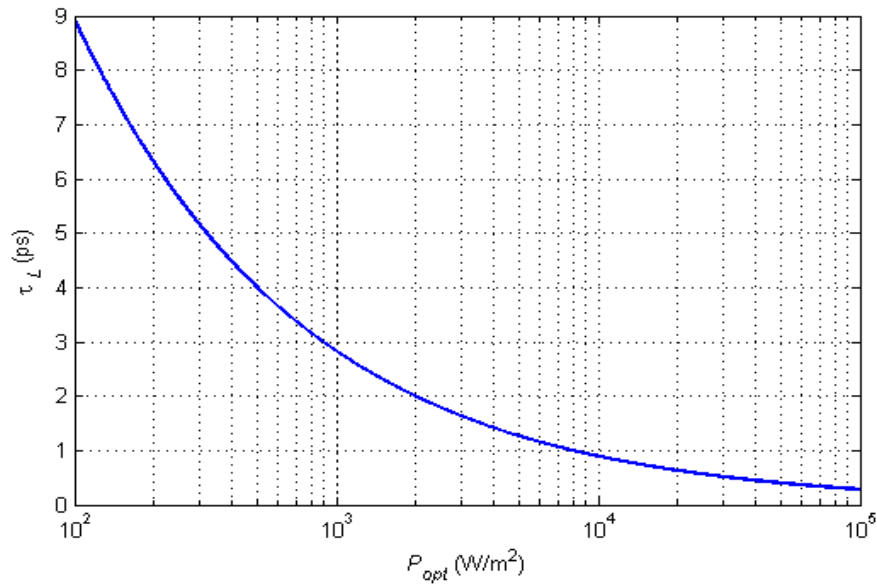


Figure III-3: La variation de la durée de vie des porteurs minoritaires τ_L en fonction de la densité de puissance optique P_{opt} .

III.4.4 Variation I_{dsop} , R_{dsop} $f(P_{opt})$

La figure III-4 on montre les variations du courant de drain I_{dsop} et la résistance drain-source R_{dsop} , en fonction de la densité de puissance optique incidente P_{opt} . Notez qu'avec l'augmentation de la valeur de P_{opt} , le courant de drain augmente tandis que la résistance drain-source diminue .

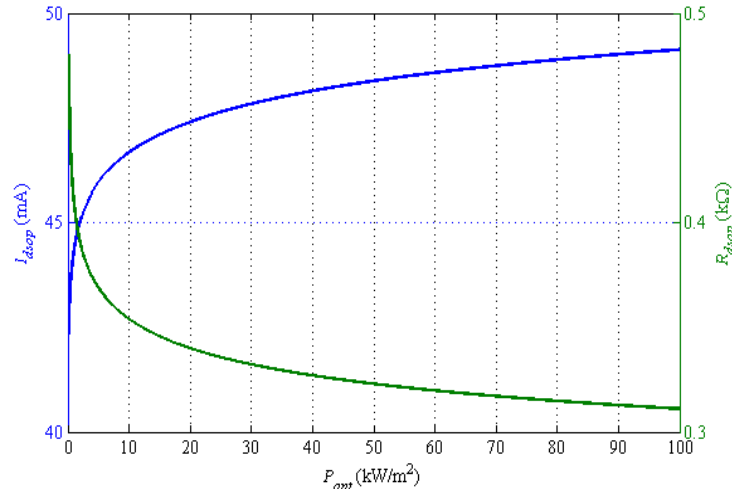


Figure III.4: Variation du courant I_{dsop} et de la résistance R_{dsop} pour des valeurs élevées de densité de puissance optique incidente P_{opt} .

III.4.5 Variation $G_{opt}f(P_{opt})$

La Figure III-5 montre l'augmentation de taux de génération optique G_{opt} avec une augmentation de la densité de puissance optique incidente, P_{opt} en raison de la réduction de la durée de vie du support en présence d'un éclairage présenté sur la figure III-3, ce qui limite l'excès de photo génération sous un éclairage intense.

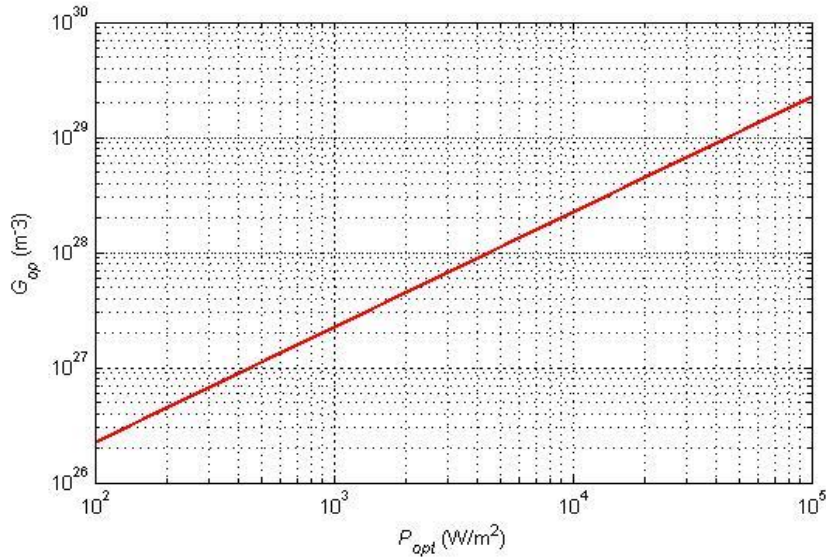


Figure III-5: La variation de taux de génération optique G_{opt} avec la densité de puissance optique P_{opt}

III.4.6 Variation $V_{opt}f(P_{opt})$

Sur la figure III-6, la photo tension développée à la jonction grille Schottky augmente avec la densité de puissance optique incidente P_{opt}

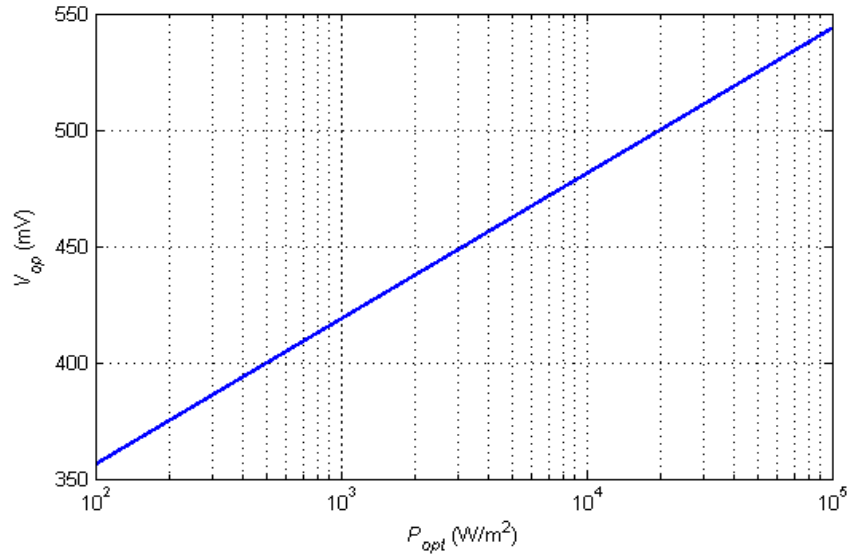


Figure III-6: La variation de la photo tension V_{opt} développée au niveau du contact Schottky avec la densité de puissance optique P_{opt}

III.4.7 Variation $V_{opt}f(\tau_L)$

La figure III-7 montre la variation de la photo tension V_{opt} développée au niveau du contact Schottky avec de la durée de vie des porteurs minoritaires τ_L . Les valeurs τ_L plus basses impliquent des puissances optiques incidentes plus élevées, avec pour conséquence une augmentation de la photo tension V_{opt} .

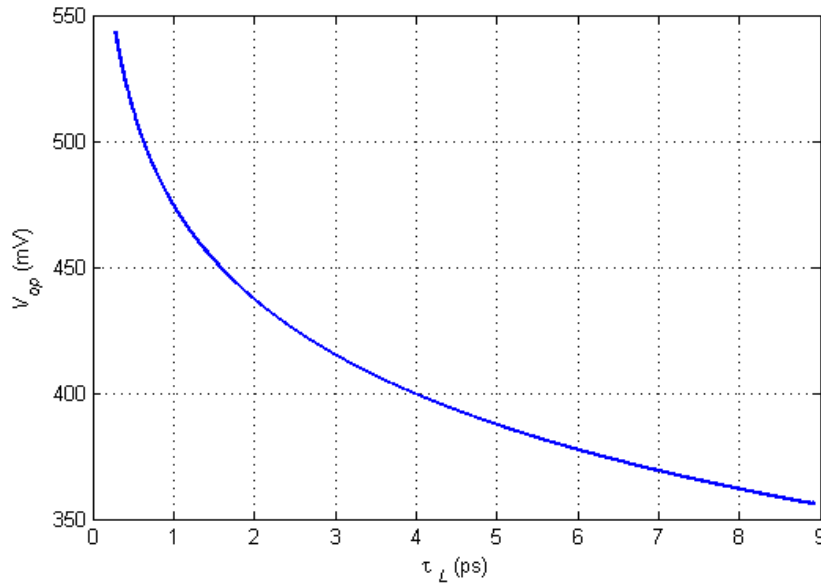


Figure III-7: La variation de la photo tension V_{opt} développée au niveau du contact Schottky avec de la durée de vie des porteurs minoritaires τ_L

III.4.8 Capacités « C_{gsop} », « C_{gdop} » et « C_{dcop} »

Les figures III-8 et III-9 représentent la variation des capacité de C_{gsop} , C_{dcop} et C_{gdop} en fonction de la polarisation grille-source « V_{gs} », à la fois en présence et en l'absence de la lumière, nous observons la croissance de ces capacité C_{gsop} , C_{dcop} et C_{gdop} avec l'augmentation de la tension inverse entre la grille et la source, En revanche, pour une certaine tension V_{gs} ($V_{gs} = -0,1V$), les capacités augmentent de manière significative en présence d'éclairage. Ceci est dû au fait que, en alimentant optiquement le transistor, la photovoltage V_{opt} développée par le contact Schottky réduit la tension inverse entre la grille et la source, ce qui augmente à son tour les capacités.

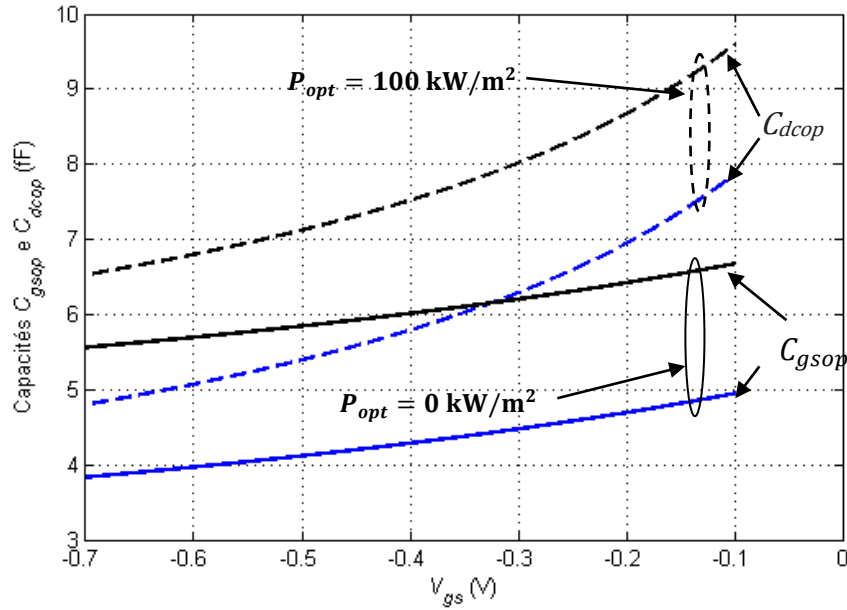


Figure III-8: Comportement des capacités C_{gsop} et C_{dcop} par la variation de tension V_{gs} en absence et en présence de lumière

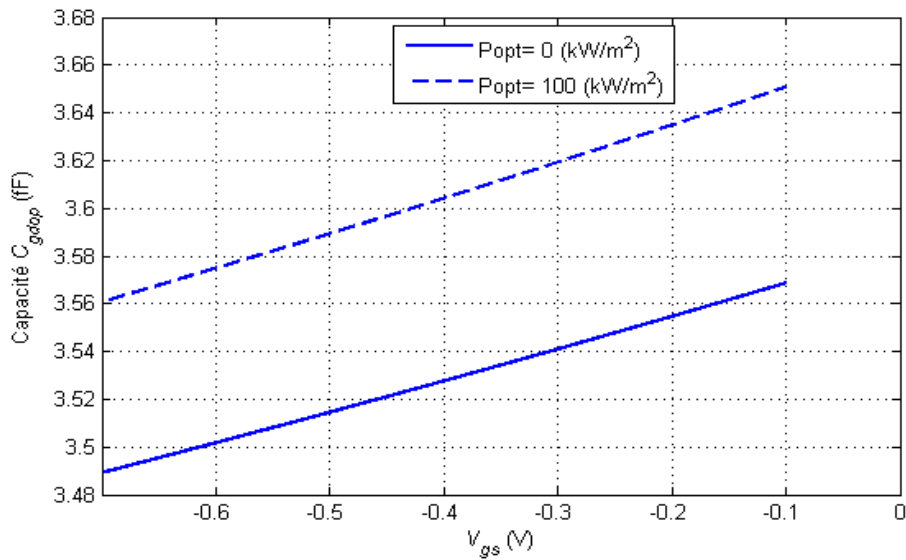


Figure III-9: Comportement de la capacité C_{gdop} par la variation de la tension V_{gs} en absence et en présence de lumière

La figure III-10 montre la capacité grille-drain C_{gsop} par rapport à la tension drain-source V_{ds} dans des conditions d'obscurité et d'éclairage. Notez que la capacité C_{gsop} décroît de manière exponentielle que la tension V_{ds} augmente et diminue avec la croissance de tension de polarisation V_g

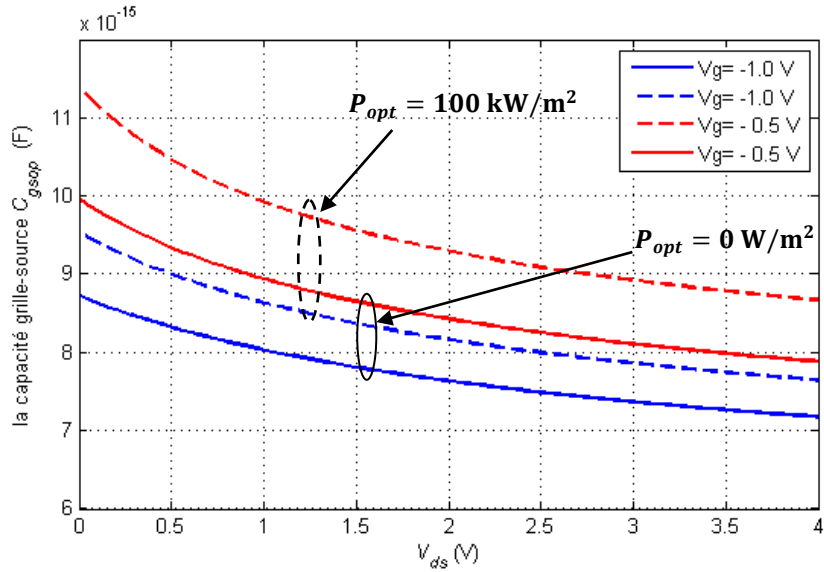


Figure III-10: Comportement de la capacité C_{gsop} par la variation de tension V_{ds} en absence et en présence de lumière

III.5 Transconductance g_{mop} et Conductance de drain g_{dop}

III.5.1 Transconductance g_{mop}

Sur la figure III-11, Nous remarquons que la transconductance croît avec la diminution de la valeur absolue de la tension de grille V_{gs} , et notez aussi que la transconductance prend sa valeur maximale quand $V_{gs} = 0$.

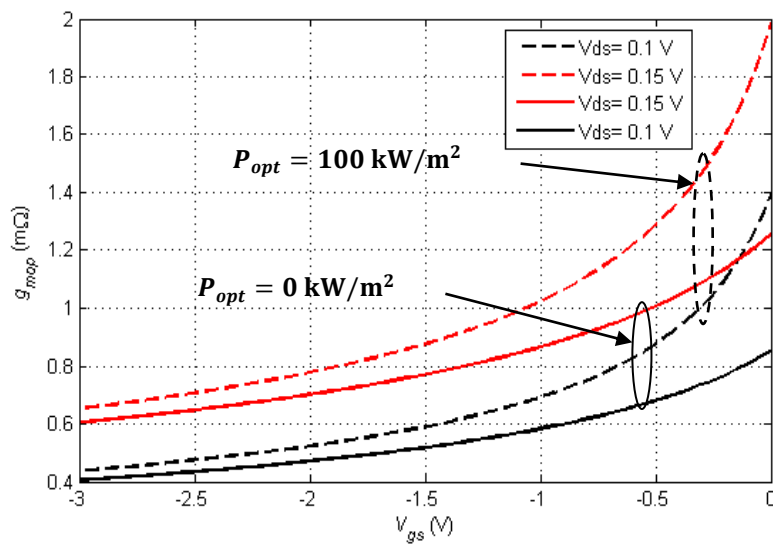


Figure III-11: Variation de la transconductance g_{mop} en fonction de la tension de grille-source

V_{gs}

La figure III-12 présente la transconductance g_{mop} en fonction de la tension de drain-source V_{ds} pour les conditions d'obscurité et d'éclairage, La transconductance augmente linéairement avec le changement de tension drain-source V_{ds}

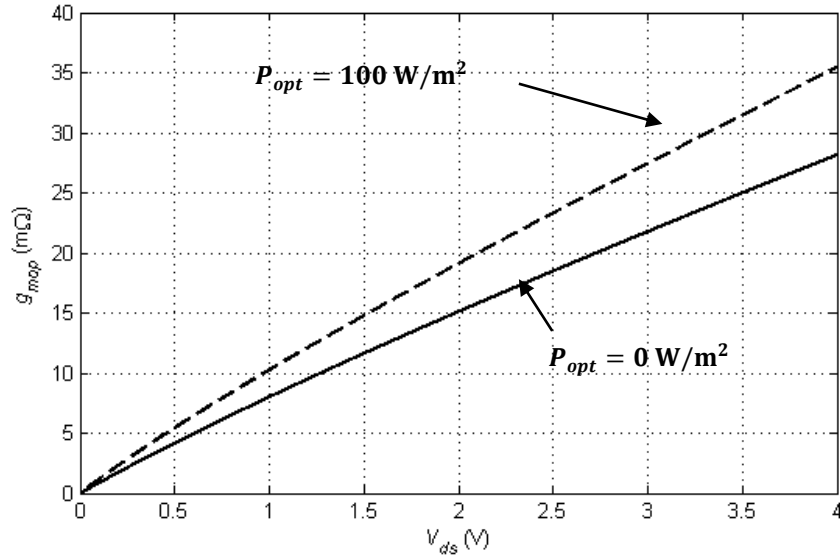


Figure III-12: Variation de la transconductance g_{mop} en fonction de la tension de drain-source V_{ds}

La Figure III-13 Nous voyons que g_{mop} augmente avec l'augmentation de la densité de puissance optique initialement et tend finalement à saturer dans les valeurs plus élevées de P_{opt} .

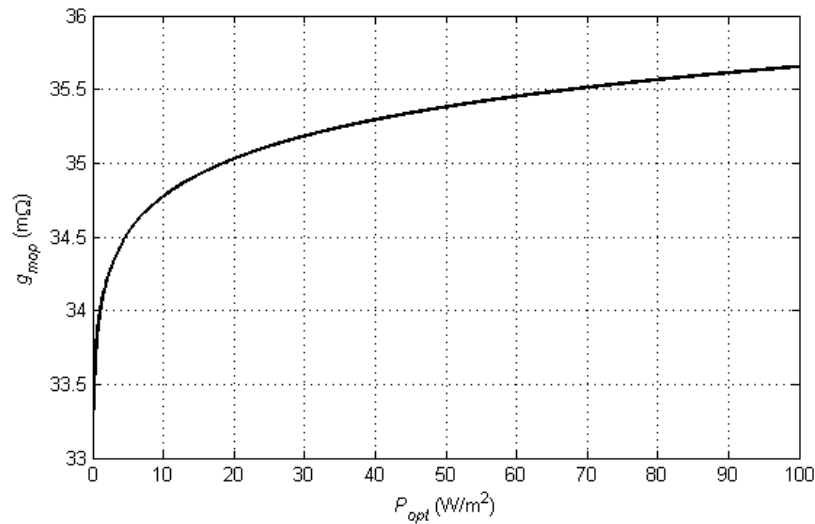


Figure III-13: Variation de la transconductance optique en fonction de la puissance optique incidente P_{opt} .

III.5.2) Conductance de drain g_{dop}

Les figures III-14 a et b illustrent l'évolution de la conductance de sortie en fonction de la densité optique des différentes polarisations V_{ds} (0.1 à 0.3 V) et de différentes polarisations V_{gs} (0 à -0.2V). Nous notons que, quelle que soit la polarisation, le comportement du canal augmente en raison des faibles valeurs de la densité optique ($P_{opt} < 30 \text{ mW} / \text{m}^2$), Puis c'est la saturation à grandes valeurs de P_{opt}

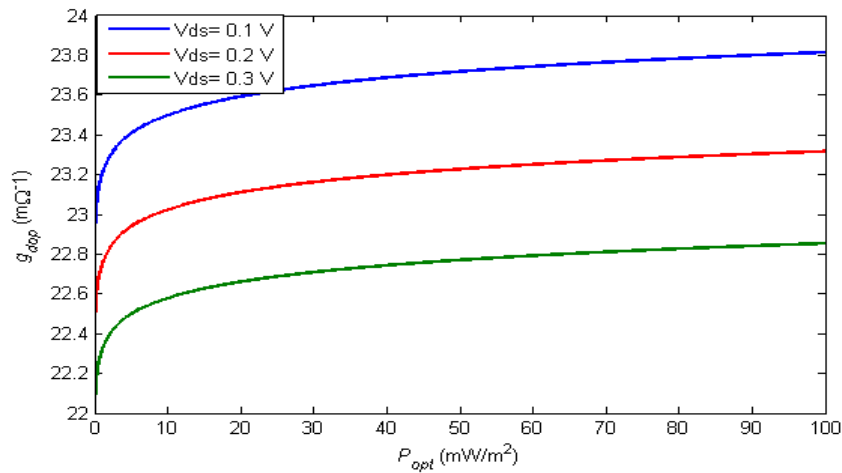


Figure III-14 a: Variation de la conductance optique en fonction de la puissance optique incidente P_{opt} pour différentes valeurs de V_{ds} .

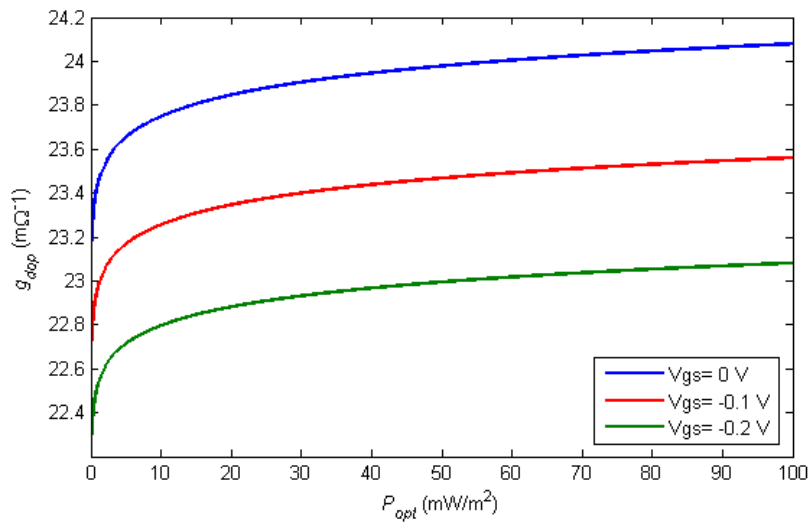


Figure III-14 b: Variation de la conductance optique en fonction de la puissance optique incidente P_{opt} pour différentes valeurs de V_{gs} .

III.6 Effet des paramètres « L_g », « Z » et « N_d » sur les caractéristiques « C_{dcop} », « C_{gsop} » et « g_{mop} »

III.6.1 les caractéristiques « C_{dcop} »

La Figure III-15 représente la variation de la capacité optique drain-canal, C_{dcop} avec longueur de grille, L_g , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage. Notez que la capacité C_{dcop} augmente avec L_g dans les deux cas (l'obscurité et l'éclairage) Cela est dû au fait que l'augmentation de L_g entraîne une augmentation de la zone de déplétion au-dessous de la grille, ce qui entraîne une augmentation de la valeur de la capacité à la tension appliquée.

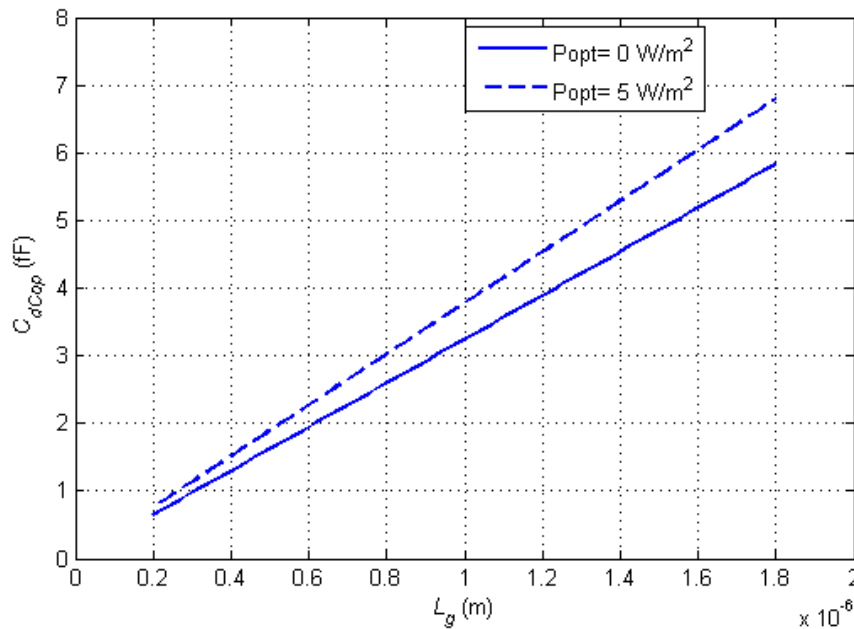


Figure III-15: Variation de la capacité optique drain-canal, C_{dcop} avec longueur de grille, L_g , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage

La figure III-16 représente la Variation de la capacité optique drain-canal, C_{dcop} avec largeur de grille Z , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage. Notez que la capacité de C_{dcop} augmente en augmentant la largeur de la grille, Z , dans les deux cas (obscurité et luminosité). Ceci peut être attribué à l'augmentation de la mobilité des électrons induite par une large couche active qui facilitent l'écoulement des porteurs.

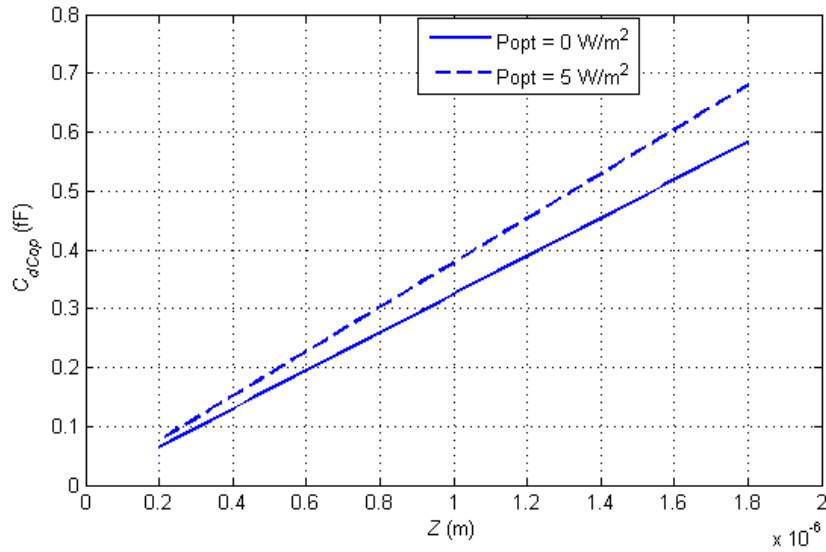


Figure III-16: Variation de la capacité optique drain-canal, C_{dcop} avec largeur de grille, Z , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage

La figure III-17 montre la variation de la capacité optique drain-canal, C_{dcop} avec la concentration de dopage, N_d , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage, Il convient de noter que l'augmentation de la concentration de dopage augmente la capacité dans des conditions d'obscurité et de lumière, Ceci est dû à l'épuisement de la zone de déplétion au-dessous de la grille diminue avec l'augmentation de la concentration de dopage, cette diminution de la largeur de la zone de déplétion entraînant une augmentation correspondante des valeurs de capacité.

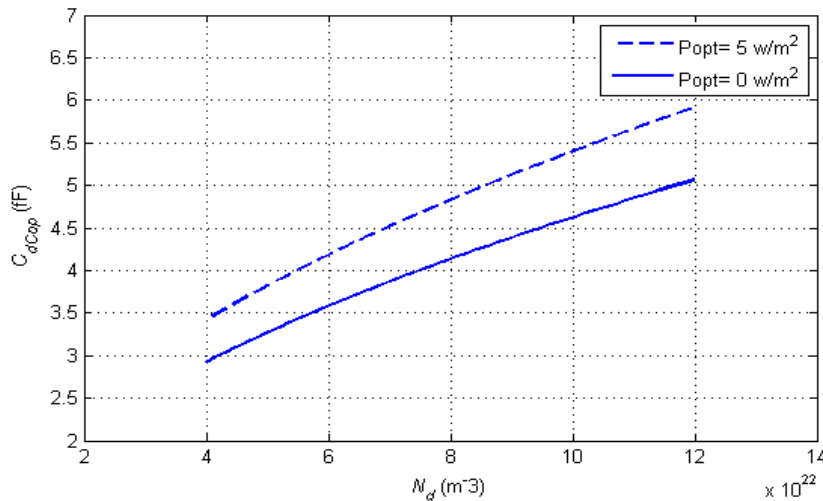


Figure III-17: Variation de la capacité optique drain-canal, C_{dcop} avec la concentration du dopage, N_d , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage

III.6.2 les caractéristiques« C_{gsop} »

La Figure III-18 représente la variation de la capacité optique drain-canal, C_{gsop} avec longueur de grille, L_g , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage. Notez que dans les deux cas, la capacité augmente avec une augmentation de L_g , Cela est dû au fait que l'augmentation de L_g entraîne une augmentation de la zone de déplétion au-dessous de la grille, ce qui entraîne une augmentation de la valeur de la capacité à la tension appliquée.

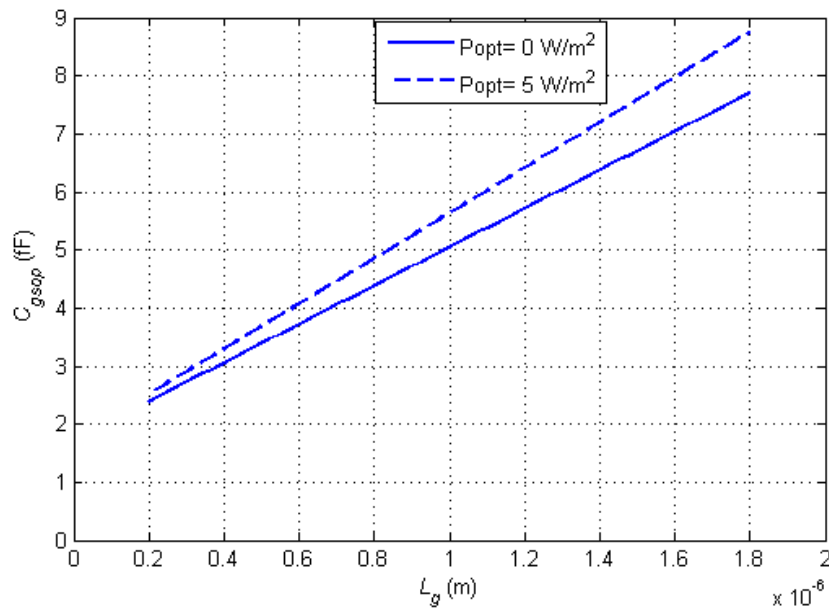


Figure III-18: Variation de la capacité optique grille-source, C_{gsop} avec longueur de grille, L_g , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage

La Figure III-19 montre la variation de la capacité optique grille-source, C_{gsop} avec la largeur de grille, Z , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage. Il est à noter que la capacité augmente avec l'augmentation de la largeur de la grille, Z , dans l'obscurité et la lumière. Ceci peut être attribué à l'augmentation de la mobilité des électrons induite par une large couche active qui facilitent l'écoulement des porteurs.

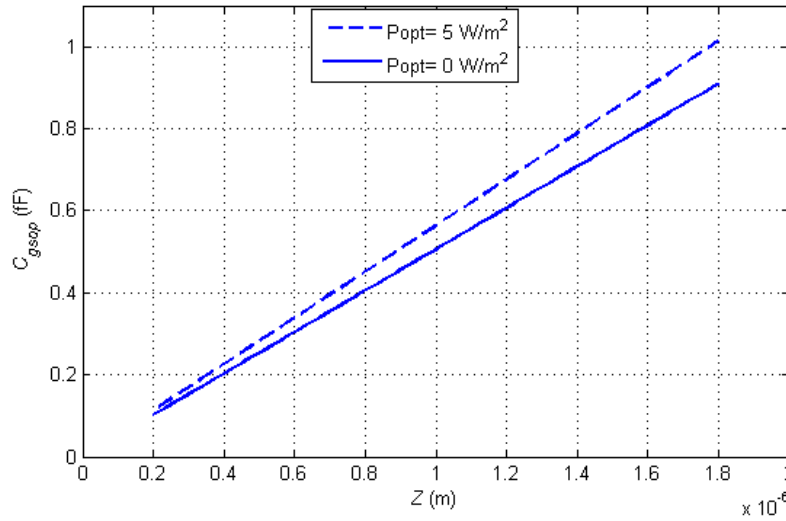


Figure III-19: Variation de la capacité optique grille-source, C_{gsep} avec largeur de grille, Z , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage

La figure III-20 montre la variation de la capacité optique grille-source, C_{gsep} avec la concentration de dopage, N_d , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage. Il est à noter que la capacité augmente avec l'augmentation de la concentration de dopage dans l'obscurité et la lumière, en raison du fait que l'épuisement de la zone de déplétion au-dessous de la grille diminue avec l'augmentation de la concentration de dopage, cette diminution de la largeur de la zone de déplétion entraînant une augmentation correspondante des valeurs de capacité.

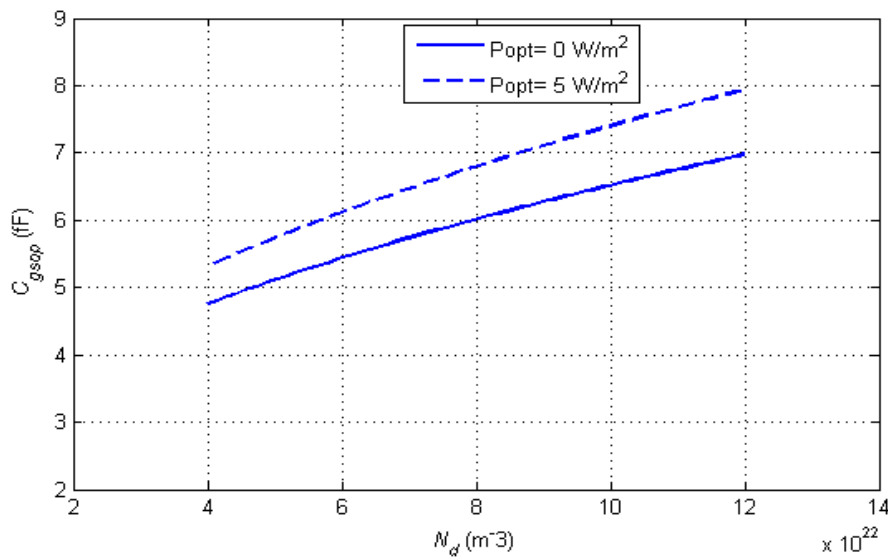


Figure III-20: Variation de la capacité optique grille-source, C_{gsep} avec la concentration de dopage, N_d , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage

III.6.3 les caractéristiques« g_{mop} »

Notez sur la figure III-21 que la diminution de la valeur de L_g conduit à une augmentation de g_{mop} dans l'obscurité et la lumière, tandis que l'augmentation de Z provoque l'augmentation de g_{mop} dans les deux cas voir figure III.22.

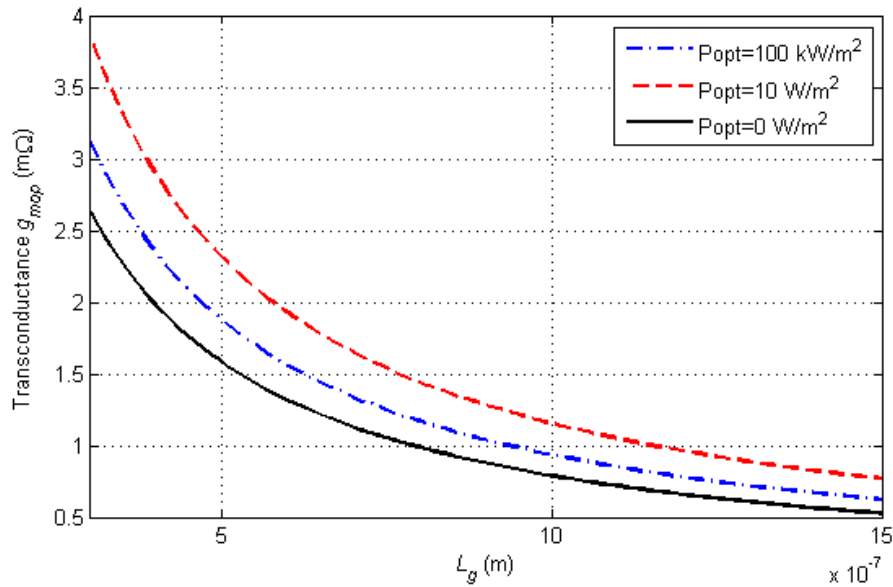


Figure III-21: la variation de la transconductance g_{mop} avec la longueur de grille, L_g , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage

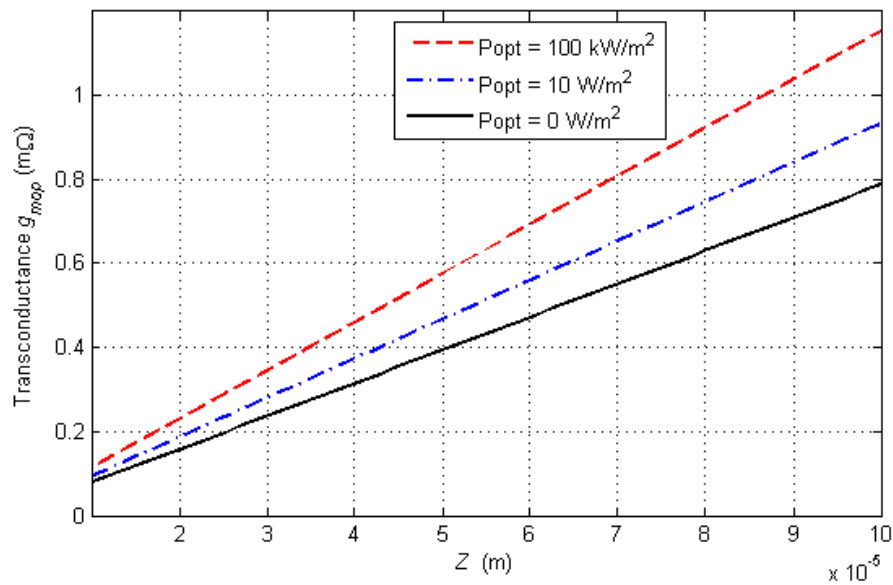


Figure III-22: la variation de la transconductance g_{mop} avec largeur de grille, Z , pour des conditions d'obscurité et d'éclairage

La figure III-23 montre la variation de g_{mop} dans des conditions d'obscurité et de luminosité avec N_d . Pour des valeurs V_{gs} et V_{ds} fixes, la valeur de g_{mop} augmente avec l'augmentation de N_d .

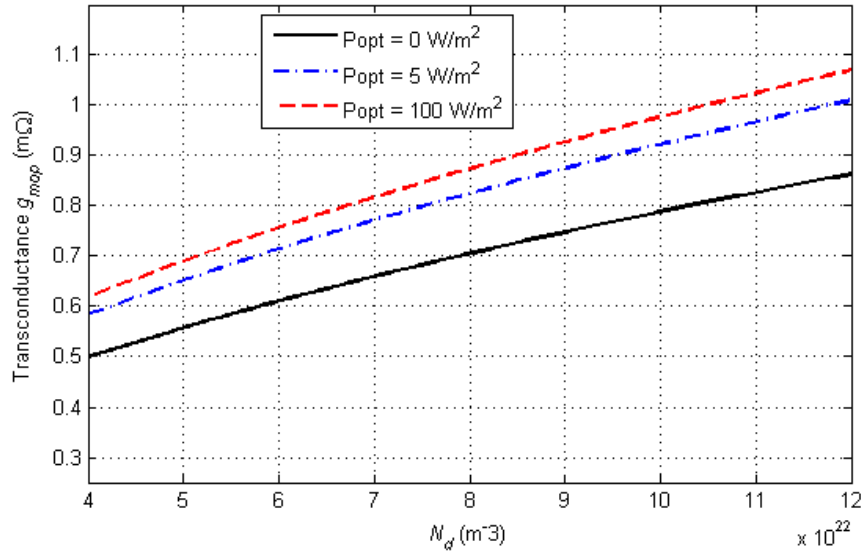


Figure III-23: Variation de la transconductance g_{mop} avec les concentrations de dopage, N_d , dans des conditions d'obscurité et d'éclairage

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a procédé à la vérification de la validité des différentes expressions obtenues au chapitre précédent. On a présenté la variation du courant de drain I_{dsop} en fonction de la tension V_{ds} et V_{gs} , durée de vie $f(P_{opt})$, les capacités intrinsèques et extrinsèques « C_{gsop} » grille-source et « C_{gdop} » grille-drain, puis « C_{dcop} » drain-canal, la transconductance « g_{mop} » et la conductance « g_{dop} », et en fin l'effet des paramètres géométriques et physiques (L_g , Z , N_d). Une comparaison est faite sur les éléments constituant le OPFET dans les deux conditions (éclairage et obscurité).

Conclusion

générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était l'étude et la simulation du transistor à effet de champ de type OPFET en GaAs. Nous avons pour cela développé et étudié un modèle de simulation pour tracer les caractéristiques de sortie d'un transistor MESFET optique en tenant compte de l'influence de certains paramètres géométriques et physiques sur son comportement.

Spécialement l'étude de l'influence de la densité d'énergie optique sur les caractéristiques d'un OPFET GaAs. Pour se faire, nous avons développé un logiciel de simulation faisant intervenir une approche basée essentiellement sur les phénomènes physiques régissant les MESFETs optiques. Cet outil permet la résolution des équations nécessaires ainsi que l'édition des résultats sous forme numérique et graphique. L'influence de plusieurs paramètres: densité optique, de la durée de vie des porteurs minoritaires, la phototension, etc. a été étudiée. Les résultats ont permis de déterminer l'évolution du courant de sortie en fonction de la tension d'entrée et la tension de polarisation à différentes densités optiques. Également, une étude détaillée de l'influence de la densité optique sur la conductance de sortie g_{mop} , et transconductance g_{mop} , en relation avec la polarisation et les propriétés de structure de l'OPFET a été menée.

Le modèle proposé permet la détermination des variations des C_{dcop} , C_{gsop} et g_{mop} en fonction de : la longueur de grille la largeur de grille et le concentration de dopage. Certains résultats, nous paraissent devoir plus particulièrement être mis en évidence: (i) l'augmentation de la longueur et la largeur de grille aussi la concentration du dopage provoque l'augmentation de la capacité C_{dcop} , la capacité C_{gsop} et (ii) la diminution la longueur de grille avec l'augmentation de la largeur de grille et l'augmentation de la concentration du dopage implique l'augmentation de la transconductance g_{mop} . Enfin, la comparaison des résultats obtenus avec la littérature a montré un bon accord.

Dans les travaux futurs, l'effet du taux de recombinaison de surface doit être pris en compte lors de l'analyse des paramètres déjà mentionnés et de l'évaluation de l'effet du bruit, facteur très important pour les sous-systèmes intégrés à plusieurs étages. L'étude théorique d'importance est également l'analyse de la grille, avec vérification des effets des paramètres techniques et électromagnétiques sur la transmission du faisceau optique au secteur des semi-conducteurs. Le modèle simple présenté ici est assez précis et peut être utilisé comme outil de base pour la simulation de circuits.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **Karar, C. L. Tan, K. Alameh, Y. T. Lee, and F. Karouta.** "Metal nano-grating optimization for higher responsivity plasmonic-based GaAs metal-semiconductor-metal photodetector." *Lightwave Technology, Journal of* 31, no. 7 (2013): 1088-1092.
- [2] **W. Shi, X. Wang, and L. Hou.** "Lower bound of electrical field for maintaining a GaAs photoconductive semiconductor switch in high-gain operating mode." *IEEE Transactions on Electron Devices*, 60, no. 4 (2013): 1361-1364.
- [3] **G. Letal, K. Prosyk, R. Millett, D. Macquistan, S. Paquet, O. Thibault-Maheu, J. F. Gagné and all.** "Low Loss InP C-Band IQ Modulator with 40 GHz Bandwidth and 1.5 V V_{π} ." In *Optical Fiber Communication Conference*, pp. Th4E-3. Optical Society of America, 2015.
- [4] **Moussaoiu Nadia** "Effet de la lumière sur les caractéristiques électriques des dispositifs à semi conducteurs " diplôme de Master Univ Biskra 2013
- [5] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Semi-conducteur>.
- [6] **H. Mathieu**, physique des semi-conducteur et des composants électroniques, 3ème édition Masson (1996).
- [7] **D.K. Ferry** « Gallium Arsenide Technology », Volume II, Edi Howard, W. Sams and Company, Indiana, 1990.
- [8] **Nouiri** " Influence des traitements calorifiques sur les substrats de GaAs " Thèse magister, Univ Constantine (1993).
- [9] **D. Ma, Y. Chai, V. Wang, E. Li, and W. Shi.** "Electronic structure, magnetic and optical properties of Cr-doped GaAs using hybrid density functional." *Computational Materials Science* 113 (2016): 75-79.
- [10] **P. A. Craig, A. R. J. Marshall, Z-B. Tian, and S. Krishna.** "Reprint of —Mid-infrared InAsSb based nBn photodetectors with AlGaAsSb barrier layers—grown on GaAs, using an interfacial misfit array, and on native GaSb." *Infrared Physics & Technology* 70 (2015): 107-110.
- [11] **A. Benahmed, A. Aissat, A. Benkouider, and J. P. Vilcot.** "Modeling and simulation of InAs/GaAs Quantum dots for solar cell applications." *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* (2016).

- [12] **SAIDI WASSILA** "MODELISATION BIDIMENTIONNELLE DU MESFET GaAs" Thèse de Doctorat, Univ Constantine (2014)
- [13] **W. SHOCKLEY** "A unipolar field effect transistor ". Proc. Of the IRE, vol.40, pp.1365-1376, 1952.
- [14] **SOUAD BELHOUR** "Simulation du transistor à effet de champ a grille Schottky à l'arséniure de gallium MESFET GaAs " Mémoire de magister, Université de Constantine,2007
- [15] **NICOLAS DUBUC** "Modélisation Electrothermique de transistors MESFET SiC et optimisation d'une architecture Doherty pour l'amplification de puissance à haut rendement" Thèse doctorat d'état, Université de Limoges, 2003 84
- [16] **Olivier VANBESIEN** "Modèles linéaires et non linéaires des composants actifs pour la CAO. Hyperfréquences", Cours DESS, septembre 2003.
- [17] **C. A. Mead** "Schottky barrier gate field effect transistor". Proceedings of the IEEE 54 (2): 307–308. (Feb. 1966).
- [18] **W.Aliouat** " Etude des propriétés des transistors à effet de champs à grille Schottky à l'Arséniure de Gallium" Thèse de Magistère, université de Constantine, 2006
- [19] **HILDE MULLER et JAN NICOLAS MYKLEBUST** "Les composants actifs hyperfréquences" www.etud.insa-toulouse.fr/~sroy/cce/Transistors_HF.doc
- [20] **C. J. Gammel, and J. M. Ballantyne.** "The OPFET: a new high speed optical detector." In *Electron Devices Meeting, 1978 International*, vol. 24, pp. 120-123. IEEE, 1978.
- [21] **R. N. Simons, and K. B. Bhasin.** "Analysis of optically controlled microwave/millimeter-wave device structures." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 34, no. 12 (1986): 1349-1355.
- [22] **GUERRAOUI Amal** “Etude des caractéristiques des MESFETs en relation avec l’effet photonique” Thèse de Doctorat, Univ Annaba (2016)
- [23] **A. A. A. De Salles,** "Optical control of GaAs MESFET's. "*IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 31, no. 10 (1983): 812-820.
- [24] **S. Tripathi, and S. Jit.** "Analytical modelling of the current (I)-voltage (V) characteristics of sub-micron gate-length ion-implanted GaAs MESFETs under dark and illuminated conditions." *Circuits, Devices & Systems, IET* 7, no. 1 (2013):42-60.

- [25] **A. Madjar, P. R. Herczfeld, and A. Paoella.** "Analytical model for optically generated currents in GaAs MESFETs." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 40, no. 8 (1992): 1681-1691.
- [26] **HAMMA ISSAM** "Contribution à l'étude des propriétés bidimensionnelles des Composants à effet de champs MESFET GaAs "Thèse de Doctorat, Univ Oum-El-Bouaghi (2014)
- [27] **N. S. Roy, and B. B. Pal.** "Frequency-dependent OPFET characteristics with improved absorption under back illumination." *Journal of lightwave technology* 18, no. 4 (2000): 604.
- [28] **N. V. L. N. Murty, and S. Jit.** "Static IV Characteristics of Optically Controlled GaAs MESFET's with Emphasis on Substrate-induced Effects." *Journal Of Semiconductor Technology And Science* 6, no. 3 (2006): 211.
- [29] **P. Chakrabarti, A. Gupta, and N. A. Khan.** "An analytical model of GaAs OPFET." *Solid-State Electronics* 39, no. 10 (1996): 1481-1490.
- [30] **K.KANDIAH** "Radom telegraph singnal currents and low frequency noise in junction field effect transistor". *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 41, n° 11, Nov.1994, p2006-2015.
- [31] **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
- [32] **Christian Karl** "MESFET MODELS BASED ON GaAs". Edition 1996
- [33] **P. Chakrabarti, S. K. Shrestha, A. Srivastava, and D. Saxena** " The switching characteristics of an optically controlled Metal Semiconductor Field Effect Transistor ",*IEEE Trans.MicrowaveTheory Tech.*,v.42,n.3,p.365375,Mar.,1994.
- [34] **RAMO, S., WHINNERY, J. R.; VAN DUZER, T.** *Fields and waves in communication electronics*. 3rd. ed. New York: John Wiley, 1994.
- [35] **LIAO, S. Y.** *Microwave devices and circuits*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1980. p. 44-62.

- [36] **SZE, S. M., NG, K. K.** *Physics of Semiconductor Devices*. 3rd. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [37] **R. B. Darling and J. P. Uyemura**, "Optical gain and large-signal characteristics of illuminated GaAs MESFET's," IEEE J. Quantum Electron, vol. QE-23. pp. 1160-1171. 1987 .
- [38] **S. Mishra, V. K Singh, and B. B. Pal**, 'Effect of radiation and surface recombination on the characteristics of an ion-implanted GaAs MESFET,' IEEE Trans. Electron Dev., vol. ED-37, pp. 2-10,1990 .
- [39] **GUIZA Douadi** "Analyse des transistors à effet de champ MESFET GaAs", diplôme de Magister Univ Constantine (2009)