



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة باجي مختار - عنابة

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA

FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE
LABORATOIRE DES SEMI-CONDUCTEURS

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Option: semi-conducteurs et applications

Étude Des Caractéristiques des MESFETs en Relation avec L'Effet Photonique

Présentée par: M^{elle} Amal GUERRAOUI

Soutenue le 16/05/2016

DIRECTRICE DE THÈSE:	HADJOUR Zahia	Prof. Université d'Annaba
PRÉSIDENT:	DOGHMANE Abdellaziz	Prof. Université d'Annaba
EXAMINATEURS:	BENSLIM Noureddine	Prof. Université d'Annaba
	MEDDOUR Athmane	Prof. Université de Guelma
	KHIARI Saidi	Prof. Université d'El -Tarf

Année universitaire : 2015/2016

Dédicaces

En ce jour mémorable, j'exprime ma gratitude

Envers :

*Deux êtres chers qui ont été un cœur veillant, me transmettant affection,
courage, assistance et morale*

Papa, Maman mille merci et que Dieu vous garde.

Ma grand-mère,

Je n'oublierai pas mes deux sœurs Ilhem et Hassina et mes frères

Nadhir, Abdenour, Fares, Abderahim & Abdellah

A Toute ma famille

oooooooooooooooooooooooooooooooooooo

A ma Chère Directrice de Thèse: Prof. Zahia HADJOUR

oooooooooooooooooooooooooooooooooooo

A mes amies

oooooooooooooooooooooooooooooooooooo

J'espère que vous serez tous fiers de moi

Remerciements

*Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont été effectués au laboratoire des Semi-Conducteurs, Département de Physique, Université Badji Mokhtar-Annaba, dirigé par Madame la Professeur, **Zahia HADJOUB** que je remercie vivement de m'avoir accueillie au sein de ce Laboratoire et donnée l'opportunité de développer mes compétences. Je la remercie également pour son soutien scientifique et logistique et surtout pour m'avoir fournie un cadre de travail de qualité et convivial.*

*Je tiens à remercier vivement **Monsieur DOGHMANE Abdellaziz**, Professeur à l'université Badji Mokhtar - Annaba, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de soutenance. C'est avec un grand plaisir que je lui destine mon profond respect et ma considération les plus sincères pour les enseignements dont il m'a fait bénéficier autrefois. Sa disponibilité, ses conseils, ses encouragements et ses qualités humaines m'ont été d'une grande importance. Je garde toujours de très bons souvenirs des discussions scientifiques que nous avons eu. Que vous soyez assuré de mon entière reconnaissance et que vos conseils dont j'ai eu la chance d'en bénéficier resteront gravés dans ma mémoire.*

*Je tiens à exprimer ma plus profonde reconnaissance à ma Directrice de thèse, **Madame Zahia HADJOUB**, Professeur au Département de Physique, Université Badji Mokhtar – Annaba pour l'encadrement exemplaire de mes travaux de recherche. Vos qualités, tant professionnelles qu'humaines m'ont permis d'avancer d'une manière très efficace et très agréable. Votre rigueur scientifique, vos explications didactiques et votre soutien m'ont été très précieux. Vos conseils inspirés de votre expérience dans le domaine des composants unipolaires m'ont beaucoup aidée pour orienter rapidement mes investigations et comprendre plusieurs phénomènes en relation avec les travaux menés sur les OPFETs. J'ai beaucoup apprécié vos compétences scientifiques, votre implication, et surtout votre méthodologie et votre savoir-faire. Je vous remercie également*

pour votre disponibilité et pour votre présence active que vous avez manifestée pendant toutes les années de préparation de cette thèse. Aussi, je vous remercie d'avoir cru en mes capacités et je garderai dans mon cœur votre générosité, votre compréhension et votre dynamisme.

Mes sincères remerciements et ma gratitude vont aussi aux autres membres du jury pour l'attention particulière accordée à mon travail en acceptant d'examiner cette thèse.

- *Monsieur **BENSLIM Nourddine**, Professeur à l'Université Badji Mokhtar - Annaba, Adjoint du Chef de Département de Physique.*
- *Monsieur **MEDDOUR Athmane** Professeur à l'université 8 mai 1945 - Guelma, Doyen de la Faculté des mathématiques et de l'informatique et des sciences de la matière.*
- *Monsieur **KHIARI Saïd**, Professeur à l'université Chadli Bendjedid - El-Taref,*

Votre expertise contribuera sans aucun doute à l'amélioration de la qualité de cette thèse. Vous trouvez ici mon profond respect et ma meilleure considération.

Je remercie très chaleureusement tous les membres des différentes équipes du laboratoire des Semi-conducteurs (LSC, UBMA) pour la sympathie et l'aide qu'ils m'ont témoignées durant ces années de dur labeur. Que mes collègues doctorants trouvent ici mon grand souhait de succès et de très bel avenir.

*Je remercie également tous les membres du Département de Physique en particulier le Chef de Département, **Prof. CHIBANI Allaoua**, ainsi que tous les membres du CSD et je cite particulièrement Monsieur le Président, **Prof. M. GHERS** et **Prof. B. CHOUIAL** pour leur compréhension et pour les facilités administratives.*

Je voudrais également remercier très sincèrement toute ma famille pour leurs encouragements, leur soutien et leur gentillesse tout au long de ces années passées loin d'eux. Aussi, Je les remercie pour les efforts déployés en se déplaçant pour assister à ma soutenance.

Enfin, tout en espérant n'avoir oublié personne, je ne pourrai finir ces quelques lignes, sans remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse.

دراسة مميزات ترانزستور التأثير المجالي

تحت تأثير شدة الضوء

من طرفه

أمال قراوى

ملخص

يعتبر ترانزستور التأثير المجالي ذو بوابة شوتكي، MESFET، مركبة أساسية في العديد من الدارات التي تعمل على ترددات الموجات الدقيقة مثل الاتصالات اللاسلكية. لهذه المركبة الواقعة تحت تأثير الضوء والمعروفة باسم OPFET، أهمية كبيرة بسبب مجالات استعملاتها مثل أجهزة كاشف الضوئي والتذبذبات و أيضا كمركبة كهروضوئية، الخ. ولهذا، انصب اهتمامنا في هذا العمل بدراسة تأثير شدة الضوء على مميزات OPFET GaAs. من أجل ذلك، فقد طورنا برنامج محاكاة باستعمال مقارنة تعتمد أساسا على ظواهر فيزيائية في MESFET. يؤدي هذا البرنامج إلى حل مجموعة من المعادلات الضرورية ورسم المنحنيات. وهكذا قمنا بدراسة تأثير عدة وسائط: كثافة الشدة الضوئية، تطعيم القناة و سمك المنطقة الفعالة، الخ على جهد القطع. أدت دراسة تعيين تغيرات تيار الخروج بدلالة جهد الدخول عند قيم مختلفة للشدة الضوئية إلى تعيين جهد القطع الظاهري الناتج عن التأثير الضوئي. وهكذا تم الوصول إلى علاقة هامة جدا شاملة لتعيين هذا الجهد لـ OPFET. إضافة إلى كل هذا، قمنا بدراسة دقيقة و شاملة حول تأثير الشدة الضوئية على مواصلة الخروج للقناة، G_D ، في حالة الاستقطاب و باعتبار الخصائص البنوية لـ OPFET. يمكن للنموذج المقترح من تعيين G_D بدلالة: طول البوابة، عرض منطقة الاستنزاف، تطعيم المنطقة الفعالة، سمك القناة وكثافة الفخاخ. تم الحصول على العديد من النتائج نذكر منها: (أ) يؤدي النقصان في طول البوابة إلى زيادة في مواصلة القناة، (ب) يؤدي النقصان في عرض القناة والكثافة السطحية للفخاخ إلى زيادة في مواصلة القناة و تؤدي الزيادة في عرض القناة، طول القناة والتطعيم إلى زيادة في مواصلة القناة. تجدر الإشارة إلى التوافق الجيد بين النتائج المتحصل عليها والمنشورة عالميا.

الكلمات المفتاحية

GaAs MESFET، التأثير الضوئي، وصلة الخروج، الجهد الضوئي، التيار الضوئي، جهد القطع.

Étude des caractéristiques des MESFETs en relation avec l'effet photonique.

Par

Amal Guerraoui

Résumé

Le transistor à effet de champs à barrière Schottky, MESFET, est un dispositif de base dans plusieurs circuits fonctionnant en hyperfréquence comme les télécommunications mobiles. Ce composant éclairé, appelé également OPFET, manifeste une grande importance, en raison de ses capacités d'utilisation comme photo-détecteurs, oscillateurs, mixeur optoélectroniques, etc. C'est ainsi que nous nous sommes intéressés, dans ce travail, à 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. Cet outil permet la résolution des équations nécessaires aux investigations ainsi que l'édition des résultats sous forme numérique et graphique. L'influence de plusieurs paramètres: densité optique, dopage du canal conducteur, épaisseur de la zone active, etc. sur la tension de blocage a été étudiée. Les résultats ont permis de déterminer l'évolution du courant de sortie en fonction de la tension d'entrée à différentes densités optiques permettant ainsi la détermination de la tension de blocage apparente introduite par l'effet optique. Une relation universelle, très importante dans la prédiction de la tension apparente de blocage d'un OPFET, a été établie. Également, une étude détaillée de l'influence de la densité optique sur la conductance de sortie, G_D , en relation avec la polarisation et les propriétés de structure de l'OPFET a été menée. Le modèle proposé permet la détermination des variations de G_D en fonction de : la longueur de grille, la largeur de la zone de déplétion, le dopage de la zone active, l'épaisseur du canal et la densité des pièges. Certains résultats, nous paraissent devoir plus particulièrement être mis en évidence: (i) la réduction de la largeur de la zone de charges d'espace conduit à l'augmentation de la conductance de sortie, (ii) la diminution de la longueur de grille et la densité surfacique des pièges augmentent la conductance de sortie et (iii) l'augmentation de la largeur du canal, de la largeur de grille et du dopage augmentent G_D . Enfin, la comparaison des résultats obtenus avec la littérature a montré un bon accord.

Mots clés: MESFET GaAs, OPFET GaAs, effet optique, conductance de sortie,

Photo-voltage, photo-courant, tension de blocage.

Study of characteristics of MESFETs in relation to the optical effect

By
Guerraoui Amal

Abstract

Metal semiconductor field effect transistor, MESFET, is a basic device in several circuits operated at high frequencies such as mobile telecommunication circuits. When illuminated, this device called OPFET (Optically controlled FET), is of great importance due to multiple uses as photo-detectors, oscillators, optoelectronic mixers, etc. Thus, our interest is focused in this work on the investigation of the influence of optical power density on the characteristics of a GaAs OPFET. To do so, we developed a simulation program making use of an approach based essentially on physical phenomena in MESFETs. This software leads to the calculation of the derivative and the solution of a system of equations as well as displaying the results in the form of curves. We investigate the influence of several parameters: optical density, conducting channel doping, active zone thickness, etc. on the pinch off voltage. The results led to the determination of the variation of output current as a function of input voltage at different optical densities allowing, thus, the determination of apparent pinch off polarization induced by optical effects. Hence, a very important universal relation was established to predict the pinch off voltage of an OPFET. Moreover, a detailed study was carried out on the effects of optical density on conducting channel conductance, G_D , in connection with polarization as well as structural OPFET properties. The proposed model permits the determination of G_D as a function of: gate length, depletion zone width, active zone doping, channel thickness and trapping density. Several interesting results were obtained, among which we recall: (i) the reduction of the width of the space charge zone leads to an increase of channel conductance, (ii) the diminution of gate length and trapping surface density increases the output conductance and (iii) the increase of channel width, channel length and doping levels lead to an increase of output conductance. A good agreement was obtained between these results and those reported in literature.

Keywords: OPFET GaAs, MESFET GaAs, Optical effect, Output Conductance, Photo-voltage, Photo Courant, Pinch-off voltage, Photo-switching

Liste des symboles

Symbole	Signification
a	Épaisseur du canal
A^*	Constante effective de Richardson de l'émission thermoionique
C_D	Capacité de drain
C_G	Capacité de grille
E_F	Niveaux de fermi
E_g	Énergie du gap
E_T	Niveaux des pièges
G_D	Conductance de sortie
G_{op}	Taux de photo génération
H	Épaisseur effective du canal
h	Constante de Planck
I_{DS}	Courant de drain-source
J_s	Densité de courant
K	Constante de Boltzmann
K_n	Coefficients de capture des électrons
K_p	Coefficients de capture des trous
L_G	Longueur de grille
N_D	Concentration de dopage
N_T	Densité surfacique des pièges
n_s	Concentration des électrons en surface
n_t	Concentration des électrons en surface lorsque $E_T = E_F$
P_{op}	Densité optique
p_s	Concentration des trous en surface

p_t	Concentration des trous en surface lorsque $E_T = E_F$
q	Charge de l'électron
R	Taux de recombinaison en surface
R_m	Coefficients de réflexion du métal de grille
R_s	Coefficients de réflexion du semi-conducteur
T	Température en Kelvin
V_{bi}	Barrière de potentiel de la jonction Schottky
V_{DS}	Tension drain-source
V_{GS}	Tension Grille-source
V_{GSoff}	Tension de blocage
V_{GSoffA}	Tension de blocage apparente
V_{op}	Tension optique
V_p	Tension de pincement
V_{Th}	Tension de seuil,
w	Épaisseur de la zone de déplétion
Z	Largeur de grille
ε	Permittivité
ε_0	Permittivité dans le vide
ε_r	Permittivité du GaAs
μ_p	Mobilité des trous
μ_n	Mobilité d'électrons;
α	Coefficient d'absorption optique
λ	Longueur d'onde optique incidente
τ_L	Durée de vie des porteurs minoritaires
ϕ_{Bn}	Hauteur de la barrière Schottky
η	Facteur d'idéalité de la jonction Schottky
ν	Fréquence du rayon optique
ρ_{cop}	Concentration des porteurs, par unité de surface, dans le canal sous éclaircissement

Listes Des Figures

Chapitre I

Figures	Titre	N° de page
Figure I.1:	Schéma de base d'un MESFET	6
Figure I.2:	Différents types des OPFETs	7
Figure I.3:	Illumination par couplage d'un guide d'onde	10
Figure I.4:	Illumination directe par un Laser	11
Figure I.5:	Illumination directe par un LED	11
Figure I.6:	Illumination par la méthode Gaussienne	12
Figure I.7:	Éclairage de la grille	13
Figure I.8:	Éclairage à travers les zones inter-électrodes	14
Figure I.9:	Éclairage à travers les zones inter-électrode et la grille	15
Figure I.10:	Éclairage entre les contacts drain-grille	16
Figure I.11:	Éclairage à travers le substrat	17
Figure I.12:	MESFET sous effet Photonique : (a) processus de génération des porteurs et (b) distribution spatiale des porteurs générés	19
Figure I.13:	courant de drain en fonction de la tension de grille dans les conditions sombre et éclairée	20
Figure I.14:	Résistances en fonction de la tension de grille dans les conditions sombre (——) et éclairée (-----)	21
Figure I.15:	Évolution de la capacité de drain en fonction de la tension de grille dans les conditions sombre et éclairée	22
Figure I.16:	Évolution de la capacité grille-source en fonction de la tension de grille dans les conditions sombre et éclairée	23

oo

Liste Des Tableaux

Tableaux	Titre	N° de page
Tableau I.1:	Caractéristiques du GaAs	18
Tableau II.1:	Paramètres de calcul	42
Tableau III.1 :	Paramètres physiques et géométriques du MESFET	62
Tableau III.2 :	Validation du modèle, comparaison des résultats	69
Tableau III.3 :	Équations de variation des $\Delta G_D/\Delta Z$ pour différentes P_{op} et V_{DS}	74
Tableau III.4 :	Équations de variation des $\Delta G_D/\Delta Z$ pour différentes P_{op} et V_{GS}	76

oooooooooooooooooooooooooooo

Table Des Matières

INTRODUCTION GÉNÉRAL..... 1

Chapitre I: Les OPFETs: Théorie, Structures & Applications

I.1 INTRODUCTION 5

I.2 STRUCTURE..... 6

I.3 CONSÉQUENCE DE L'ÉCLAIRAGE DE MESFET 8

 I.3.1 Effet photovoltaïque..... 8

 a) Effet photovoltaïque externe 8

 b) Effet photovoltaïque interne 8

 I.3.2 Effet photoconducteur 9

 I.3.3 Effet Photo-tension 9

I.4 DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉCLAIRAGE 10

 I.4.1 Sources d'excitation 10

 I.4.2 Approches d'illumination..... 12

 a) Éclairage de la grille 12

 b) Éclairage des zones inter-électrodes 13

 c) Éclairage de la grille et des zones inter-électrodes 14

 d) Éclairage entre contact grille – Drain 15

 e) Éclairage à travers le substrat..... 16

I.5 OPFET GaAs..... 17

 I.5.1 Propriété optique du GaAs 17

 I.5.2 Phénomènes de génération – recombinaison dans un OPFET GaAs..... 18

 I.5.3 Effet photonique sur les caractéristiques d'un MESFET 20

 a) Caractéristiques I(V) 20

 b) Résistances 21

 c) Capacités 22

I.6 APPLICATIONS DES OPFET _s	23
I.7 CONCLUSION	26

Chapitre II: Investigation Et Quantification De La Tension De Blocage D'un OPFET

II.1 INTRODUCTION.....	29
II.2 PHÉNOMÈNE DE PINCEMENT	30
II.2.1 Mise en évidence	30
II.2.2 Méthodes de détermination.....	31
II.3 PRÉSENTATION DU MODÈLE DE P. CHAKRABARTI.....	33
II.3.1 Hypothèses et paramètres fondamentaux	33
II.3.2 Photo-voltage	36
a) Effet de la recombinaisons en surface sur le photo-voltage.....	37
b) Influence de la durée de vie des porteurs minoritaires sur le photo-voltage.....	37
II.3.3 Courant de drain sous éclairage	39
II.4 EFFET DE LA DENSITÉ OPTIQUE SUR LA TENSION DE BLOCAGE	40
II.4.1 Procédure et étapes de calcul	41
II.4.2 Simulations et allure des variations	42
II.4.3 Discussions et interprétations des résultats.....	45
II.5 EFFET DU DOPAGE DE LA COUCHE ACTIVE SUR LA TENSION DE BLOCAGE.....	49
II.6 EFFET DE L'ÉPAISSEUR DU CANAL SUR LA TENSION DE BLOCAGE.....	50
II.7 QUANTIFICATION DE LA TENSION DE BLOCAGE.....	51
II.8 CONCLUSION	55

Chapitre III: Étude de la conductance statique d'un OPFET

III.1 INTRODUCTION	58
III.2 FORMALISME MATHÉMATIQUE DE LA CONDUCTANCE DE SORTIE DU CANAL	59

III.2.1 Méthodologie et calculs.....	60
III.2.2 Caractéristiques du composant et conditions de simulation.....	61
III.3 EFFET DE LA POLARISATION ET DE LA DENSITÉ OPTIQUE SUR G_D.....	62
III.3.1 Effet de la tension grille-source	65
III.3.2 Effet de la tension drain-source	66
III.3.3 Analyse des résultats	66
III.3.4 Validation des résultats.....	67
III.4 EFFET DE LA STRUCTURE SUR G_D À DIFFÉRENTES DENSITÉS OPTIQUES	69
III.4.1 Effet de la largeur de grille	71
a) Mise en évidence	71
b) Quantification	72
III.4.2 Effet de l'épaisseur de la couche active	76
III.4.3 Effet de la longueur de grille	77
III.4.4 Analyse des résultats	78
III.5 EFFET DES PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES DU CANAL SUR G_D	79
III.5.1 Influence du dopage de la zone active	79
III.5.2 Influence de la densité surfacique des piégées	81
III.6 CONCLUSIONS	82
CONCLUSION GÉNÉRALE	84
RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE	87

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les travaux récents montrent l'importance du rendement optique des semi-conducteurs à large gap dans les nouvelles technologies. Ces semi-conducteurs sont souvent des composés type III-V. Ainsi, au vu de ses propriétés, l'arséniure de gallium reste le plus utilisé dans la fabrication des dispositifs photoniques tels que les cellules solaires, les photo-détecteurs, les lasers et les modulateurs électro-absorptif [1-2]. De plus, les technologies modernes ont orienté la recherche vers l'étude de l'effet photonique dans plusieurs composants tels que les MESFETs, MISFETs, MOSFETs, MSM-MESFETs, PCSS (photoconductrice semi-conducteur Switch) [3]. Aussi, les photo-détecteurs sont comptés parmi les dispositifs optoélectroniques les plus courants.

Durant ces dernières décennies, le transistor à effet de champs à barrière Schottky à base d'arséniure de gallium, MESFET GaAs, à commande optique (OPFET GaAs) a enregistré une attention considérable dans la conception de divers circuits monolithiques à commande optique particulièrement pour les circuits intégrés micro-onde (MMIC's) adoptés en grand signal [2 - 5] tels que les amplificateurs de puissance, les oscillateurs [6] et les circuits intégrés optoélectroniques (OEIC's), en télécommunications mobiles [7].

Cependant, aussi bien les caractéristiques micro-ondes qu'optiques du MESFET dépendent fortement des conductances de sortie du dispositif et de la tension de blocage. Ainsi, un modèle théorique précis pour la photo-dépendance de la conductance de sortie du MESFET GaAs peut résoudre certains problèmes des MMIC's et des OEIC's. Dans ce cadre, nous avons entrepris l'étude et l'analyse du phénomène d'éclairement dans les MESFETs GaAs, afin de contribuer à la compréhension des phénomènes physiques qui régissent ce phénomène. Notons que plusieurs travaux expérimentaux et modèles théoriques ont été rapportés dans la littérature afin d'expliquer la photo-dépendance de la conductance de sortie du MESFET GaAs [8 & 9]. Parmi ces modèles proposés, nous avons opté pour celui de Chakrabati et al [10] afin de développer les investigations du présent travail.

Le premier chapitre donne les généralités de l'effet photonique dans les MESFETs GaAs. Nous commençons par introduire l'effet photonique dans les MESFETs éclairés, connus sous le nom d'OPFETs. Ensuite, nous présentons les sources et les techniques d'éclairage ainsi que les mécanismes de génération - recombinaison des porteurs photo-générés. Finalement nous présentons l'influence de la densité optique sur quelques paramètres caractéristiques d'un OPFET tels que les caractéristiques $I(V)$, la résistance et la capacité.

Dans le deuxième chapitre, après la présentation du modèle de Chakrabati et al [10], nous développons un logiciel de simulation afin de pouvoir étudier l'influence de la puissance optique sur la tension de blocage d'un OPFET. Cette étude tient compte de l'épaisseur du canal conducteur ainsi que de la densité de dopage. Notre objectif est de comprendre les phénomènes responsables des variations de la tension de blocage.

Dans le dernier chapitre, nous nous intéressons à l'étude en régime statique de la conductance du canal d'un OPFET en relation avec la polarisation et les caractéristiques géométriques et structurelles. Nous proposons un modèle afin de déterminer l'évolution de G_D en fonction de : la longueur de grille, la largeur de la zone de déplétion, le dopage de la zone active, l'épaisseur du canal et la densité des pièges.

Sur la base des résultats obtenus, nous discutons l'influence de la polarisation, des paramètres géométriques et structurels du MESFET GaAs en tenant compte de l'effet d'éclairement. Nous appliquons les conclusions des analyses à la définition de ce qui pourraient être l'éclairement optimale permettant d'augmenter la conductance du canal et d'améliorer le rendement optique. Enfin, une préoccupation majeure serait de quantifier l'influence de la densité optique sur la tension de blocage du canal.

Chapitre I

Les OPFETs: Théorie, Structures et Applications

I. 1 INTRODUCTION

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].

Par ailleurs, il est confirmé expérimentalement que le rayon incident sur la grille transparente ou semi-transparente d'un MESFET est utilisé pour contrôler les caractéristiques hyperfréquences de l'OPFET comme la fréquence de résonance et le temps de transit [4 - 5]. De même, l'effet photonique peut être utilisé, de la même manière que la tension de polarisation de grille, pour contrôler les caractéristiques $I(V)$, la tension de seuil et les paramètres intrinsèques d'un OPFET [6]. Plusieurs modèles théoriques [7 - 12] ont été rapportés dans la littérature afin d'expliquer la photo-dépendance du MESFET GaAs. Nous nous sommes intéressés à ces modèles en mettant en exergue la façon d'éclairage ou le domaine d'application.

Nous commençons ce chapitre par un rappel de la structure et des propriétés du MESFET. Nous présentons ensuite l'effet photonique et les avantages de l'éclairage dans les MESFETs. Également, les différentes méthodes d'éclairage sont présentées. Nous nous sommes intéressés aussi bien aux sources d'illumination qu'aux régions éclairées : à travers la grille ou les zones inter-électrodes ou le substrat. Aussi, nous décrivons les propriétés optiques de l'arséniure de gallium ainsi que la structure, les caractéristiques et le principe de fonctionnement des OPFETs GaAs. Enfin, nous terminons ce premier chapitre par la présentation des modèles d'investigations et des applications des OPFETs.

I. 2 STRUCTURES

Le transistor à effet de champs à grille Schottky appelé habituellement MESFET "Metal Semiconductor Field Effect Transistor" est un composant unipolaire dont les applications ne cessent de s'élargir à des domaines actuellement en pleine expansion telle que l'optoélectronique. Le MESFET GaAs comporte un substrat semi-isolant d'AsGa, une zone active de type n, deux contacts ohmiques (source et drain) et une grille métallique déposée entre la source et le drain dans des conditions créant une barrière Schottky. Un schéma typique du MESFET est représenté par la figure I.1.

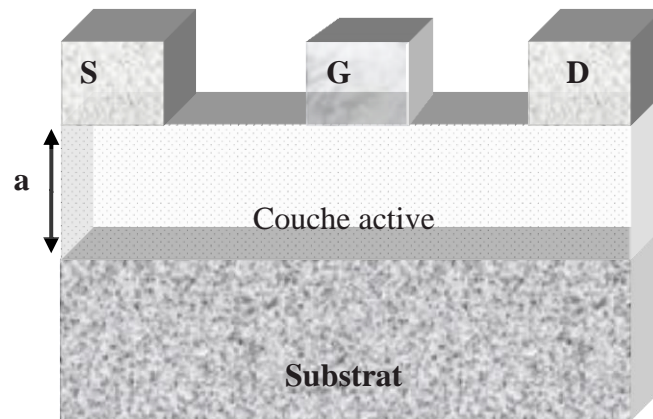


Figure I. 1: Schéma de base d'un MESFET.

Le MESFET GaAs tire ses excellentes performances de trois propriétés essentielles :

- * L'existence d'un substrat semi-isolant contre lequel vient se pincer le canal
- * La possibilité d'utiliser une électrode de contrôle de type Schottky,
- * La mobilité élevée des électrons du GaAs.

Ce composant éclairé par une source lumineuse, acquies de nouvelles caractéristiques qui dépendent fortement aussi bien de la méthode d'éclairage que des régions éclairées. Notons qu'il est nécessaire que le métal de grille soit transparent ou semi-transparent pour faciliter la transmission du faisceau incident [13]. Si non, il est important de déposer des couches antireflets sur le métal de grille afin de minimiser la réflexion des rayons [14]. Il paraît que l'équipe de C. Baak [15] est la première à avoir étudié l'effet photonique dans les MESFETs. Ces chercheurs ont montré expérimentalement que le MESFET GaAs

utilisé en optoélectronique présente de meilleures caractéristiques que les photodiodes avalanche.

Par ailleurs, Gammel et al [16] ont montré qu'il existe deux mécanismes qui commandent le comportement de l'OPFET; il s'agit de : l'effet photovoltaïque et l'effet photoconducteurs. Les résultats de leurs investigations ont permis de conclure :

- (i) un temps de transit des porteurs très court,
- (ii) de faibles résistances de contacts permettant ainsi d'améliorer la conductance,
- (iii) la présence de l'effet photoconducteur induisant de meilleures performances de l'OPFET, particulièrement dans les photo-détecteurs à hautes fréquences.

De même, ils ont donné l'appellation OPFET, " Optical Field Effect Transistor", au MESFET éclairé. Cette nomination est devenue couramment utilisée dans la littérature. Depuis, plusieurs travaux expérimentaux et théoriques ont été développés pour optimiser les performances des OPFETs. Différents modèles ont été proposés. Chacun présente un avantage pour être destiné à une application spécifique; la figure I.2 regroupe différents types d'OPFET.

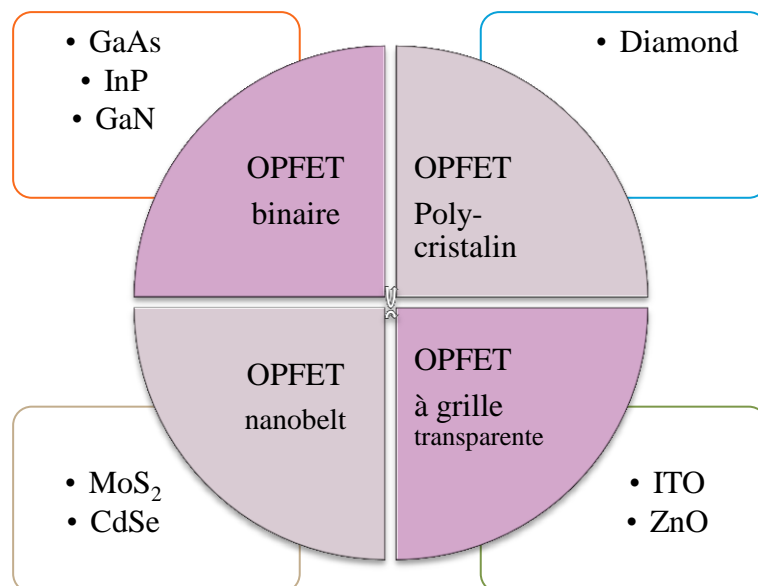


Figure I. 2 : Différents types des OPFETs.

I. 3 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 [16].
- Conduction dans les régions inter-contacts: entre Source-Grille et Drain-Grille: effet de photoconductivité [16].
- Apparition d'une photo-tension [17].
- Variation de la largeur de la zone de déplétion [16].

I. 3. 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. Il existe deux types d'effet photovoltaïque : photovoltaïque interne et externe.

a) Effet photovoltaïque externe

L'effet photovoltaïque externe est relié au photo-courant généré dans la jonction de grille entre le métal et le semi-conducteur [18]. Ce courant traverse l'impédance de charge de grille et par conséquent module la tension de grille instantanée.

b) Effet photovoltaïque interne

Lié à la génération de porteurs aux interfaces canal-substrat ou au niveau de la jonction substrat canal; il provoque une modulation du courant de drain causée par une modulation

de la hauteur du canal effectif. Ainsi, la tension de jonction se trouve modifiée conduisant à un développement d'une photo-tension à travers la jonction canal/substrat [19 - 20].

I. 3. 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 [16]. 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 [16]. 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 [21].

I. 3. 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 [22]. 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 [20], 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 [21]. Ce résultat a été prouvé expérimentalement par A. A. D. Salles [21] 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 [22].

I. 4 DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉCLAIRAGE

I. 4. 1 Sources d'excitation

Il est évident que le choix de la longueur d'onde dépend de la nature du métal de grille. À titre d'exemple, pour un OPFET GaAs l'éclairage se fait avec une lumière de longueur d'onde, $\lambda = 0,83 \mu\text{m}$. Ainsi, plusieurs source d'excitation sont utilisées dans le cas des OPFET : UV, IR et les Lasers. Cependant, dans la plupart des travaux expérimentaux la diode laser, LD, ou la diode électroluminescente, LED (Light-Emitting Diode) restent les plus fréquentes. Il existe plusieurs variantes de techniques d'éclairage ; les plus importantes sont représentées par les figures de I. 3 à I.6:

- (i) Éclairage direct par LD ou LED.
- (ii) Éclairage par un moyen de transmission tel qu'une fibre optique.
- (iii) Éclairage par pulsation.
- (iv) Éclairage par la méthode Gaussienne.

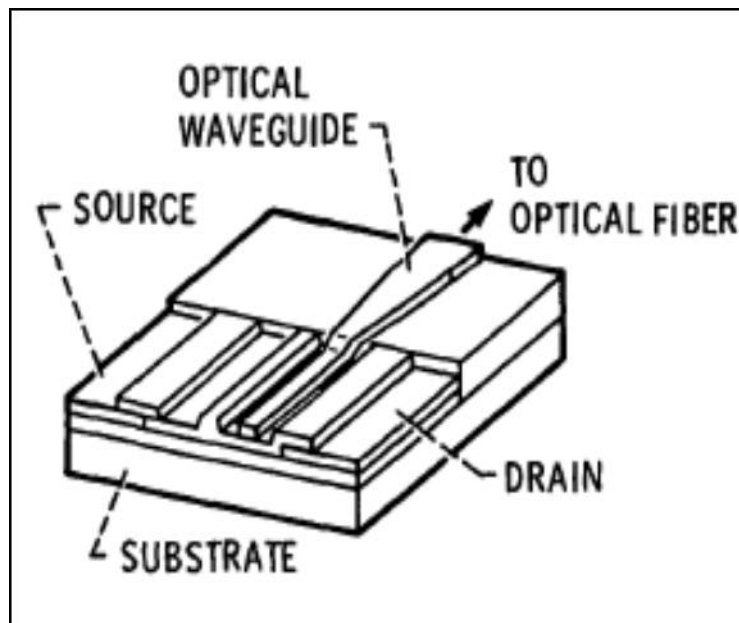


Figure I. 3 : Illumination par couplage d'un guide d'onde [17].

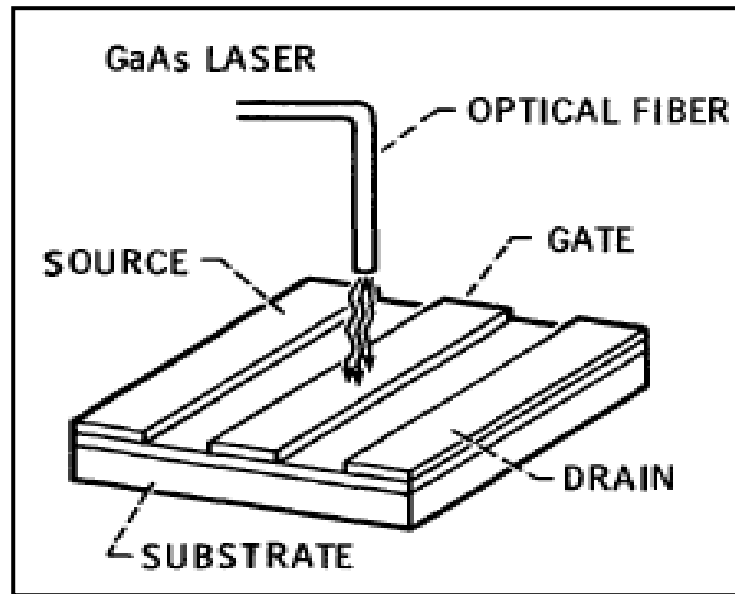


Figure I. 4 : Illumination directe par un Laser [17].

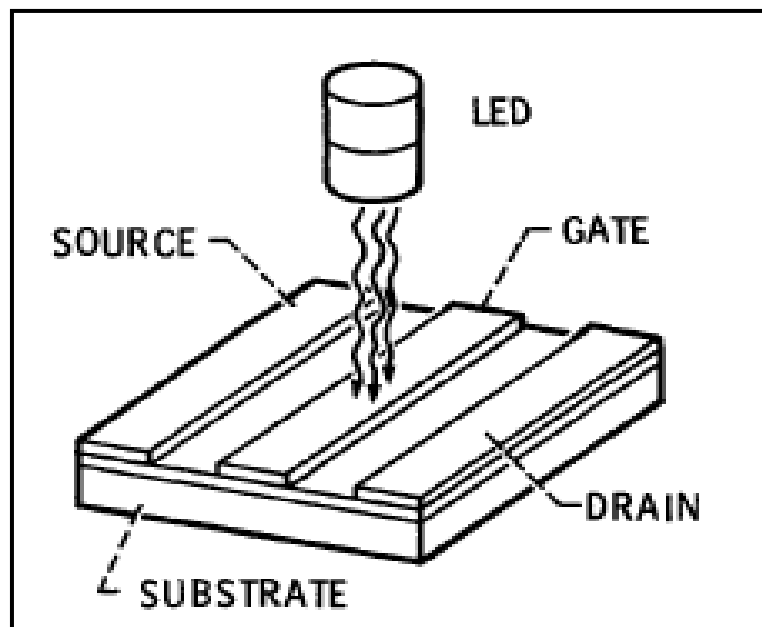


Figure I. 5 : Illumination directe par un LED [17].

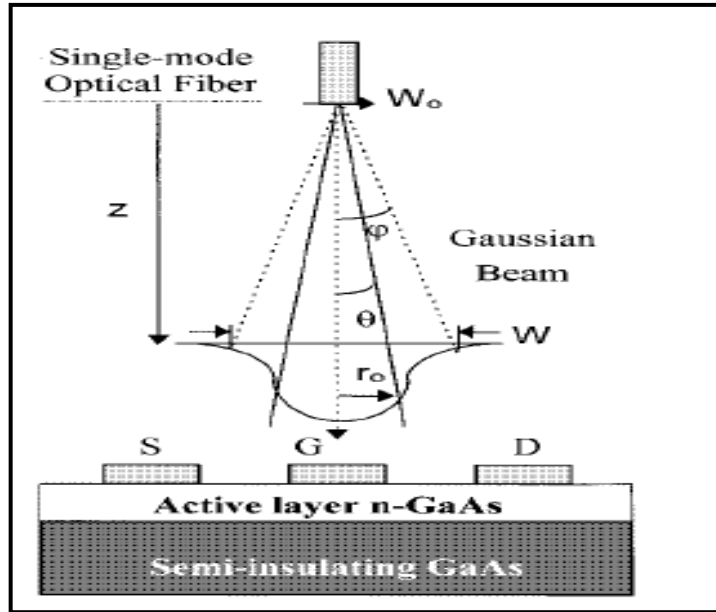


Figure I. 6 : Illumination par la méthode Gaussienne [23].

I. 4. 2 Approches d'illumination

Une des considérations des plus importantes trouvée dans les modèles des OPFETs est la façon d'éclairage. L'OPFET est éclairé à travers différentes régions de sa structure, le paragraphe suivant résume l'essentiel.

a) Éclairage de la grille

Comme son nom l'indique, l'éclairage est focalisé sur la grille du MESFET (figure I.7). Plusieurs modèles: en statique, en dynamique, théoriques et/ou expérimentaux utilisent ce type d'éclairage [1, 3, 7, 22, 24 - 28]. Il est important que le métal de grille soit transparent ou semi-transparent [11]. Si non, la transmission des photons dépend fortement de l'épaisseur et de la nature du métal de grille. Ainsi, il faut absolument que l'épaisseur du métal soit suffisamment mince. Dans le cas où le métal serait de l'**Or**, une épaisseur de l'ordre de 100 Å est nécessaire pour assurer une bonne transmission jusqu'à 90 à 95% [13].

À titre d'exemple, dans le modèle de N. V. L. N. Murty, et all [11] qui s'intéresse aux caractéristiques $I(V)$ d'un OPFET GaAs, aussi bien en régime linéaire qu'en celui de saturation, le métal du contact Schottky est considéré comme transparent ou semi-transparent, le canal actif est de type n-GaAs et le substrat est semi-isolent. Ils utilisent une lumière monochromatique avec une énergie supérieure à l'énergie de gap de GaAs.

N. V. L. N. Murty, et all [11] pensent que lorsque la grille est éclairée, les photons absorbés passent dans la région active et dans le substrat. L'absorption de photons conduit à la génération de paires électrons-trous dans : (i) la région de déplétion sous la grille, (ii) la région neutre du canal actif et (iii) dans la région du substrat du dispositif. En conséquence les trous générés dans les régions de: déplétion sont dirigés respectivement vers le métal et le semi-isolant par le fort champ électrique qui apparait dans la région de déplétion.

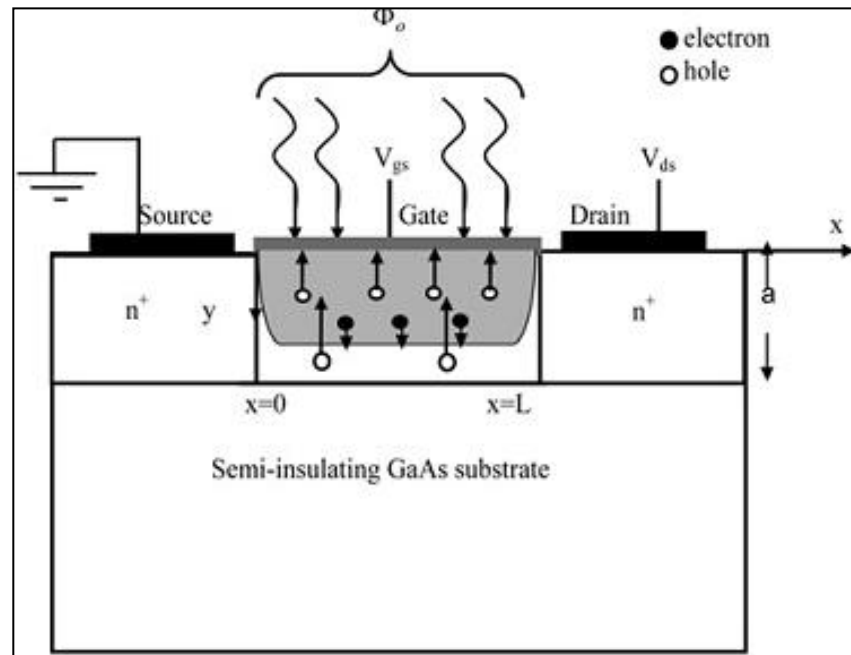


Figure I. 7 : Éclairage de la grille [22].

Il en résulte deux photo-courants: l'un qui circule de la couche active au métal de la grille et l'autre de la couche active vers le substrat. Ceci conduit à l'apparition de deux photo-tensions: (i) à travers la jonction de Schottky [21] et (ii) à travers la jonction substrat canal [29].

b) Éclairage des zones inter-électrodes

La direction de l'illumination passe entre les zones inter-électrodes, drain-grille et grille-source de l'OPFET comme illustré par la figure I.8. Plusieurs travaux utilisent cette façon d'illumination [20, 21, 30 - 32].

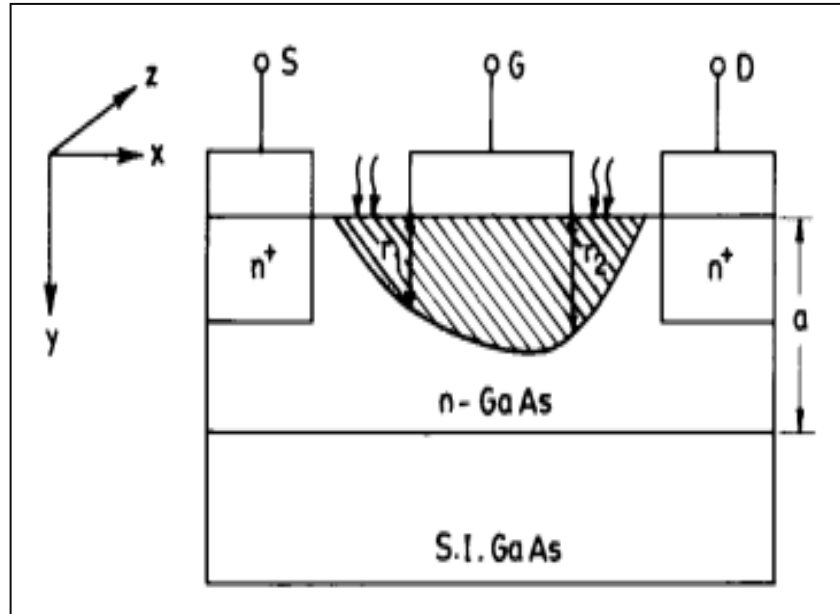


Figure I. 8: Éclairage à travers les zones inter-électrodes [30].

Le modèle de Shubha et all étudie un OPFET de grille opaque aux rayements [30]. Le modèle considère que les photons absorbés par les zones inter-électrodes n'affectent pas sensiblement la zone de déplétion qui se situe juste sous la grille. Tandis que la couche active et la jonction couche active/substrat sont fortement perturbées par les porteurs en excès qui sont générés dans le canal conducteur.

c) Éclairage de la grille et des zones inter-électrodes

L'illumination se fait à travers les zones inter-électrodes et la grille (figure I.9). Il paraît que les modèles [17, 33] utilisant ce type d'éclairage ne sont pas nombreux. S. Bose et all [33] ont développé un modèle analytique à deux dimensions pour étudier les caractéristiques $I(V)$ d'un MESFET GaAs sous l'effet de l'éclairage. Ce modèle considère que les radiations pénètrent entre les zones inter-électrodes et elles sont absorbées par la région active et le métal de grille sachant que cette dernière est semi-transparente. Ainsi, suite à l'illumination du composant, des porteurs sont générés dans le semi-conducteur de l'OPFET.

Les électrons sont orientés vers le canal et les trous vers la surface où ils se recombinaient avec les pièges de la surface. Notons que les porteurs libres créés dans le canal réduisent les résistances parasites de drain-source. Par ailleurs, un photo-voltage est développé aux bornes de la jonction Schottky conduisant à la réduction de la hauteur de la barrière

Schottky et la largeur de la zone de déplétion menant à son tour à un élargissement de la largeur du canal.

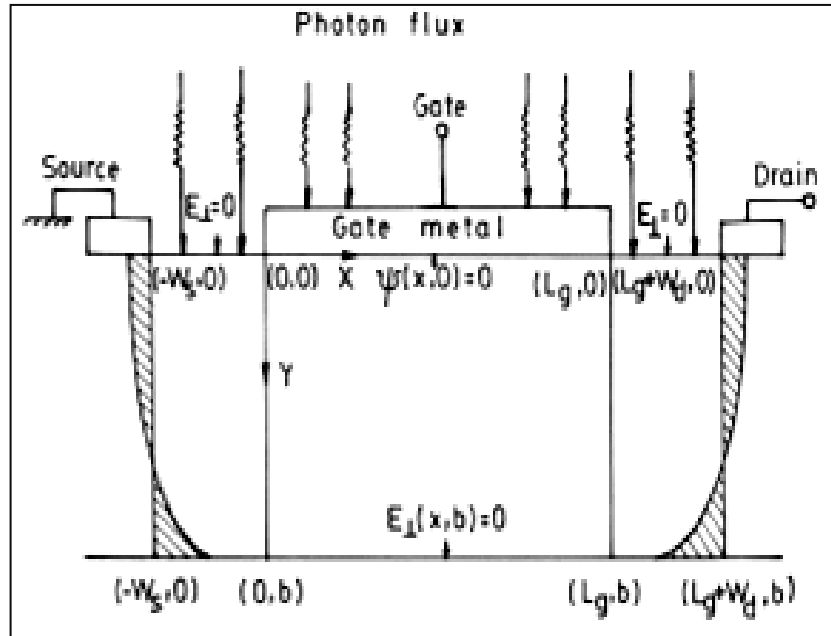


Figure I. 9 : Éclairage à travers les zones inter-électrode et la grille [33].

Enfin, plus la largeur du canal augmente plus le nombre de porteurs qui traversent le canal croit. En conséquence, l'effet photoconducteur augmente le courant de sortie d'un OPFET à comparer à un MESFET non éclairé.

d) Éclairage entre contact grille – Drain

Cette façon d'illumination est représentée par la figure I.10, ses utilisateurs ne sont pas nombreux [8, 34]. G. Conte et all [8] ont fabriqué un MESFET avec une surface du canal en diamant poly-cristallin et une grille opaque avec des propriétés géométrique adaptées pour la détection de la lumière UV. Leur objectif est la création des porteurs photo-générés à l'intérieur la région entre le contact de grille et celui du drain figure I.10. L'intérêt d'une telle structure d'OPFET avec des distances inter électrodes différentes est d'évaluer la lumière minimale détectable.

Les rayons UV incidents dans la région grille-drain créent des charges dans le canal. Suite à l'effet du champ électrique interne, les trous photo-générés contribuent avec les charges du canal pour améliorer le signal du courant de drain.

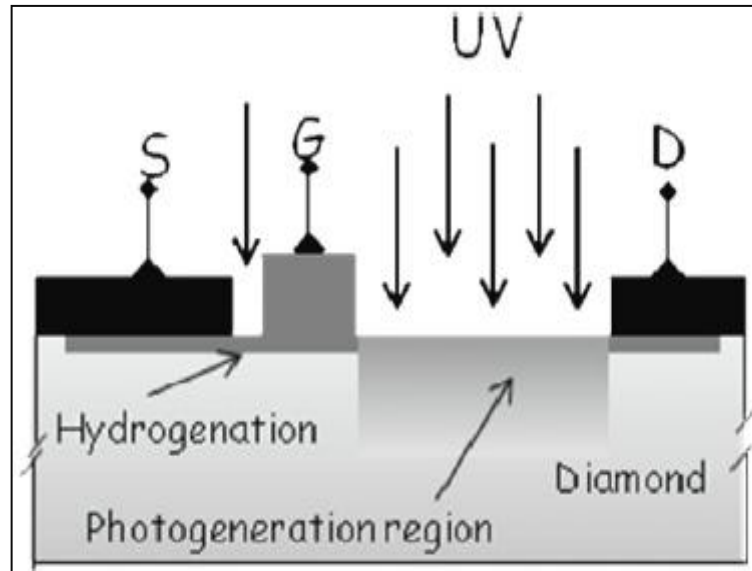


Figure I. 10 : Éclairage entre les contacts drain-grille [8].

e) Éclairage à travers le substrat.

Dans certains travaux, l'éclairage se fait à travers le substrat comme illustré par la figure I.11. Justement, N. S. Roy, et all [35] ont mené une étude des propriétés dynamiques d'un OPFET afin de vérifier l'absorption à travers le substrat et le canal actif. Il a été montré que :

- l'effet photovoltaïque interne et plus élevé que l'effet photovoltaïque externe.
- La comparaison des caractéristiques de l'OPFET, avec et sans effet du substrat exhibe, dans le cas où l'effet du substrat est absent, que les valeurs de la tension optique sont plus grandes.
- Le courant de drain est plus grand lorsque l'éclairage est focalisé à la jonction couche active /substrat à comparer à l'effet du substrat.
- L'augmentation de la largeur du canal augmente le courant de drain.

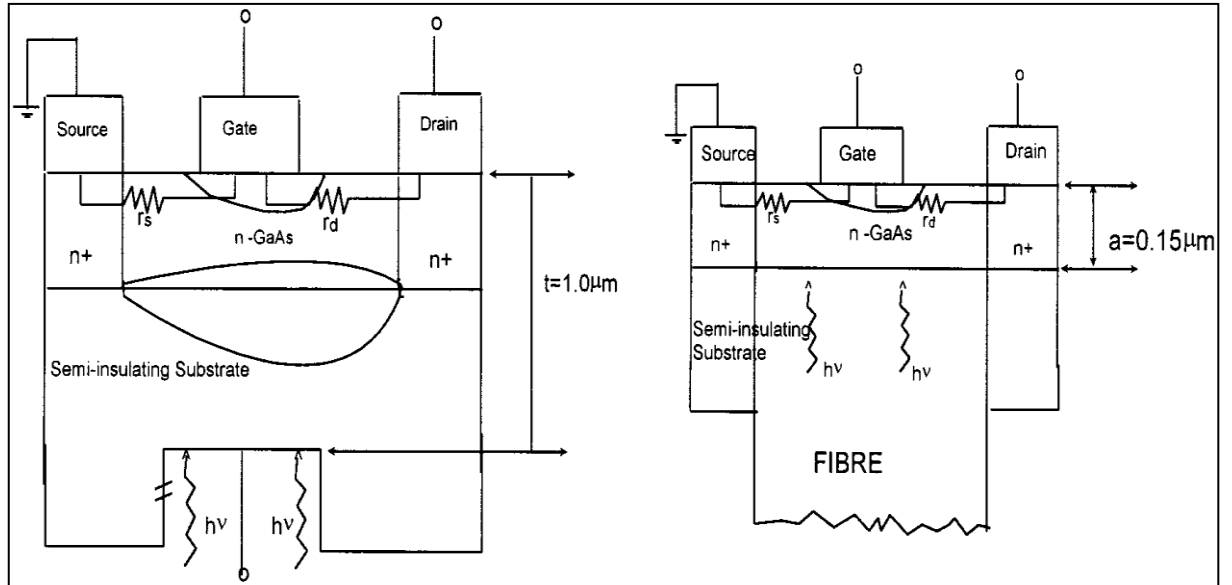


Figure I. 11 : Éclairage à travers le substrat [35].

I. 5 OPFET GaAs

I. 5. 1 Propriété optique du GaAs

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. [36]. De plus, lorsque le GaAs est éclairé par une lumière d'énergie, $h\nu$, supérieure au gap, $E_g = 1,41$ eV, chaque photon absorbé génère une paire électron-trou. Les porteurs de charges photo-générés modifient les propriétés du matériau et sont responsables de l'effet optique dans les dispositifs GaAs. Pour des applications nécessitant l'absorption d'un faisceau lumineux monochromatique, le GaAs est préférable dans la fenêtre spectrale optique 600 - 800 nm [37]. Par ailleurs, l'arséniure de gallium est le plus ciblé des composés semi-conducteurs III-V, en raison de ses excellentes propriétés photoélectriques [36] et son vaste domaine d'application.

Des travaux de recherche [36, 38 - 40] récents montrent l'importance des propriétés optiques du GaAs. A. P. Craig et al 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-courant 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 photo-detectors à base de **Si**. Plusieurs travaux se sont intéressés aux propriétés du GaAs. Le tableau I.1 résume quelques caractéristiques du GaAs.

Tableaux I. 1 : Caractéristiques du GaAs.

Paramètre		Valeur à T = 300 K	
Structure cristalline		Zinc blende	
Mobilité	Électrons	8500	cm ² /v.s
	Trous	400	cm ² /v.s
Densité	Atomique	5,32	g/cm ³
	d'état dans B _C	N _C = 4,7.10 ¹⁷	cm ⁻³
	d'état dans B _V	N _V = 6,10 ¹⁸	cm ⁻³
Énergie	Gap	1,42	eV
	Type	Direct	
Température de fusion		1238	°C
Durée de vie des porteurs minoritaires		10 ⁻⁸	s
Résistivité intrinsèque		10 ⁸	Ω.cm
Vitesse d'entraînement		2.10 ⁷	cm/s

I. 5. 2 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.12a). 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 [35]. Notons que les trous générés dans une région de déplétion sont respectivement entraînés vers le métal de grille et le substrat semi-insolent 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.12b).

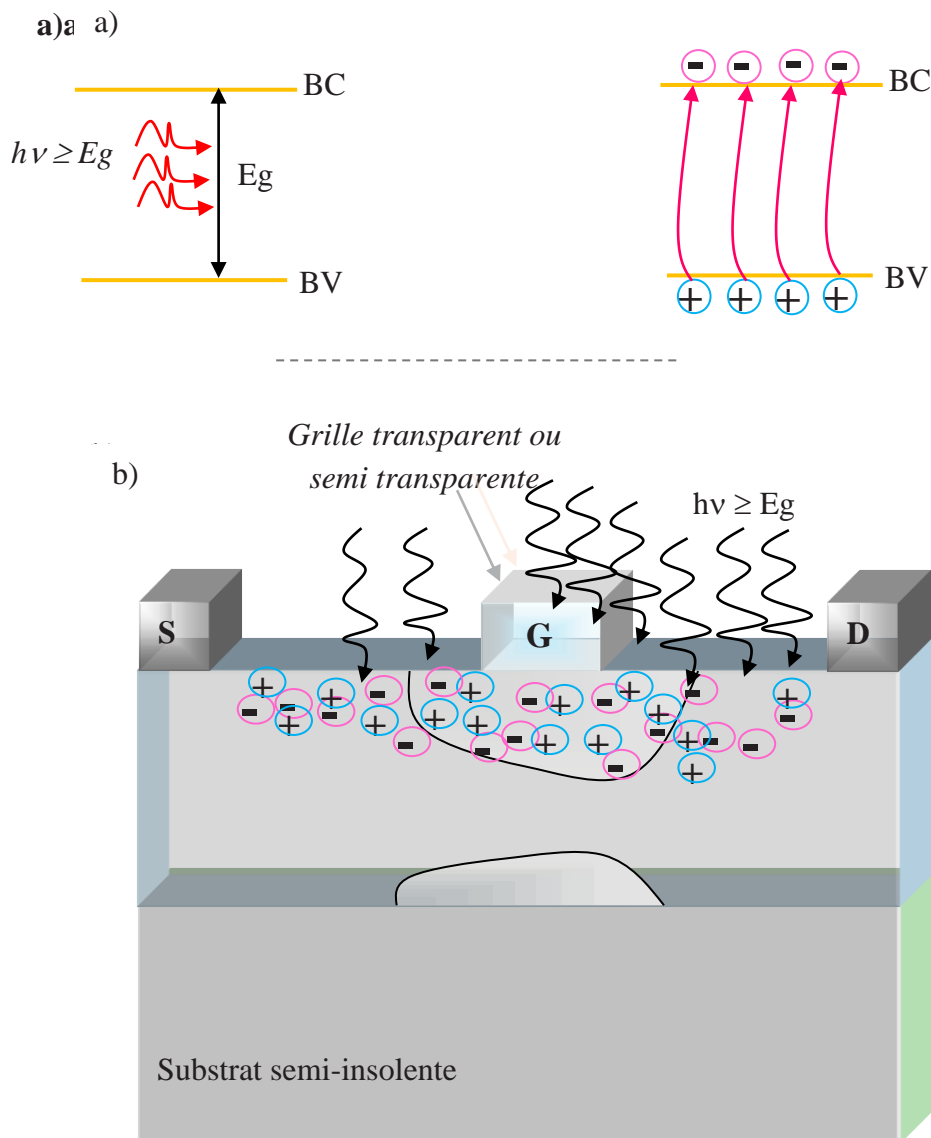


Figure I. 12 : MESFET sous effet Photonique : (a) processus de génération des porteurs et (b) distribution spatiale des porteurs générés.

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 [11]. 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 [11, 29].

I. 5. 3 Effet photonique sur les caractéristiques d'un MESFET

a) Caractéristiques I(V)

Plusieurs modèles se sont intéressés à l'influence de la densité optique sur les caractéristiques I(V). La figure I.13 représente les résultats expérimentaux des caractéristiques du courant de drain en relation avec la tension de grille, V_{GS} , d'un MESFET éclairé par un LED avec une densité d'éclairement égale à $2,13 \text{ mW/cm}^2$.

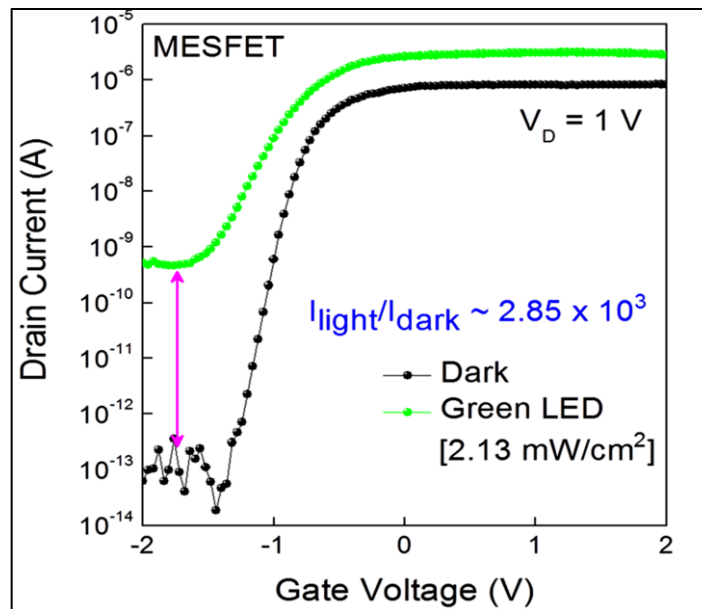


Figure I. 13 : Courant de drain en fonction de la tension de grille dans les conditions sombre et éclairée [8].

On constate que le courant de drain augmente avec l'augmentation V_{GS} et de la densité d'éclairement. Notons que le taux d'augmentation entre les conditions sombre et éclairée, $I_{Éclairée}/I_{Sombre}$, s'élève à $2,85.10^3$ [8].

L'effet photovoltaïque et l'effet photoconducteur sont à l'origine de l'augmentation du courant de drain avec la densité optique [29]. Remarquons que la photo-tension développée à travers la jonction de grille, réduit la largeur de la région de déplétion. En conséquence, la largeur du canal conducteur augmente entraînant ainsi une augmentation importante du courant drain-source en raison à la fois des électrons photo-générés et des électrons d'impuretés [35].

b) Résistances

La figure I.14 représente les caractéristiques de la résistance en relation avec V_{GS} dans les conditions sombres et lumineuses. On constate, à comparer aux conditions sombres, que la résistance diminue dans les conditions lumineuses.

Cette diminution est attribuée à l'effet photoconducteur qui fait accroître la conductivité. Ceci montre l'avantage de l'effet photonique dans les MESFETs.

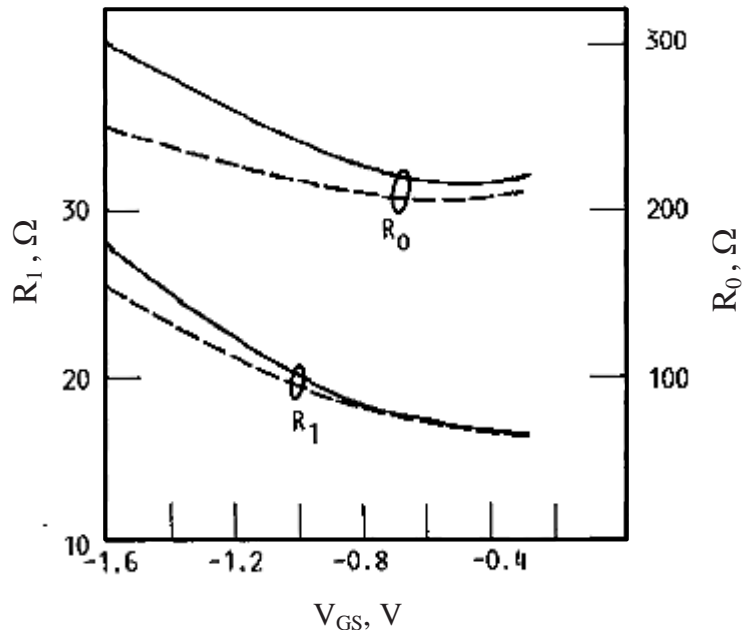


Figure I. 14 : Résistances en fonction de la tension de grille dans les conditions sombre (—) et éclairée (- - - -) [5].

c) Capacités

Les capacités internes jouent un rôle important dans la détermination des caractéristiques micro-ondes et optiques des MESFET GaAs. N. V. L. N. Murty, et al [11] propose un modèle très utile pour la conception de commande optique MMIC et OEIC utilisant les MESFETs GaAs. La figure I.15 montre l'effet photonique sur la capacité de drain, C_D , en fonction de la tension V_{GS} .

On constate que les valeurs de C_D relevées dans les conditions lumineuses sont plus faibles à comparer à celles des conditions sombres pour toutes les valeurs de V_{GS} considérées. Ce résultat améliore les caractéristiques de l'impédance de sortie et en conséquence l'adaptation des impédances pour toute utilisation de puissance.

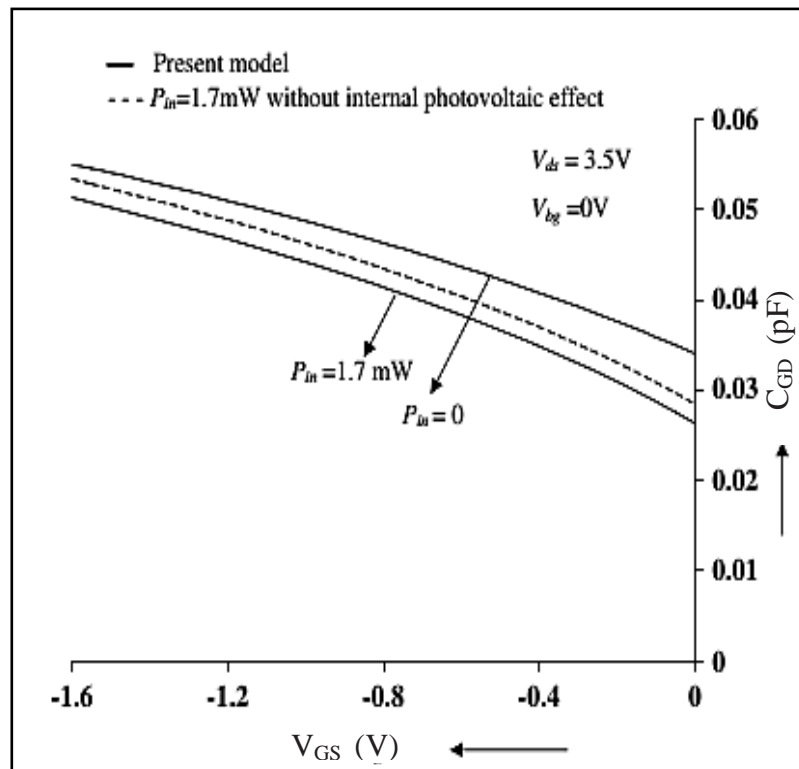


Figure I. 15 : Évolution de la capacité de drain en fonction de la tension de grille dans les conditions sombre et éclairée [11].

La figure I.16 montre l'évolution de la capacité grille-source en fonction de la tension, V_{GS} dans les conditions sombre et lumineuse. Contrairement au cas de C_D , cette capacité de

grille subit une importante augmentation dans les conditions lumineuse. Ce résultat améliore l'impédance d'entrée du composant et facilite l'isolation entre l'entrée et la sortie.

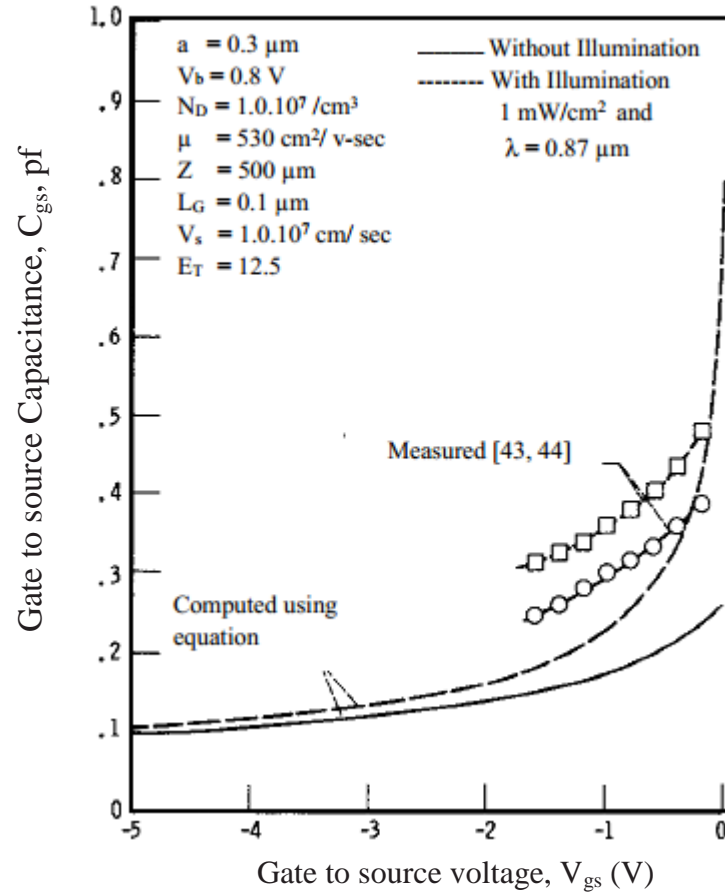


Figure I. 16 : Évolution de la capacité grille-source en fonction de la tension de grille dans les conditions sombre et éclairée [17].

I. 6 APPLICATIONS DES OPFETs

Les OPFETs ouvrent de nouvelles perspectives dans les domaines aussi bien de recherche que d'applications. Depuis la théorie développée par C. Baak [15] en 1977 jusqu'à aujourd'hui le nombre des applications des OPFETs ne cessent d'augmenter. Ce paragraphe résume l'essentiel selon leur apparition en tenant compte de l'importance de l'effet photonique dans les MESFETs.

- **Photo commutateurs :** Hee Sung Lee et all [10] ont fabriqué un MESFET à base de 4 - 10 couches MoS₂ avec un contact Schottky en NiOx. Ce composant a été éclairé par un LED qui émet dans le vert avec une longueur d'ondes $\lambda = 520$ nm. Les résultats montrent que la photo-commutation est très rapide de 2 ms. De plus, l'OPFET se comporte comme un phototransistor avec des fenêtres NiOx semi-transparentes pour des applications nano-optoélectroniques. G. Conte et all [8] ont fabriqué un MESFET dont la surface du canal est en diamant poly-cristallin et une grille opaque avec des propriétés géométrique adaptées pour la photo-génération dans la région G-D par la lumière UV. Ce composant trouve son application dans les nouvelles technologies photoniques : en commutation rapide ou comme récepteurs optiques.

- **Système de communication :** Dans les systèmes de communication, du point de vue sensibilité optique, l'OPFET se présente comme le meilleur dispositif optoélectronique [19]. De plus, il a été rapporté que le facteur de bruit optimal d'un MESFET est considérablement réduit lorsqu'il est polarisé optiquement. Ainsi, à l'heure actuelle, les MESFETs GaAs à grande vitesse, faible coût, à intégration monolithique et optiquement polarisés sont de plus en plus demandés pour des applications hautes fréquences dans les systèmes de communication optique [33].

- **Circuit Intégré Monolithique Micro-onde :** L'effet photonique dans les MESFETs est particulièrement souhaitable pour les applications dans les circuits intégrés monolithiques micro-ondes, MMIC, "Monolithique Micro-onde Integred Circuit's". Dans les applications hyperfréquence, le MESFET est logiquement utilisé sur la puce en qualité de port optique. Ceci peut être intéressant pour la plupart des alimentations à commande optique rapide. Le signal hyperfréquence est distribué en éléments lumineux par l'utilisation de fibres optiques. Dans cette application, le MESFET peut servir comme un photo-détecteur intégré dans les modules T/R [44].

- **Mélangeur optique:** Le MESFET peut être utilisé simultanément comme un photo-détecteur et un mélangeur suite à son éclairage par un rayon de fréquence radiométrique. Plusieurs types de mélangeurs peuvent

être confectionnés via illumination de MESFETs. Il suffit d'utiliser simultanément deux lasers. Les deux signaux optiques sont mélangés dans le MESFET pour obtenir différentes fréquences dont la longueur d'onde est de l'ordre de mm ou μm [43, 44].

- **Commutateur optique amplificateur de lumière :** Un nouveau dispositif optoélectronique intégré est proposé comme commutateur optique amplificateur de lumière, LAOS, "Light Amplifier Optical switch". Le dispositif est constitué d'un transistor à effet de champ en série avec une source de lumière qui peut être une diode double hétéro-structure d'émission de lumière (LED) ou une diode laser (LD). Un modèle de circuit quantitative pour le projet LAOS est présenté. On montre analytiquement que le passage se déroule à partir d'un état faible courant à un état courant élevé à travers une région de résistance différentielle négative (NDR) quand une tension supérieure à la tension de retournement est appliquée [13]

- **Réglage:** Il est possible de régler la fréquence d'un oscillateur via l'éclairage direct d'un MESFET utilisé comme composant actif d'un oscillateur à micro-onde. Cette application a été établie par plusieurs chercheurs. Déjà en 1979, Moncrief [45] a prouvé avec succès un tel réglage optique d'un oscillateur 12 GHz. Il a atteint la plage de réglage de 400 MHz avec 100 MW de puissance optique. En général, la gamme possible de réglage optique d'oscillateurs MESFET est seulement de l'ordre de quelques pour cent [43, 46 & 47].

- **Contrôle des amplificateurs et des déphaseurs:** Le gain et la phase des amplificateurs peuvent être contrôlés optiquement par l'éclairage de MESFET avec une intensité lumineuse variable. Par conception adaptée, le gain ou la phase sont des fonctions croissantes de l'intensité lumineuse. Un contrôle de gain très efficace a été rapporté par plusieurs auteurs. Par ailleurs, des gammes de réglage aussi grandes que 25-30 dB ont été atteints [43, 48 & 49].

I. 7 CONCLUSION

Nous avons présenté, dans ce chapitre, une étude générale sur les OPFETs: types, effet optique, avantage de l'éclairage, etc. suivie des conséquences de l'effet photonique sur les MESFETs ainsi que les propriétés du GaAs. Ensuite, nous nous sommes intéressés aux différentes méthodes d'illumination. Il existe plusieurs sources d'excitation: UV, IR et les lasers. Cependant, dans la plupart des travaux expérimentaux, la diode laser ou la diode électroluminescente restent les plus utilisées. Il est évident que le choix de la longueur d'onde dépend de la nature du métal de grille. Quant aux façons d'illumination, elles diffèrent selon l'objectif fixé ou l'application souhaitée. Ainsi, on peut éclairer: la grille, les zones inter-électrodes, la région entre contact grille–drain ou à travers le substrat. Il a été constaté qu'il existe une relation entre la façon d'éclairage et les zones de création des porteurs photo-générés qui modifient sensiblement les performances de l'OPFET.

Également, les caractéristiques de MESFET sous les conditions lumineuse et sombre telles que $I(V)$, résistances et capacités ont été étudiées et comparées. L'effet photovoltaïque et l'effet photoconducteur sont à l'origine de l'augmentation du courant de drain avec la densité optique suite à la réduction de la largeur de la zone de déplétion induite par la photo-tension développée à travers la jonction de grille. En général, dans les conditions lumineuses, les résistances diminuent suite à l'augmentation de la conductivité. Quant aux capacités, l'illumination conduit à une diminution des valeurs de C_D et une augmentation de celles de C_G . Ces résultats améliorent respectivement les impédances de sortie et d'entrée.

Enfin, nous terminons ce premier chapitre par quelques applications des OPFETs dont le nombre ne cesse d'augmenter. Ce composant trouve son application dans les nouvelles technologies photoniques :

- ✓ En commutation rapide ou comme récepteurs optiques.
- ✓ Dans les systèmes de communication.
- ✓ Dans les applications hyperfréquence, en qualité de port optique.

- ✓ Dans le réglage optique d'oscillateurs MESFET.
- ✓ Dans le contrôle du gain et la phase des amplificateurs optique via un éclairage avec une intensité lumineuse variable.
- ✓ Mélangeur optique pour adaptation des fréquences.
- ✓ Commutateur optique amplificateur de lumière.

Chapitre II

Investigation Et Quantification De La Tension De Blocage D'un OPFET

II. 1 INTRODUCTION

Le mécanisme physique fondamental qui apparaît dans l'illumination optique des MESFETs est la création de porteurs libres (électron-trou) sous la grille, dans le canal conducteur. Ce mécanisme apparaît lorsque l'énergie du photon absorbé est supérieure ou égale au gap du semi-conducteur. Cet effet, connu sous le nom de l'effet photonique, améliore certaines propriétés particulièrement pour les MESFETs utilisés dans le domaine des télécommunications ou en environnement militaire pour la détection et le guidage.

Un des paramètres importants à prendre en considération dans le design d'un MESFET GaAs est la tension de blocage, V_{GSoff} . Son contrôle est d'une importance capitale pour la maîtrise des performances du composant. D'où l'intérêt accordé à cette tension en lui réservant le contenu de ce chapitre.

Il existe plusieurs travaux expérimentaux et théoriques qui s'intéressent à l'importance de la tension de pincement dans le design d'un MESFET. La majorité de ces travaux propose des modèles basés sur ce qu'on appelle faible tension de pincement [1 - 3]. Hisanori Uda et al [4] développe un MESFET GaAs qui fonctionne à faible tension de control OV / -3V est +3V/ OV, utilisé comme Switch dans les circuits intégrés des téléphones portables.

Par contre d'autres travaux s'intéressent aux hautes tensions de pincement [5, 6]. S. Jit et al [7] utilise dans la conception de MESFET GaAs, de hautes tensions de pincement, de l'ordre de 7,76 V. De tels composants trouvent leur application dans la génération des forts signaux à commande optique et les circuits micro-ondes de haute puissance.

La différence essentielle entre les dispositifs haute et basse pincement est que dans le premier cas les dispositifs peuvent être exploités à des tensions de polarisation plus élevées par rapport aux dispositifs de faible tension de pincement [7].

Dans ce travail, nous avons élaboré un ensemble de programmes destinés à l'étude de l'influence de l'intensité du flux optique incident ainsi qu'à la densité de dopage et l'épaisseur du canal sur la tension de blocage d'un MESFET, V_{GSoff} .

Après la présentation du modèle de P. Chakrabarti et les équations de base [8] nécessaires au développement de notre étude, nous donnons les résultats de l'influence de certains paramètres caractéristiques tels que la densité du dopage et l'épaisseur du canal sur la tension de blocage. Notons qu'un intérêt particulier sera accordé à l'effet de l'éclairement. Enfin, une quantification des variations sera établie.

L'effet de l'éclairement sur les caractéristiques électriques et structurelles est étudié et analysé à travers le développement d'un programme de simulation. Ce logiciel prend en considération les lois qui gèrent les phénomènes physiques. Il permet la dérivée et la résolution d'un système d'équations ainsi que l'édition des résultats sous forme de courbes. Notons que la quantification de la tension de blocage, V_{GSoff} , en relation avec (i) la densité de l'éclairage et (ii) les paramètres géométriques et physique (a , Z , L_G & N_D) constitue une partie importante de ce chapitre. Par ailleurs, nous rappelons que dans la littérature, plusieurs travaux expérimentaux et théoriques s'intéressent à l'effet de l'éclairement sur les caractéristiques des MESFETs [9 - 13]. Cependant, le choix du modèle de P. Chakrabarti et al [8] est décidé par le fait que ce dernier prend en considération la tension photonique, V_{op} .

II. 2 PHÉNOMÈNE DE PINCEMENT

II. 2. 1 Mise en évidence

Le phénomène de pincement du canal conducteur d'un MESFET apparaît lorsque les zones de déplétion de part et d'autre du canal se rencontrent, le courant de sortie, I_{DS} , est pratiquement nul et la résistance entre la source et le drain tend vers l'infini. A ce phénomène correspond une tension de pincement, V_P , définie comme étant la tension grille-source, V_{GS} , pour laquelle le canal est complètement pincé [14]. Cette tension, V_P , joue un rôle très important particulièrement dans les circuits logiques influençant ainsi toutes les caractéristiques des circuits intègres [15].

Notons que la tension de pincement appelée communément la tension de blocage d'un MESFET dépend de plusieurs paramètres tels que la densité du dopage de la zone active,

l'épaisseur du canal, la tension entre drain- source, V_{DS} , et la température, T . À titre d'exemple, nous montrons par la figure II.1 l'influence de la température sur V_p à différentes valeurs de V_{DS} . On remarque qu'à une polarisation drain – source considérée, lorsque la température augmente, la tension de pincement diminue. Par ailleurs, à une température donnée, une augmentation de la tension V_{DS} conduit à une diminution de V_p [16].

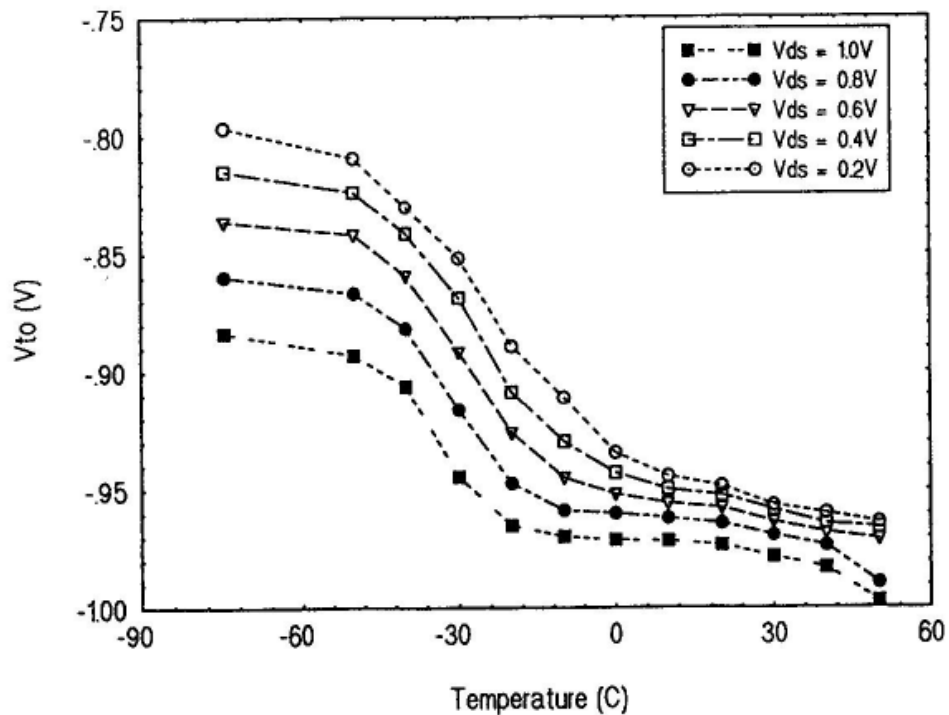


Figure II. 1: Influence de la température sur la tension de pincement [16].

II. 2. 2 Méthodes de détermination

La valeur de la tension de pincement est choisie en fonction du domaine d'utilisation du composant. Certains dispositifs sont exploités à des tensions de polarisation très élevées comme dans les circuits micro-ondes de haute puissance [7].

Notons que les porteurs en excès générés sous l'effet de l'éclairement dans le canal modulent la conductivité. Ainsi, la tension photonique développée à travers la barrière Schottky diminue la largeur de la région de déplétion [1] et influence fortement le

pincement du canal conducteur et par conséquent la tension de blocage. Il existe, plusieurs méthodes qui permettent de déterminer aussi bien la valeur de la tension de pincement que les paramètres l'influençant, nous résumons ci-dessous les plus utilisées:

- a) En considérant l'écart entre la barrière de potentiel et la tension de seuil, V_T

$$V_p = V_{bi} - V_T \quad (II. 1)$$

- b) Directement en fonction de la densité de dopage et l'épaisseur du canal via la relation:

$$V_p = \frac{qN_D a^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (II. 2)$$

Où ε_0 est la permittivité du vide et ε_r est celle du GaAs, la formule (II.2) montre que V_p dépend de l'épaisseur, a , de la couche active, du dopage, N_D , et de la permittivité du semi-conducteur.

- c) À partir du profile de dopage via la relation suivante [17]:

$$V_p = \frac{q}{\varepsilon} \int_0^\infty N_D(y) d(y) \quad (II. 3)$$

- d) Graphiquement, à partir de la caractéristique de transfert $I_{DS} = f(V_{GS})$. La tension de pincement correspond à l'intersection de la courbe avec l'axe de V_{GS} (figure II.2).

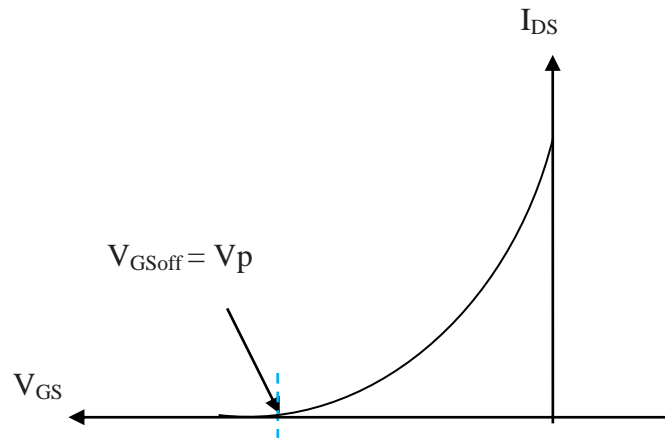


Figure II. 2: Détermination graphique de la tension de pincement.

C'est en se basant sur cette dernière méthode et à travers le calcul du courant de drain d'un MESFET GaAs sous éclairage que nous avons mené une étude détaillée de la tension de blocage en relation avec la densité optique, la densité de dopage et l'épaisseur du canal conducteur.

II. 3 PRÉSENTATION DU MODÈLE DE P. CHAKRABARTI

Plusieurs processus peuvent être combinés pour créer un excès des porteurs dans le semi-conducteur. Parmi ces processus, on note la photo-excitation où l'excès de porteurs par rapport à l'équilibre est créé à l'aide d'un rayonnement.

Le composant fonctionne en régime statique et éclairé par rayonnement optique d'incidence verticale selon l'axe y . Notons qu'au cours de leur propagation, les photons sont absorbés par le matériau GaAs. Ce phénomène est caractérisé par un coefficient d'absorption, représentant la variation relative de la densité de rayonnement par unité de longueur $\alpha_{\text{GaAs}} = 10^6 \text{ m}^{-1}$, et a une longueur d'onde $\lambda_{\text{GaAs}} = 0,87 \text{ }\mu\text{m}$.

II. 3.1 Hypothèses et paramètres fondamentaux

La modélisation d'un MESFET éclairé exige plusieurs hypothèses simplificatrices et proches de l'expérimentale. Nous nous intéresserons tout d'abord à l'effet de l'éclairage d'un MESFET GaAs. En général, l'étude se fait sous des hypothèses que nous résumons ci-dessous:

- ❖ Le dopage du canal est uniforme.
- ❖ Le rayonnement est incident sur le métal de la grille dans la direction verticale et le courant drain-source circule dans la direction horizontale.
- ❖ La génération des paires électron-trou en excès est le résultat de l'absorption du rayonnement par le semi-conducteur.
- ❖ Les porteurs en excès créés changent la distribution des charges au-dessous de la grille et dans le canal en raison de l'effet photoconductivité,

- ❖ les porteurs en excès développent un photo-voltage, V_{op} , à travers la grille Schottky ; en raison de l'effet photovoltaïque,
- ❖ En présence d'une résistance élevée de grille, la tension photoélectrique est à peu près égale à la tension d'un circuit ouvert de la jonction Schottky éclairée et influence fortement les caractéristiques du composant dans les conditions lumineuses.

Dans les conditions illuminées, la région de charge d'espace interne en dessous de la grille, peut être divisée en trois sections I, II, et III comme indiqué dans la figure II.3 [18].

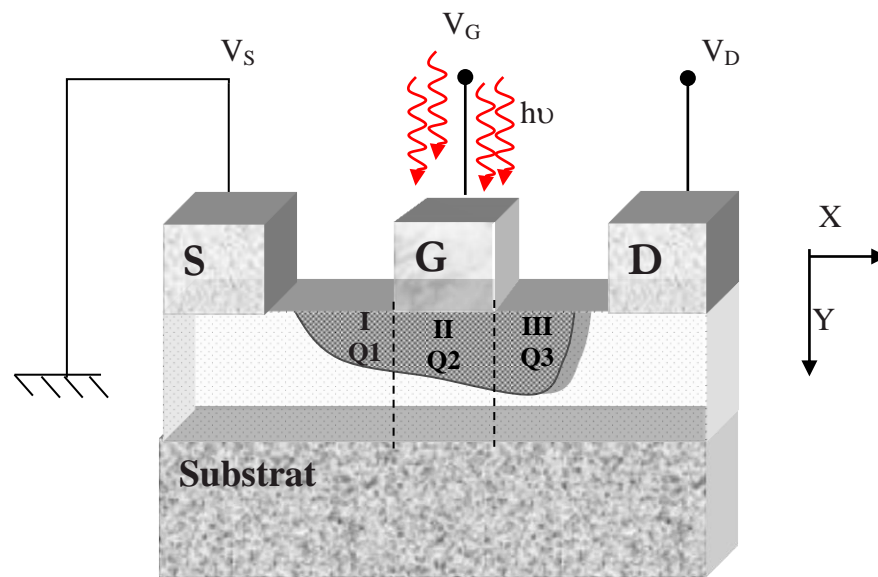


Figure II. 3: Structure d'un MESFET éclairée.

Notons que par rapport à la surface, l'axe x représente la direction horizontale et l'axe y représente la direction verticale. Sous éclairage, la charge totale dans la région de déplétion en dessus du canal est donnée par [8]:

$$\begin{aligned}
 Q_{cop}(V_X) = & aqZL_G N_D - \frac{qZN_D L_G}{2} \left[\left(\frac{2\varepsilon}{qN_d} \right)^{1/2} \left\{ \begin{aligned} & (V_{bi} - V_G + V_D - V_{op})^{\frac{1}{2}} \\ & + (V_{bi} - V_G + V_X - V_{op})^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \right] \\
 & + \frac{P_{op}}{h\nu} (1 - R_m)(1 - R_s)(1 - \exp(-\alpha a)) \tau_L Z q L_G \\
 & - qRZL_G \tag{II.01}
 \end{aligned}$$

où Z et L_G sont respectivement la largeur et la longueur de grille, a l'épaisseur du canal conducteur, P_{op} est la densité optique; ε la permittivité ($\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$); R_s et R_m sont respectivement les coefficients de réflexion du semi-conducteur et du métal de grille; μ_p et μ_n les mobilités respectives des trous et d'électrons; N_D la concentration de dopage de la couche active; V_{bi} est la barrière de potentiel de la jonction Schottky; q la charge de l'électron; h la constante de Planck ; α le coefficient d'absorption optique ; λ la longueur d'onde optique incidente, τ_L la durée de vie des porteurs minoritaires, R est le taux de recombinaison en surface, V_{op} la tension optique et ν est la fréquence du rayon optique.

Par ailleurs, la durée de vie des porteurs minoritaires τ_L est décrite par la relation (II.5). De plus, le taux de génération des porteurs en excès, G_{op} , à partir de l'interface métal de grille-semi-conducteur par unité de volume est donné par la relation (II.6). Il est facile de remarquer que les deux grandeurs dépendent fortement de la densité de l'éclairage incident. Par conséquent, le photo-voltage développé à travers la jonction de grille est également influencé.

$$\tau_L = \left\{ \frac{1 + \frac{\left(4(1 - R_m)(1 - R_s)P_{op}\tau_p(1 - \exp(-\alpha a))\right)^{\frac{1}{2}}}{an_i h \nu}}{\frac{2(1 - R_m)(1 - R_s)}{an_i h \nu} P_{op}\tau_p(1 - \exp(-\alpha a))} - 1 \right\} \tag{II.5}$$

$$G_{op} = \frac{(1 - R_m)(1 - R_s)P_{op}}{ah\nu} \tag{II.6}$$

Un autre paramètre très important dans la modélisation des composants photo-actifs, il s'agit du taux de recombinaison à la surface, R . Ce taux est décrit par la relation (II.7) [19].

$$R = \frac{N_t K_n K_p (n_s p_s - n_t p_t)}{K_n (n_s + n_t) + K_p (p_s + p_t)} \quad (II.7)$$

Où K_n et K_p sont respectivement les coefficients de capture des électrons et des trous; n_s et p_s sont les concentrations des porteurs en surface données par II.8 et II.9 et qui prennent respectivement les valeurs n_t et p_t lorsque le niveau de Fermi coïncide avec celui des pièges [19]:

$$n_s = \frac{\alpha P_{op} (1 - R_m) (1 - R_s) \tau_n}{h \nu} \quad (II.8)$$

$$p_s = \frac{\alpha P_{op} (1 - R_m) (1 - R_s) \tau_p}{h \nu} \quad (II.9)$$

II. 3. 2 Photo-voltage

La tension photonique de circuit ouvert, V_{op} , appelée également le photo-voltage, générée au contact de grille en présence de recombinaisons en surface est donnée par la relation suivante [8]:

$$V_{op} = \frac{\eta k T}{q} \ln \left[\frac{q G_{op} \sqrt{\frac{k T}{q}} \mu_p \tau_L - R q}{J_s} \right] \quad (II.10)$$

Où η , k , T et J_s sont respectivement le facteur d'idéalité de la jonction Schottky, la constante de Boltzmann, la densité de courant de saturation du contact Schottky de la grille. Notons que pour les semi-conducteurs à grande mobilité tel que le GaAs, J_s peut être déterminé par la théorie de thermo-émission et exprimé par :

$$J_s = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{KT}\right) \quad (II.11)$$

Où A^* est la constante de Richardson pour l'émission thermo-ionique et ϕ_{Bn} est la hauteur de la barrière Schottky.

a) Effet de la recombinaison en surface sur le photo-voltage

Le mécanisme physique fondamental après l'éclairage optique du MESFET est l'absorption de photons dans la bande de valence du matériau créant ainsi des électrons et des trous [6]. Les électrons se déplacent vers le canal tandis que les trous se déplacent vers la surface où ils se recombinent par les pièges de surface. Les résultats de la recombinaison en surface donnent un courant de fuite qui affecte le photo-voltage. A son tour, cette dernière donne un effet de rétroaction, soit par la source ou par le substrat [11]. L'évolution de la tension photonique de circuit ouvert, V_{op} , développée à travers la barrière Schottky en fonction de la puissance de la densité optique à différentes concentrations des pièges, N_T est représentée par la figure II.5. Il est clair que les valeurs les plus élevées de la tension photonique sont obtenues pour les plus faibles densités des pièges. En conséquence, l'augmentation de la densité des pièges favorise les recombinaisons en surface. Ceci se traduit par une diminution de la tension photonique créé et représente un inconvénient majeur dans le fonctionnement des OPFETs.

b) Influence de la durée de vie des porteurs minoritaires sur le photo-voltage

Dans les conditions lumineuses, les porteurs en excès photo-générés, dans la région active au-dessous de la grille, influencent la durée de vie des porteurs minoritaires après l'éclairage τ_L (Figure II.4).

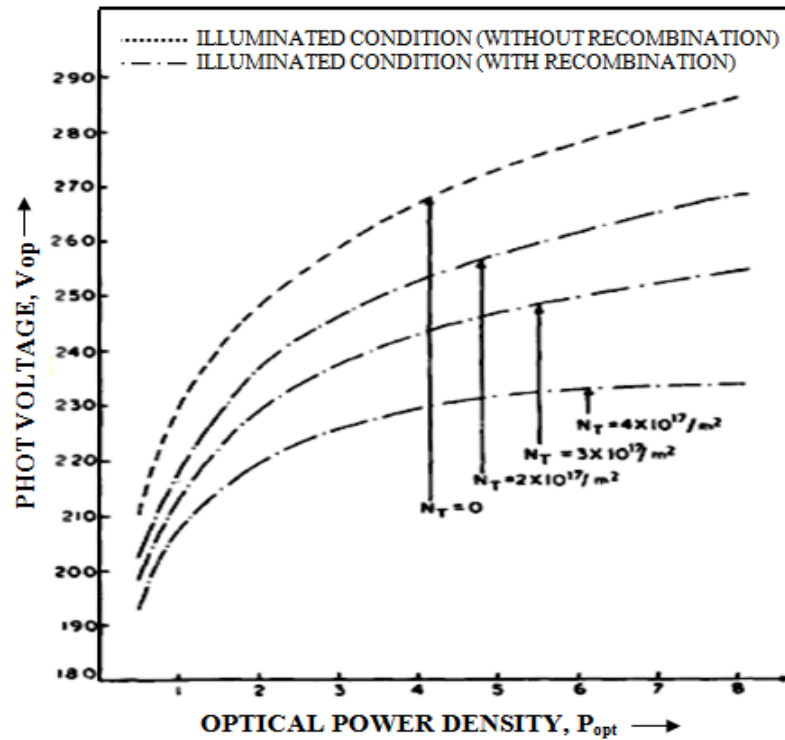


Figure II. 4: Influence de la densité des pièges sur le photo-voltage [8].

La figure II.5 représente les variations de la durée de vie des porteurs minoritaires après éclairage, τ_L , en fonction de la densité optique. On constate que lorsque la densité de la puissance de l'éclairage augmente, la durée de vie des porteurs minoritaires diminue. Cette décroissance de τ_L limite la valeur du photo-voltage, V_{op} . Cela signifie que V_{op} ne peut continuer à augmenter indéfiniment avec l'augmentation du taux de génération optique provoquée par une croissance de la densité de la puissance optique incidente. En conséquence, comme pour l'effet de la recombinaison, la décroissance de la durée de vie des porteurs limite l'amplitude du photo-voltage, V_{OP} .

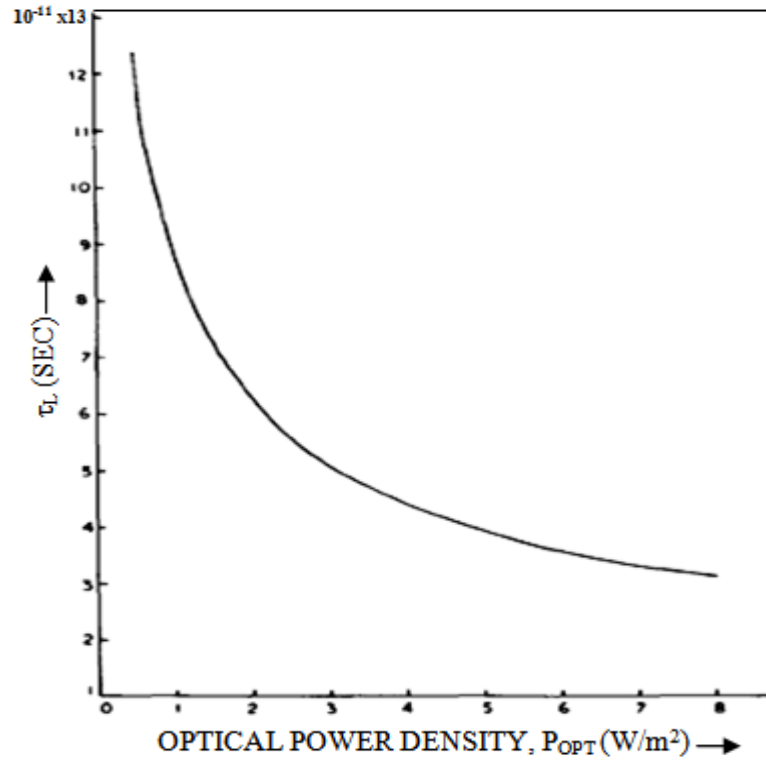


Figure II. 5: Variation des porteurs minoritaire en fonction de la densité optique [8].

II. 3. 3 Courant de drain sous éclairage

Il est évident que les électrons photo-générés contribuent au courant drain-source. Suite à l'application d'une tension drain-source, il se développe un photo-voltage à travers la jonction Schottky du dispositif résultat de la modulation de la conductance du canal conducteur [5].

La concentration des porteurs, par unité de surface, dans le canal sous éclairage à l'état stationnaire est donnée par [8]:

$$\begin{aligned}
 \rho_{cop}(V_x) = & \frac{N_D}{2} \left[2a - \left(\frac{2\varepsilon}{qN_d} \right)^{1/2} \left\{ (V_{bi} - V_G + V_S - V_{op})^{1/2} \right. \right. \\
 & \left. \left. + (V_{bi} - V_G + V_X - V_{op})^{1/2} \right\} \right] \\
 & + \frac{P_{op}}{h\nu} \tau_L (1 - R_m)(1 - R_s)(1 - \exp(-\alpha a)) \\
 & - R\tau_L
 \end{aligned} \tag{II. 12}$$

Le courant de drain I_{DS} sous éclairement se déduit de l'intégrale de la densité des porteurs minoritaires (II.12) de 0 à V_{DS} comme suit :

$$I_{DS} = \frac{qZ\mu_n}{L_G} \int_0^{V_{DS}} \rho_{cop}(V_x) dV_x \quad (II.13)$$

Ainsi, en remplaçant ρ_{cop} par l'expression (II. 12) et en intégrant, le courant de drain en fonction de la tension de grille, V_{GS} , le photo-voltage, V_{OP} , le taux de recombinaison à la surface, R , la durée de vie des porteurs minoritaires, τ_L , et la densité d'éclairement sera décrit par la relation suivante:

$$\begin{aligned} I_{DS} = & \frac{qZ\mu_n N_D}{2L_G} \left[\left\{ 2a - \left(\frac{2\varepsilon}{qN_D} (V_{bi} - V_{GS} - V_{op}) \right)^{\frac{1}{2}} \right\} V_{DS} \right. \\ & - \frac{2}{3} \left\{ \left(\frac{2\varepsilon}{qN_D} \right)^{\frac{1}{2}} \left((V_{bi} - V_{GS} + V_{op} - V_{DS})^{\frac{3}{2}} \right. \right. \\ & \left. \left. - (V_{bi} - V_{GS} - V_{op})^{\frac{3}{2}} \right) \right\} \\ & + \frac{qZ\mu_n P_{op}}{h\nu L_G} (1 - R_m)(1 - R_s)(1 - \exp(-\alpha a))\tau_L V_{DS} \\ & \left. - \frac{qZR\mu_n\tau_L}{L_G} V_{DS} \right] \quad (II.14) \end{aligned}$$

La relation II.14 a été utilisée par les simulations présentées dans les paragraphes suivant

II. 4 EFFET DE LA DENSITÉ OPTIQUE SUR LA TENSION DE BLOCAGE

Lorsque la barrière Schottky du MESFET GaAs est illuminé par une source externe, certains paramètres fondamentaux tels que la transconductance et les capacités grille-source et grille-drain sont modifiés [20]. D'autres investigations montrent l'influence

d'une radiation optique de grille de MESFET sur ses paramètres internes comme le courant et la conductance du canal [2, 7]. Mais, malgré l'importance de la valeur de la tension de blocage V_{GSoff} dans la détermination des propriétés des circuits intégrés, il paraît qu'aucune étude ne s'est intéressée à l'effet de la densité de l'éclairement sur cette dernière.

III. 4. 1 Procédure et étapes de calcul

La procédure consiste tout d'abord à calculer la caractéristique $I_{DS} = f(V_{GS})$ à différentes densités optiques. Ainsi, il devient facile d'extraire la valeur de V_{GSoffA} correspondante à la tension V_{GS} appliquée pour laquelle le courant I_{DS} est nul. Pour se faire, nous avons utilisé les relations II.4 à II.14 et le logiciel MATLAB comme outil de développement. Ainsi, nous avons élaboré un programme qui permet le calcul et le tracé du courant de drain en fonction de V_{GS} non seulement à différentes densités optiques mais aussi en corrélation avec d'autres paramètres de structure ou géométriques. Pour plus de précision, une synthèse de notre démarche est illustrée par la Figure II.6.

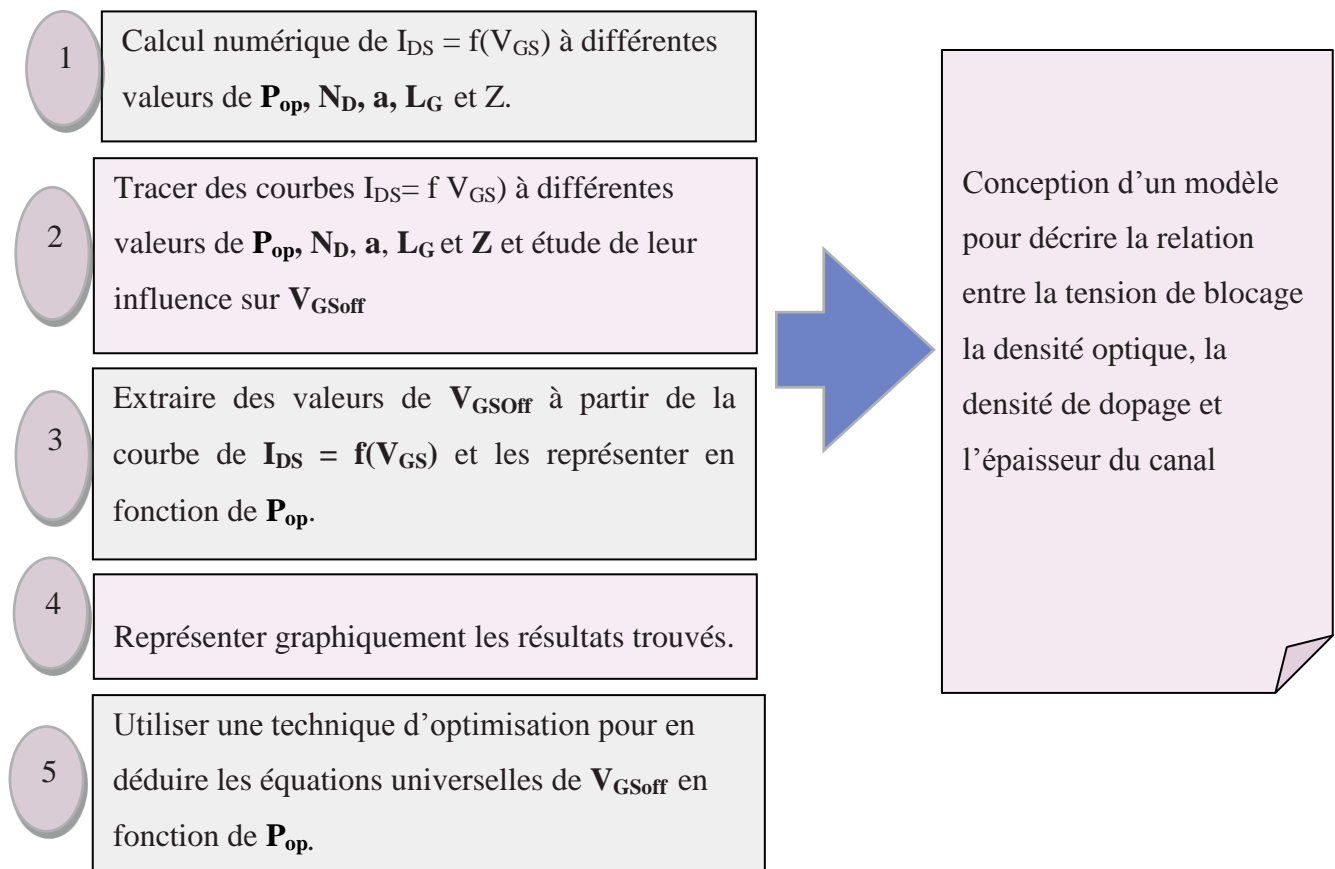


Figure II. 6 : Procédure de calcul.

Par ailleurs, les paramètres utilisés dans la simulation sont regroupés dans le tableau II.1.

Tableaux II. 1: Paramètres de calcul.

Paramètre	L_G (μm)	Z (μm)	V_{bi} (V)	μ_n ($\text{m}^2/\text{V.s}$)	K_n (m^3)	τ_n (s)	R_s (%)
Valeur	1	10	0,8	0,85	$3,1 \cdot 10^{-17}$	$1 \cdot 10^{-6}$	0.1
Paramètre	a (μm)	N_D (m^{-3})	n_i (m^{-3})	μ_p ($\text{m}^2/\text{V.s}$)	K_p (m^3)	τ_p (s)	R_m (%)
Valeur	0,2	$0,5 \cdot 10^{23}$	$1,79 \cdot 10^{12}$	0,04	$3,1 \cdot 10^{-15}$	$1 \cdot 10^{-8}$	0,1
Ref	[8]		[23]		[11]		[24]
Paramètre	N_T (m^{-2})	α (m^{-1})	λ (μm)	ϕ_{Bn} (eV)	η	ϵ (F/cm)	
Valeur	$4 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^6$	0,83	0,9	1,4	1,1	
Ref	[11]	[23]	[9]	[22]	[23]	[2]	

II. 4. 2 Simulations et allure des variations

En fonctionnement normal et dans le cas où le composant est éclairé, la tension de pincement classique se trouve modifiée. Par conséquent, la tension de pincement n'est pas seulement l'un des paramètres électriques de l'OPFET, mais aussi une grandeur importante pour l'optimisation des paramètres de fabrication tels que la profondeur du canal [25]. Ainsi, afin d'étudier l'évolution de la valeur apparente de cette tension du composant éclairé, définie comme étant la tension V_{GS} correspondante à un courant de sortie, I_{DS} , nul et notée V_{GSoffA} , nous procédons par simulation de la caractéristique de transfert $I_{DS} = f(V_{GS})$ à différentes densités optiques. Ainsi, en se basant sur les grandeurs regroupées dans le tableau II. 1 et les expressions (II.04 à II.14), nous étudions l'influence de l'éclairement sur V_{GSoff} en proposant une méthode qui permet de contrôler ce phénomène. L'organigramme de la figure II. 7 regroupe les étapes du calcul numérique de V_{GSoff} .

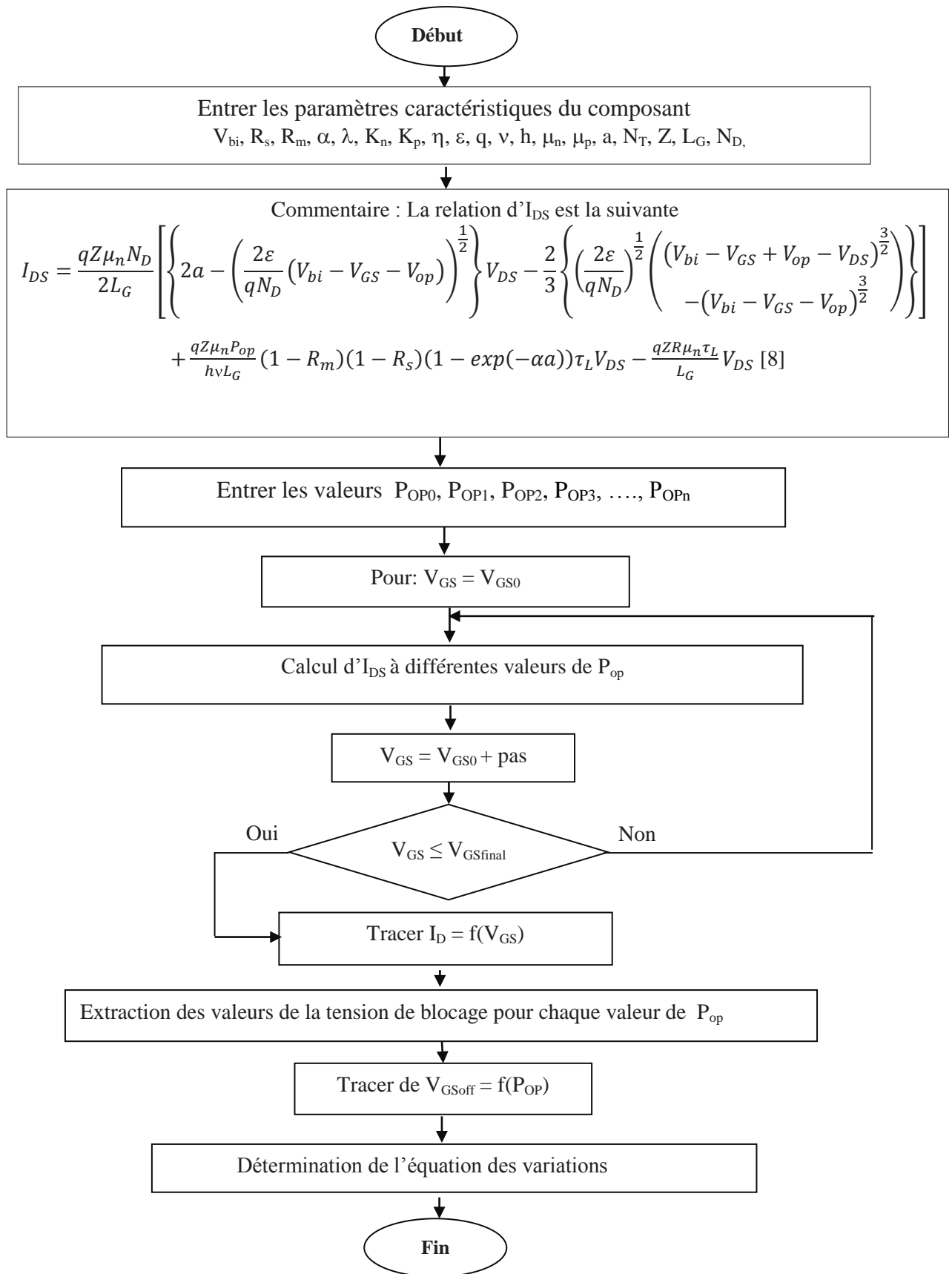


Figure II.7: Organigramme de simulation de V_{Gsoff} .

En premier lieu, les valeurs de la densité de dopage, de la longueur et la largeur de grille ainsi que de l'épaisseur du canal sont maintenues constantes. Nous faisons varier les valeurs de P_{op} et nous calculons le courant de drain en fonction de V_{GS} .

La figure II.8 représente la caractéristique $I_{DS} = f(V_{GS})$ à différentes P_{op} . Il est intéressant de remarquer que le V_{GSoff} dépend fortement de la valeur de la densité optique. A partir, de cette caractéristique, il été possible d'extraire les valeurs de V_{GSoff} correspondante à chaque P_{op} .

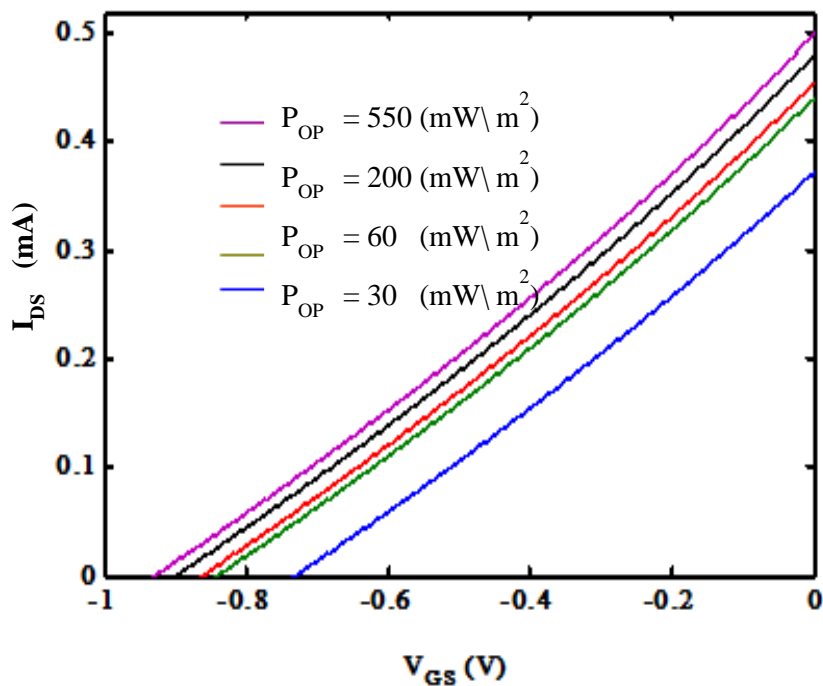


Figure II. 8: Variation de courant de drain en fonction de la tension négative de grille pour différentes valeur de P_{OP} .

À partir de la caractéristique $I_{DS} = f(V_{GS})$ établie pour différentes densités optiques, il devient possible d'extraire les valeurs de V_{GSoff} correspondantes à chaque P_{op} . La figure II.9 représente les résultats obtenus Il est intéressant de remarquer que V_{GSoff} dépend fortement de la valeur de la densité optique. Par ailleurs, la courbe peut être scindée en deux régions distinctes: (i) pour des densités optiques faibles ($P_{op} < 10 \text{ mW/m}^2$), on note une augmentation rapide et linéaire et (ii) la seconde région de saturation où V_{GSoff} varie très peu avec la densité optique.

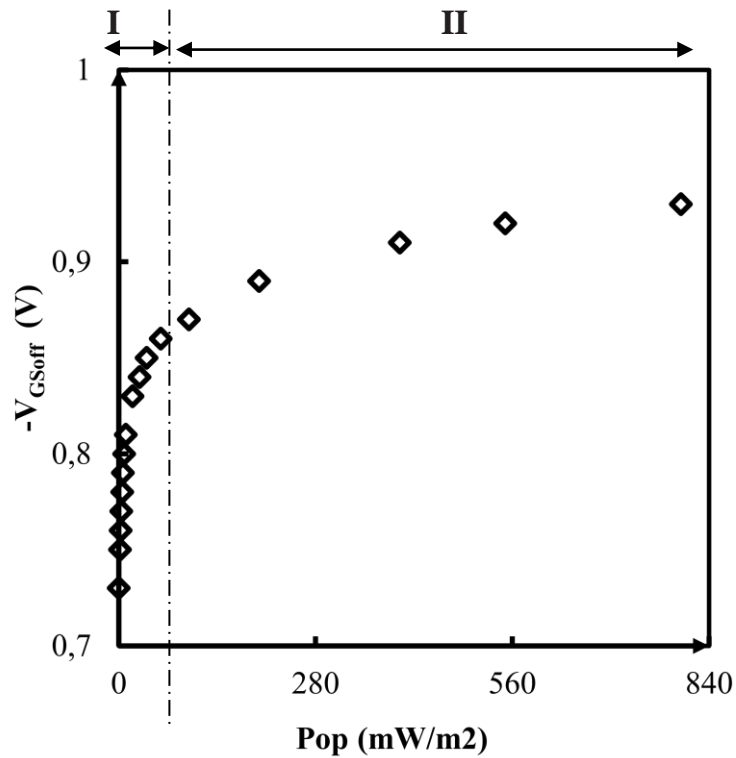


Figure II. 9 : Variation de la tension de blocage à différentes densités optiques.

II. 4. 3 Discussions et interprétations des résultats

La polarisation des électrodes conduit à l'apparition de Zone de Charge d'Espace (ZCE) aussi bien sous le contact de grille qu'à l'interface couche active/substrat qui conduisent, en fort voltage, à l'apparition du pincement entraînant le blocage du canal. L'application d'une tension positive sur l'électrode de drain par rapport à celle de la source entraîne une déplétion dissymétrique des zones de charges d'espace. L'étalement, w , des ZCE côté drain est supérieure à celui côté source. Quant à l'application d'un potentiel négatif entre l'électrode de la grille et celle de la source, il conduit à une augmentation de w , réduisant ainsi la région conductrice du canal et limite le passage du courant entre le drain et la source. Donc, la largeur de ZCE varie en fonction du potentiel appliqué sur V_{GS} . Lorsque le potentiel de la jonction devient supérieur ou égale à la tension de pincement, w atteint son maximum, le courant I_{DS} est presque nul et le MESFET est dit bloqué.

Il est bien établie qu'en fonctionnement normal, dans le cas où le composant est éclairé l'apparition de la tension photonique dans la région de déplétion, V_{op} , conduit à une réduction de la largeur de la zone de charge d'espace, w , et par conséquent l'épaisseur effective du canal se trouve modifiée. Les relations II.15, et II.16 [8] explicitent l'interdépendance entre w , H et V_{op} .

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_D} (V_{bi} + V_{DS} - V_{GS} - V_{op})} \quad (II.15)$$

$$H = a - w \quad (II.16)$$

Afin de mieux illustrer cette interdépendance, nous avons représenté sur le schéma II.10 l'influence de l'éclairage sur la largeur de la zone de charge d'espace, w , et en conséquence sur la profondeur H de la zone active. Il est clair que sous éclairage la compensation entre les valeurs de w et H est assuré à travers l'épaisseur du canal, a .

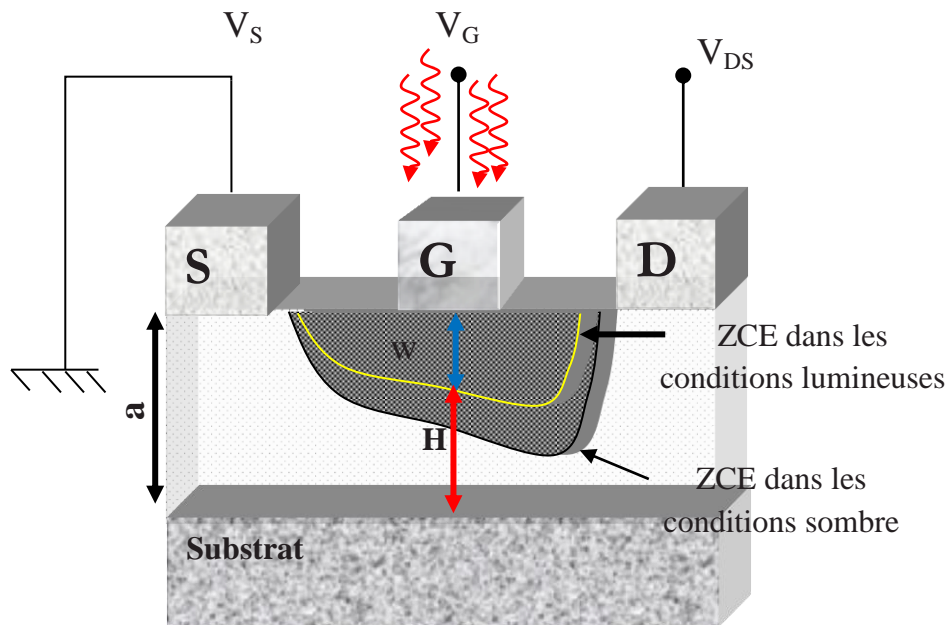


Figure II. 10 : Zone de charge d'espace dans les conditions sombre et lumineuse.

Par ailleurs, les figures II.11 et II.12 représentent respectivement les variations de la zone de charge d'espace et l'épaisseur effective du canal en fonction de la densité optique et en fonction de la tension-photonique. On constate que l'augmentation de la densité de puissance optique, P_{op} , et de la tension-photonique, V_{op} , conduit à une réduction de la largeur de la zone de charge d'espace et une augmentation de l'épaisseur du canal effective. Ceci peut être expliqué par le fait qu'une augmentation de la densité d'éclairage favorise la création de la tension photonique, V_{OP} . Or, comme expliqué précédemment, à une polarisation donnée (valeurs de V_{DS} et V_{GS} déterminées) une augmentation de V_{OP} induit une réduction de la largeur de la zone de charge d'espace et par conséquent une augmentation de l'épaisseur effective du canal, H , comme stipulé par la relation (II.16).

En effet, nous pouvons affirmer que l'augmentation de la tension de blocage induite par l'éclairage du composant peut être justifiée par la réduction de la zone de charges d'espace et en conséquence l'élargissement du canal conducteur.

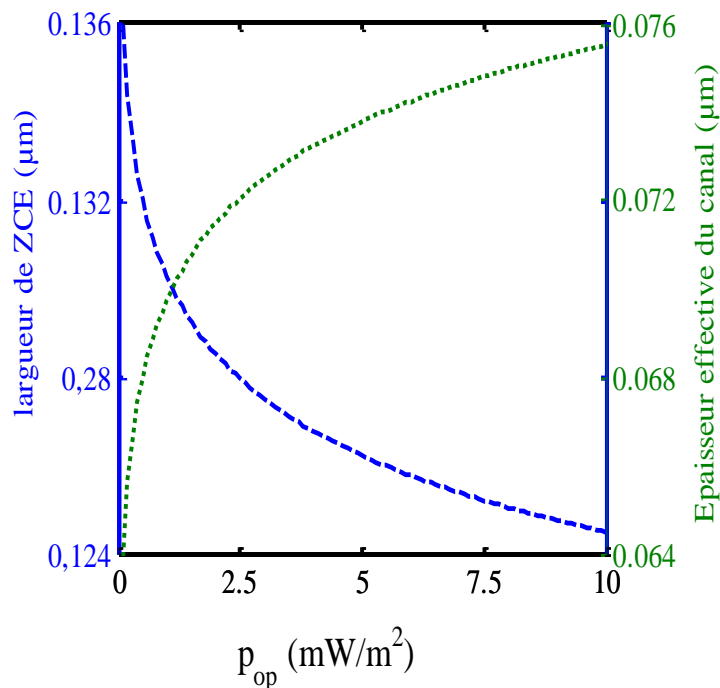


Figure II. 11 : Évolution de la largeur de la zone de charge d'espace, et l'épaisseur du canal effective en fonction de P_{OP} .

Il est clair que la diminution de la largeur de ZCE, w , suit une évolution non linéaire. De plus, pour $P_{op} = 0 \text{ mW/m}^2$, on relève $w = 0,136 \text{ }\mu\text{m}$. Alors que pour $P_{op} = 0,25 \text{ mW/m}^2$ la valeur de w devient $0,125 \text{ }\mu\text{m}$. Donc, w subit une réduction de l'ordre de $\approx 0,11 \text{ }\mu\text{m}$. Également, l'épaisseur effective du canal augmente de $0,064 \text{ }\mu\text{m}$ à $P_{op} = 0 \text{ mW/m}^2$ à une valeur de $H = 0,075 \text{ }\mu\text{m}$ pour $P_{op} = 0,25 \text{ mW/m}^2$, soit une augmentation de $0,11 \text{ }\mu\text{m}$. Ce résultat confirme la complémentarité des valeurs de w et H et donc très important quant à la validité du modèle proposé.

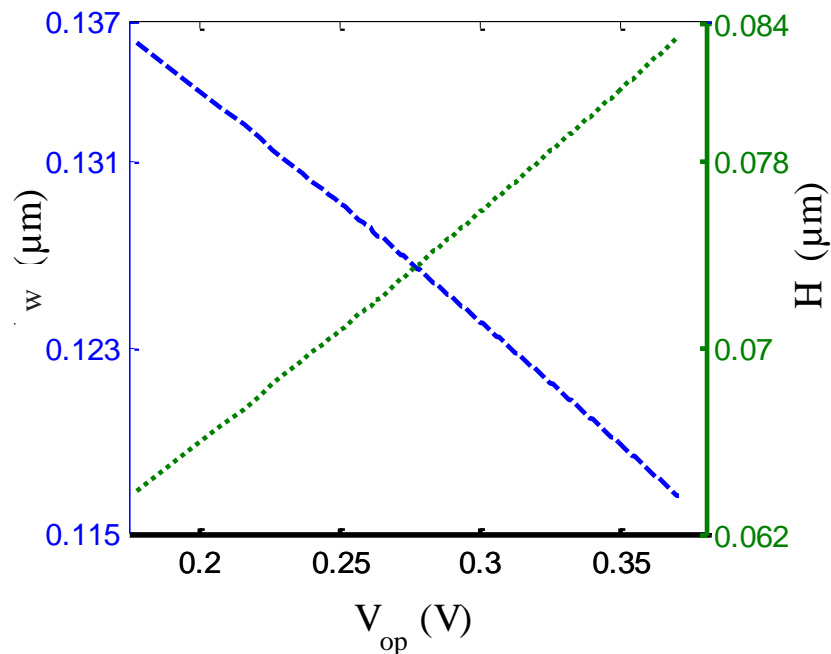


Figure II. 12 : Variation de la largeur de la zone de charge d'espace et l'épaisseur du canal effective en fonction de V_{OP} .

La tension de pincement résultante justifie la réduction de la zone des charges d'espace et l'augmentation de la profondeur du canal. Notons que la profondeur de la couche active et celle des couches dopées sont co-liés pour estimer la tension de pincement [10].

II. 5 EFFET DU DOPAGE DE LA COUCHE ACTIVE SUR LA TENSION DE BLOCAGE

En utilisant les équations II.1 à II.8, nous avons mis au point un logiciel de simulation permettant de calculer les caractéristiques I_{DS} en fonction de V_{GS} pour différentes densités optiques et plusieurs valeurs de dopage. Ce travail permet d'extraire des tensions de blocage pour chaque cas considéré et les représenter graphiquement.

La figure II.13 représente les variations de V_{GSoff} en fonction de P_{op} pour une série de valeurs de N_D . On constate que la tension V_{GSoff} augmente en valeur absolue avec l'augmentation du dopage et de la densité de puissance optique.

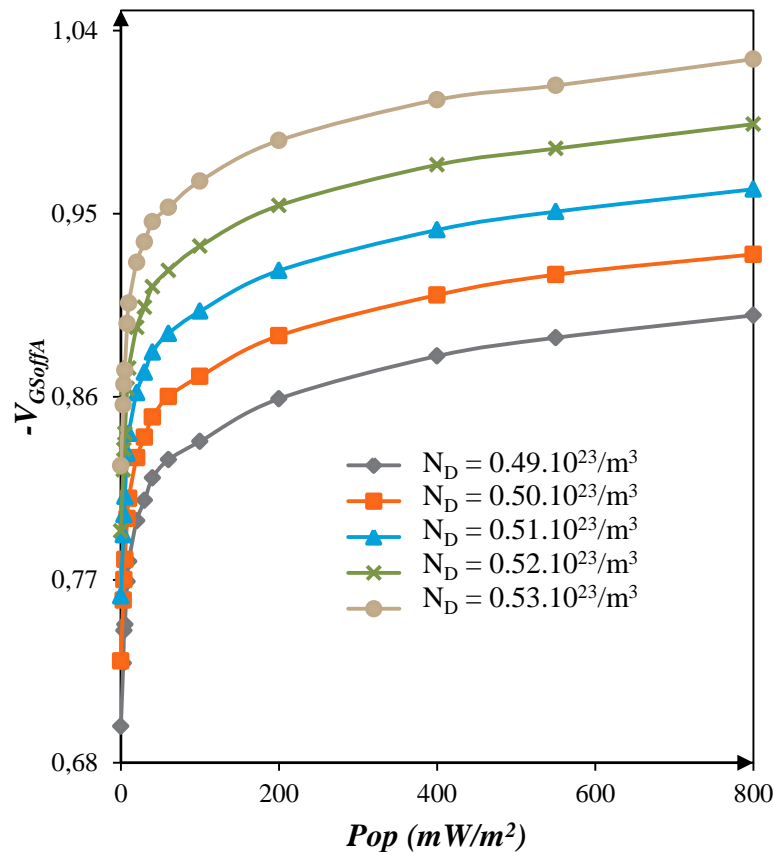


Figure II. 13 : Variation de V_{GSoff} en fonction de la densité de puissance optique à différentes valeurs de densité de dopage.

À titre d'exemple, en considérant les deux valeurs limites (minimale et maximale) de N_D respectivement égale à $0,49.10^{23} /m^3$ et $0,53.10^{23} /m^3$; la valeur de V_{GSoff} dans l'obscurité passe de $-0,68$ V à $-0,826$ V. Alors qu'à $P_{op} = 800$ mW/m²; la valeur de V_{GSoff} augmente de $-0,9$ V à $-1,026$ V. Les résultats obtenus sont très cohérents avec la littérature. Ce résultat est théoriquement lié au fort dopage (relation II.13).

II. 6 EFFET DE L'ÉPAISSEUR DU CANAL SUR LA TENSION DE BOCAGE

L'extraction de la tension de V_{GSoff} à différentes densités optiques et densités de dopage est obtenue grâce aux courbes de I_{DS} en fonction de V_{GS} à différents P_{op} pour une série de densités de l'épaisseur du canal.

On constate clairement sur la figure II.14 que la tension de blocage augmente en valeur absolue de façon exponentielle avec la densité optique incidente. De même, lorsqu'on fixe l'épaisseur du canal, la tension de blocage augmente au fur et à mesure en valeur absolue que l'épaisseur du canal augmente. Ce qui montre l'effet significatif de l'épaisseur du canal sur V_{GSoff} . Pour une valeur fixe minimale, $a = 0,19$ μm; les valeurs de V_{GSoffA} changent de $V_{GSoffA} = -0,57$ V ($P_{op} = 0$) à $V_{GSoffA} = -0,779$ V ($P_{op} = 800$ mW/m²). Alors que pour la valeur maximale, $a = 0,22$ μm, V_{GSoffA} est égale à $-1,048$ V et $-1,241$ V respectivement pour P_{op} égal 0 et 800 mW/m². Notons que les résultats obtenus sont en bon accord avec la définition de la tension de pincement.

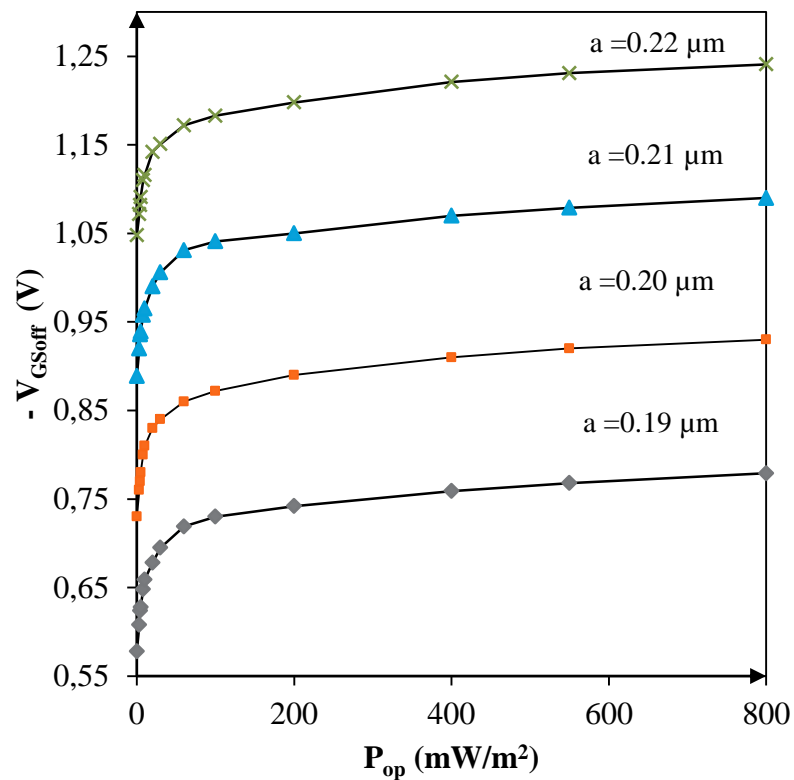


Figure II. 14: Variation de V_{GSoffA} en fonction de P_{OP} pour différentes épaisseurs du canal.

Quant à l'effet de la largeur et de la longueur de grille, on observe que l'augmentation de ces deux grandeurs ne donne pas un changement remarquable de V_{GSoff} . Ces résultats obtenus est en bon accord avec le référence [19] et aussi avec la définition de la tension de pincement.

II. 7 QUANTIFICATION DE LA TENSION DE BLOCAGE

La figure II.15 représente la progression linéaire de V_{GSoffA} la région (I). En utilisant une méthode d'optimisation, il devient possible de quantifier la relation de V_{GSoffA} en relation avec P_{op} .

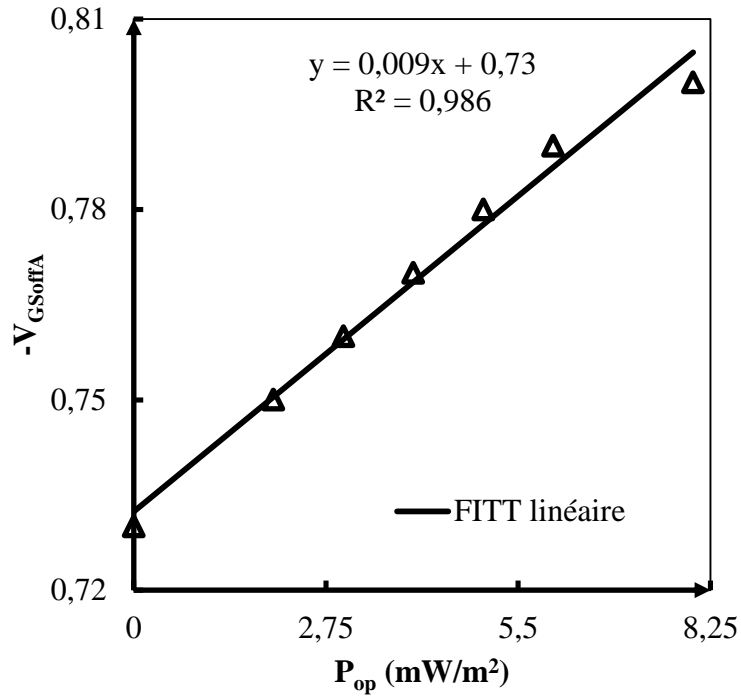


Figure II. 15: Progression linéaire de V_{GSoffA} en fonction de P_{OP} .

Par utilisation d'une technique d'optimisation, la région linéaire de la figure II.9. Peut-être approchée par l'équation suivante:

$$V_{GSoffA} = - 9.10^{-3} (P_{op}) - 0.73 \quad (II.17)$$

Notons qu'en absence d'éclairage et dans le cas d'un dopage uniforme, N_D , la relation de la tension de V_{GSoff} est la suivante [1 - 3]:

$$V_{GSoff} = V_{bi} - V_p \quad (II.18)$$

Où V_p est la tension de pincement donné par la relation (II.2) et V_{bi} est le potentiel interne. En considérant, les données de cette étude, il est facile de déterminer:

$$V_p = \frac{qN_D a^2}{2\epsilon} = 1.53$$

$$V_{GSoff} = V_{bi} - V_p = 0.8 - 1.53 = - 0.73V$$

Donc la relation de la tension de blocage sous l'éclairement V_{GSoffA} en fonction de V_{GSoff} donné par la relation II.19.

$$V_{GSoffA} = V_{GSoff} - 9.10^{-3} P_{op} \quad (II.19)$$

Si $P_{op} = 0$ alors $V_{GSoffA} = V_{GSoff}$

Ainsi, la relation II.19 peut se mettre sous la forme :

$$\frac{V_{GSoffA}}{V_{GSoff}} = 1 + \frac{9.10^{-3}}{V_{GSoff}} (P_{op}) \quad (II.20)$$

La relation II.20 établie pour la première fois et publiée [26] est d'une importance capitale dans la prédiction de la tension apparente de blocage d'un MESFET éclairé.

La figure II.16 représente les variations relatives de la tension de blocage apparente en fonction de la densité optique. Il est clair, dans les conditions sans éclairage ($P_{op} = 0$), la valeur de V_{GSoffA} normalisée est égale à 1. De ce fait, $V_{GSoffA} = V_{GSoff}$. Cependant, lorsque la densité optique croît le rapport V_{GSoffA} / V_{GSoff} augmente et V_{GSoffA} devient plus grand que V_{GSoff} .

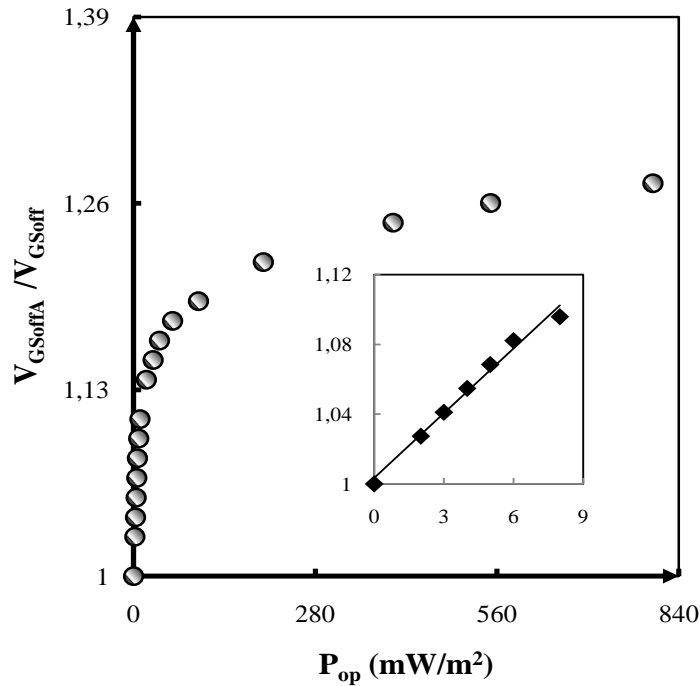


Figure II. 16: Tension V_{GSoffA}/V_{GSoff} à différentes densités optiques.

Par ailleurs, à $V_{GS} = 0$ V, le courant atteint sa valeur maximale. Cependant, l'augmentation de la valeur absolue de V_{GS} conduit à une diminution du courant I_{DS} pour devenir nul lorsque V_{GS} devient égale à V_{GSoff} ; on dit que le transistor est bloqué. En conséquence, lorsque la tension appliquée à la grille, V_{GS} , devient égale à la tension de pincement, V_{GSoff} , du MESFET le canal se pince et le MESFET est en état de blocage. Cependant, l'apparition de la tension photonique positive, suite à l'illumination, au niveau du contact Schottky de grille réduit les largeurs des zones dépeuplées et le MESFET reprend de nouveau la conduction [5]. La figure II.17 résume le processus de l'effet de l'éclairement sur la tension de pincement.

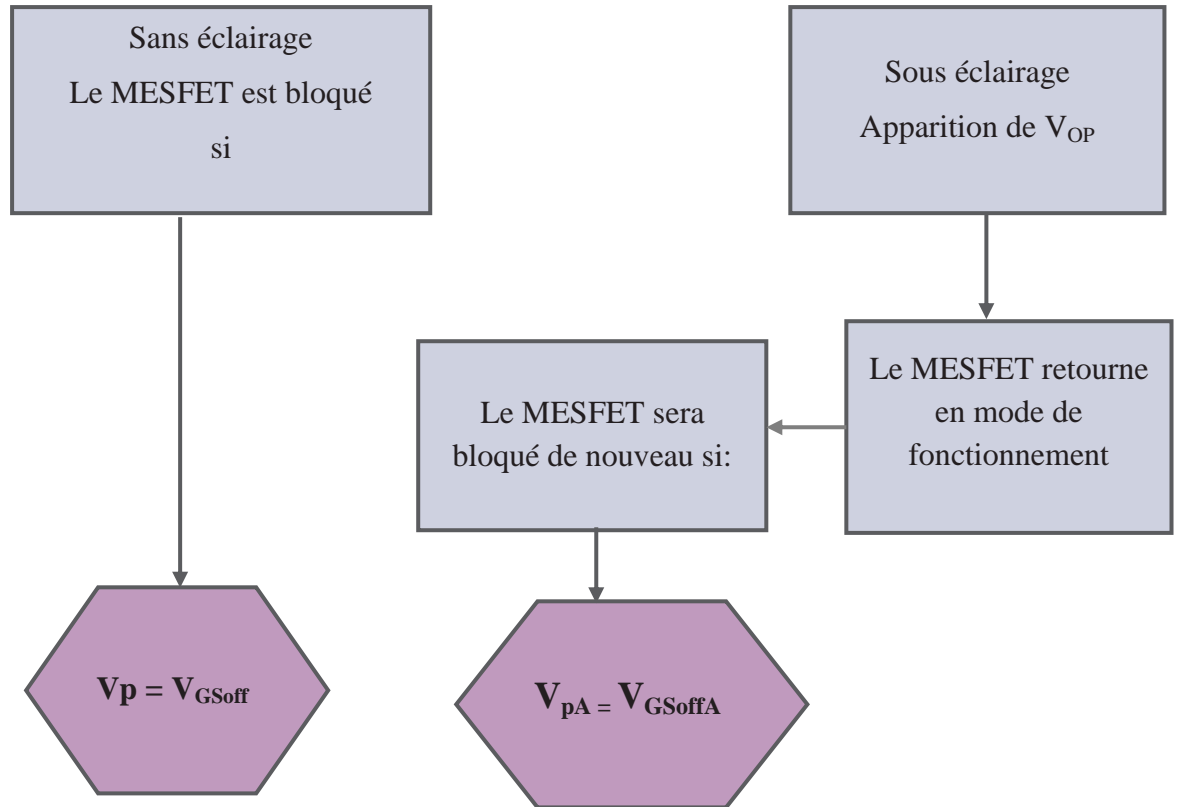


Figure II. 17: Schéma représentatif l'effet de l'éclairage sur la tension de pincement d'un MESFET.

II. 8 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons mené une étude détaillée de la tension de blocage d'un MESFET éclairé. Pour se faire, nous avons opté pour une méthode graphique basée principalement sur l'intersection de la caractéristique de transfert d'un MESFET. La procédure consiste à calculer la caractéristique $I_{DS} = f(V_{GS})$ à différentes densité optiques afin de déterminer la tension de blocage correspondante à un courant I_{DS} nul.

Nous avons utilisé le logiciel MATLAB comme outil de développement et nous avons élaboré un programme qui permet le calcul et le tracé du courant de drain en fonction de V_{GS} non seulement à différentes densités optiques mais aussi en corrélation avec d'autres

paramètres de structure ou géométriques tels que l'épaisseur du canal, la densité de dopage de la couche active, etc.

Tout d'abord, il a été constaté que l'illumination d'un MESFET conduit à l'apparition d'une tension photonique positive qui se soustrait de la tension de blocage correspondante aux conditions sombres et tourne le MESFET de nouveau passant. Donc, pour atteindre le blocage d'un OPFET, il est nécessaire d'appliquer une tension supérieure à la tension de blocage des conditions normales: il s'agit de la tension de blocage apparente. En conséquence, le blocage d'un OPFET nécessite l'application d'un potentiel supérieur à la tension de seuil d'un MESFET. Notons qu'il est important de choisir le potentiel convenable au blocage pour ne pas endommager le composant (claquage).

Par ailleurs, à comparer au MESFET classique, la tension nécessaire pour bloquer un OPFET augmente en valeur absolue avec l'augmentation de :

- i)* la densité d'éclairage,
- ii)* la densité de dopage
- iii)* l'épaisseur du canal.

En conséquence, nous pouvons affirmer que l'augmentation de la tension de blocage induite par l'éclairage du composant et justifiée par la réduction des zones de charges d'espace et l'élargissement du canal conducteur améliore les performances du MESFET en termes de conduction.

Enfin, la relation relative à l'évolution de la tension de blocage du MESFET en fonction de l'éclairage, établie pour la première fois, est une équation universelle très importante dans la prédiction de la tension apparente de blocage d'un MESFET éclairé.

Chapitre. III

Étude De La Conductance Statique D'un OPFET

III. 1 INTRODUCTION

L'optoélectronique est l'un des domaines les plus ciblés dans les activités de recherche récentes. Par ailleurs, l'un des composants clés de l'optoélectronique est le photo-détecteur qui peut être utilisé dans différents domaines: communication haut débit, informatique optique, transformateur optique, contrôle optique, etc [1].

Notons que la conductance de sortie d'un MESFET définit sa performance micro-ondes dans les amplificateurs de puissance et dans de nombreux systèmes à large bande tels que des mélangeurs (mixers), convertisseurs A/D et oscillateurs locaux, comportant des petits signaux aux grands signaux de fonctionnement [4]. Ainsi, de nombreux travaux se sont intéressés à l'étude et la détermination de la conductance de sortie d'un MESFET [2 - 3]. Cependant, la dispersion fréquentielle de la conductance de sortie constitue un problème sérieux dans la conception des circuits analogiques tels que les amplificateurs de puissance ainsi que certains circuits analogiques et numériques [5] sans oublier les circuits intégrés (Integrated Circuit; ICs) et les circuits monolithiques intégrés (Monolithic Microwave Integrated Circuit; MMIC) [8, 9].

Ainsi, l'étude de l'influence de la dispersion fréquentielle ainsi que l'effet de la température sur la conductance de sortie, dans le cas d'un MESFET non éclairé, a fait l'objet de plusieurs travaux [6 - 7]. Néanmoins, dans le cas d'un OPFET, les travaux publiés à ce jour, restent incomplets ou nécessitent encore plus d'investigations.

C'est dans ce contexte, que nous avons réservé ce chapitre à l'influence de la densité de l'éclairage sur certains paramètres caractéristiques d'un OPFET afin de répondre à quatre interrogations majeures:

- Comment la densité optique influence-t-elle la conductance de sortie, G_D , d'un OPFET?
- Comment la polarisation et la densité optique influencent-elles la conductance de sortie d'un OPFET?
- Comment les paramètres de structure et la densité optique influencent-elles la conductance de sortie d'un OPFET?

- Comment les Paramètres caractéristiques du canal influencent-elles G_D d'un OPFET?

Pour répondre à ces questions, nous décrivons les résultats des simulations numériques de G_D d'un OPFET, selon le modèle [10] présenté au chapitre II. Les simulations sont faites par le logiciel MATLAB. Nous étudions l'évolution de la Conductance de sortie en fonction de différents paramètres : la tension du drain, V_{DS} et celle de grille, V_{GS} , les caractéristiques technologiques et celles de structure du transistor.

III. 2 FORMALISME MATHÉMATIQUE DE LA CONDUCTANCE DE SORTIE DU CANAL

La conductance, G_D , traduit la variation du courant de drain-source, I_{DS} , en fonction de la tension drain-source, V_{DS} , à polarisation constante grille-source, V_{GS} . Il est bien établi que la Conductance de sortie d'un MESFET peut être obtenue en utilisant la relation suivante:

$$G_D = \left(\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} \right)_{V_{GS}=cte} \quad (\text{III. 01})$$

Le model que nous avons utilisé [10] décrit l'expression du courant d'un MESFET en fonction de la tension photo induit à travers la barrière Schottky, la durée de vie des porteurs minoritaires après éclairage, le taux de recombinaison et le taux de photo génération.

Les équations décrivant V_{op} , G_{op} , τ_1 , R , n_s et p_s sont données au chapitre II (II. 2 à II. 7) ainsi que la relation de I_{DS} (II. 10) Leur utilisation permet de dériver l'expression de la conductance de sortie en fonction des paramètres géométriques du composant et des paramètres caractéristiques du canal à savoir : le dopage, N_D , et la densité surfacique des pièges N_T . Notons que l'expression (III. 2) de la conductance de sortie, G_D , obtenue tient compte non seulement de l'effet photovoltaïque à travers la tension optique développée au

niveau de la jonction Schottky mais aussi de la polarisation du composant et de la durée de vie des porteur minoritaires après éclairage.

$$G_D = \frac{qZ\mu_n N_D}{2L_g} \left[\left\{ 2a - \left(\frac{2\varepsilon}{qN_D} (V_{bi} - V_{GS} - V_{OP}) \right)^{\frac{1}{2}} \right\} - \left\{ \left(\frac{2\varepsilon}{qN_D} \right)^{\frac{1}{2}} (V_{bi} - V_{GS} - V_{OP} + V_{DS})^{\frac{1}{2}} \right\} \right] + \frac{qZ\mu_n P_{OP}}{L_g} (1 - R_m)(1 - R_s)(1 - \exp(-\alpha a) \tau_L) - \frac{qZR\mu_n \tau_l}{L_G} V_{DS} \quad (III. 02)$$

La dérivé de la relation de I_{DS} chap. II. 10 nous donne l'équation III. 2 de la conductance de sortie G_D en régime linéaire. Notons qu'en régime de saturation la conductance de sortie et présent nulle parce que le courant de saturation ne dépend pas de la tension drain-source.

III. 2 .1 Méthodologie et calculs

En se basant sur les relations de (II. 2) à (II. 10) du chapitre II et en utilisant MATLAB comme outil de développement, nous avons élaboré un programme qui permet dériver la relation (II. 10) du chapitre II par rapport à V_{DS} en l'utilisation des commandes du MATLAB afin de simuler le G_D statique. La méthodologie consiste également à étudier via ce programme. La conductance de sortie et en prend en considération les influence, suivent:

- (i) la polarisation (I_{DS} , V_{GS}) et l'influence de l'illumination (P_{op}) sur les caractéristiques de G_D .
- (ii) les paramètres géométriques et caractéristiques (L , a , Z , N_D & N_T) sur les caractéristiques G_D du MESFET à différents densité optiques.

Enfin, les résultats trouvés sont illustrés par des courbes, interprétés et comparés à la littérature.

III. 2. 2 Caractéristiques du composant et conditions de simulation

Dans le but de la détermination de la conductance de sortie, nous avons décomposé l'étude en 2 parties. La première s'intéresse aux variations de la conductance de sortie en relation avec la polarisation ainsi que les propriétés physique et géométriques du composant sous éclairage. La deuxième traite la conductance de sortie en relation avec la profondeur du composant Z . Dans cette partie, l'étude a été faite à différentes densités optiques et différentes conditions de polarisation. Les étapes suivies sont résumées dans la figure III.1.

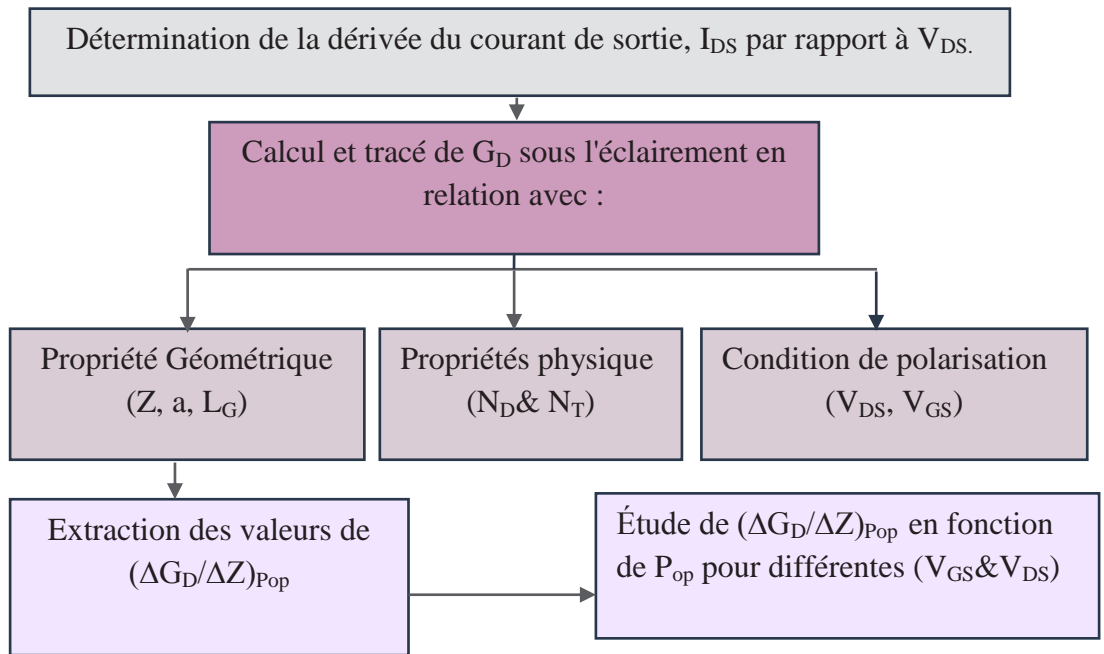


Figure III. 1: Étapes de simulation de la conductance de sortie.

Le Tableau III. 1 regroupe les paramètres caractéristiques physiques et géométriques du composant. Afin de faciliter la comparaison de nos résultats avec la littérature, notre choix s'est porté sur les paramètres initiaux utilisés par le modèle [10] et les caractéristiques de GaAs de la référence [11].

Tableau III. 1: Paramètres physiques et géométriques du MESFET.

Paramètres	L_G (μm)	Z (μm)	a (μm)	N_D ($/\text{m}^3$)	N_T ($/\text{m}^2$)	V_{bi} (V)	α (m^{-1})	λ (μm)	R_s (%)	R_m (%)
Valeurs	1	10	0,2	$0,5 \cdot 10^{23}$	$4 \cdot 10^{17}$	0,8	$1 \cdot 10^6$	0,83	0,1	0,1
Ref	[10]								[11]	

L'organigramme général des simulations de G_D à différents paramètres : polarisation (I), géométrique et physique III est représentée sur la figure III. 2.

III. 3 EFFET DE LA POLARISATION ET DE LA DENSITÉ OPTIQUE SUR G_D

L'influence des tensions de polarisation sur la conductance de sortie est étudiée via une simulation théorique et en tenant compte des différents paramètres intervenants. Nous avons élaboré un programme permettant d'avoir les résultats sous forme numérique ou graphique.

Pour la simulation nous définissons un MESFET GaAs de référence avec un ensemble de paramètres fixés. Les paramètres physiques et géométriques sont choisis en ce basant sur les références trouvez dans la littérature.

Puis nous varions les paramètres de polarisation et la densité d'éclairement afin d'analyser leur influence sur la conductance de sortie de MESFET Ainsi, plusieurs paramètres sont retenus :

- la longueur de grille et la largeur de grille
- l'épaisseur du canal, la densité de dopage et la densité des pièges.

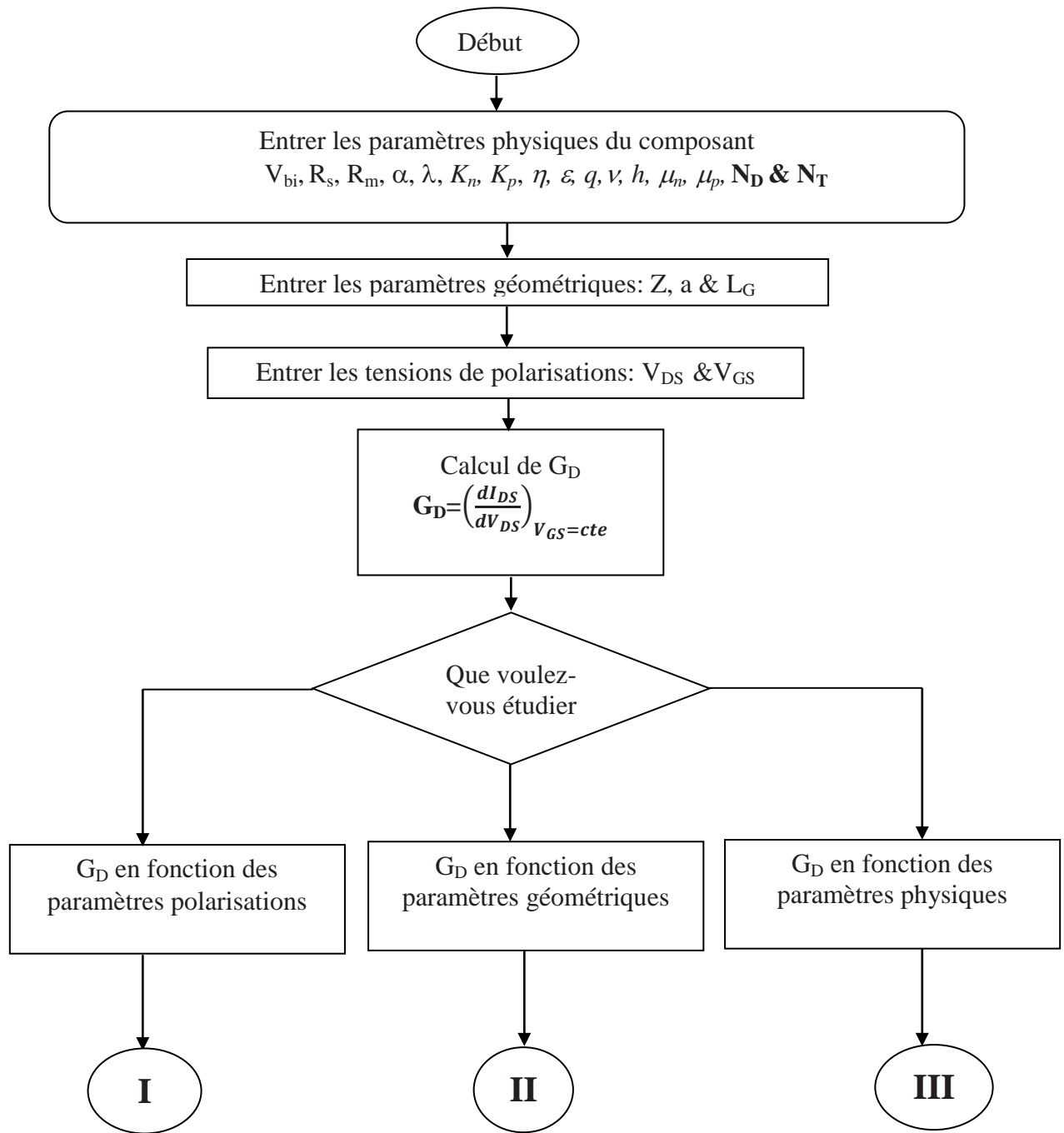


Figure III. 2: Organigramme général des simulations de G_D à différents paramètres ; I, II et III sont les sous - programmes des investigations présentés dans les paragraphes correspondants.

La simulation numérique par MATLAB est basée sur la résolution numérique des équations qui sont respectivement l'équation de : la tension photonique et la recombinaison à la surface n_s , P_s , J_s et G_{op} . L'organigramme des calculs est schématisé par la figure III.3.

Ce dernier résume les étapes principales ainsi que celles intermédiaires nécessaires pour mener à bien cette investigation.

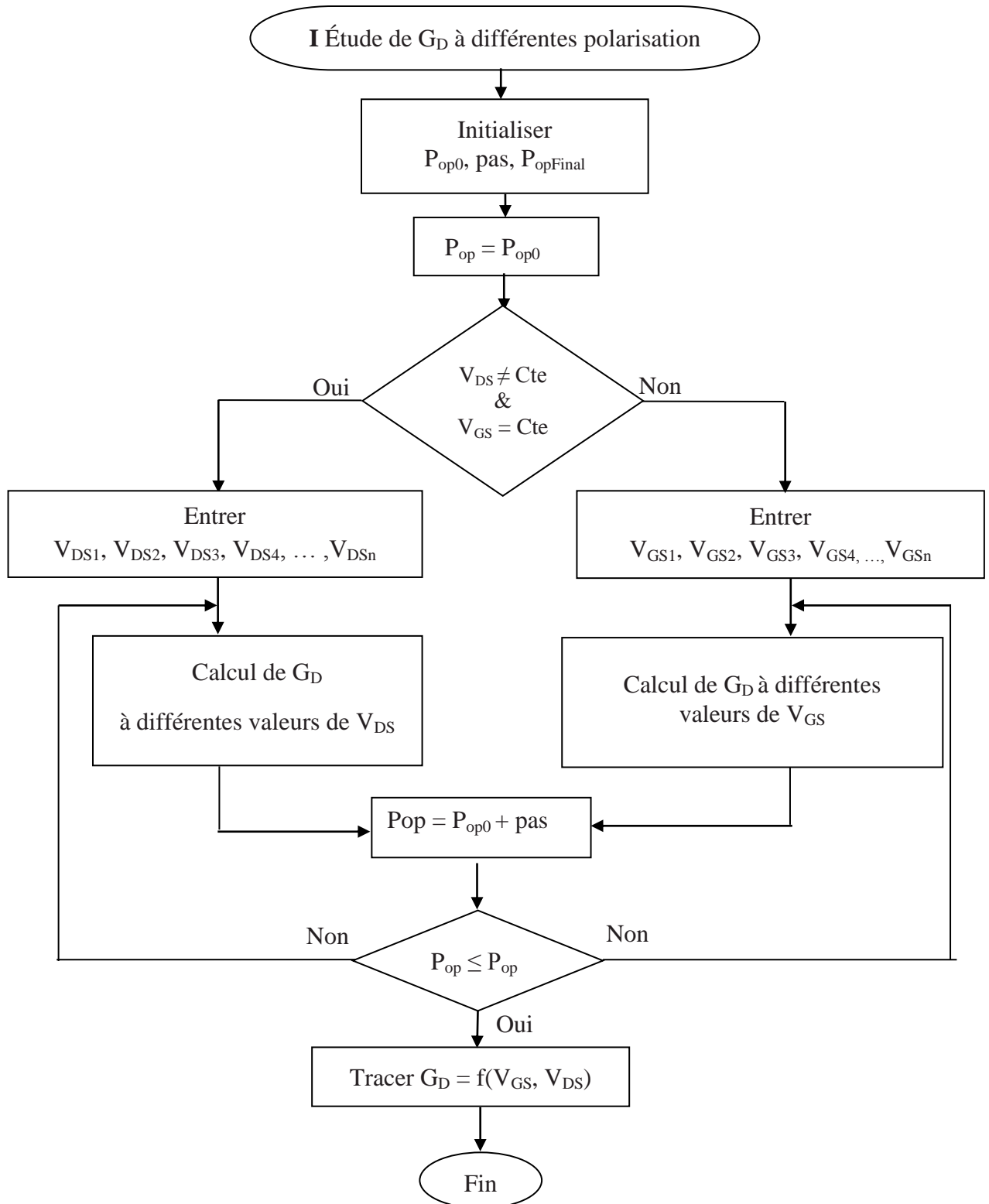


Figure III. 3: Organigramme du sous-programme de calcul de G_D en fonction de la densité optique et des tensions de polarisation.

III. 3. 1 Effet de la tension grille-source

La figure III. 4 représente l'évolution de la Conductance de sortie en fonction de la densité optique pour différentes polarisations négatives de V_{GS} (de 0 à - 300 mV). Notons que l'étude a été faite en statique et en régime ohmique. Il est clair que quelle que soit la polarisation, la Conductance de sortie augmente pour les faibles valeurs de la densité optique ($P_{op} < 30 \text{ mW/m}^2$) puis subit une saturation. Par ailleurs, pour $P_{op} < 10 \text{ mW/m}^2$, cette augmentation est linéaire.

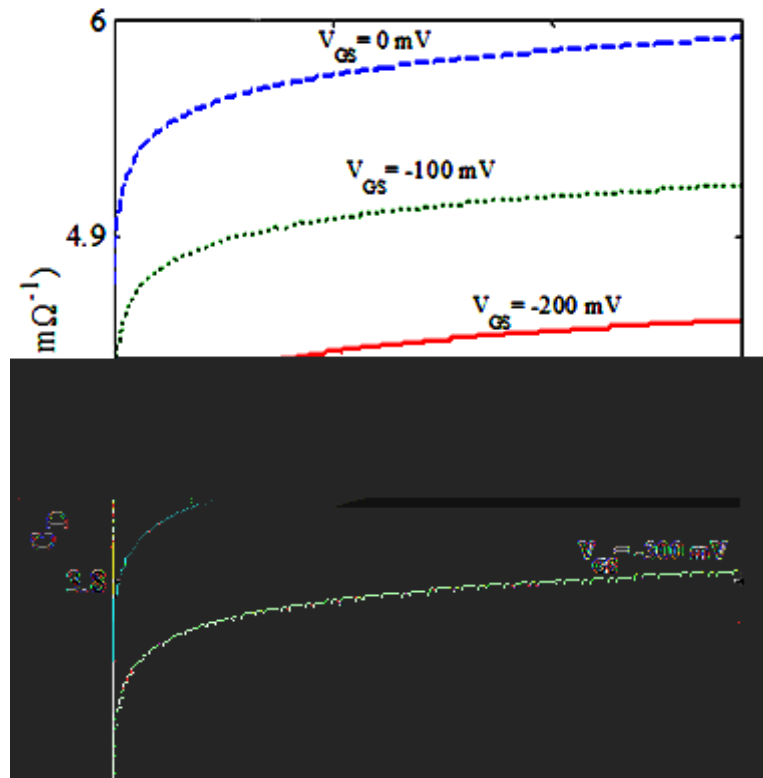


Figure III. 4: Évolution de la conductance de sortie en fonction de la densité optique pour différentes polarisations V_{GS} à $I_{DS} = 0,1 \text{ mV}$.

De plus, on constate que la valeur maximale de la Conductance de sortie ($G_D = 5,8 \text{ m}\Omega^{-1}$ à $P_{op} = 100 \text{ mW/m}^2$) est obtenue à V_{GS} nulle. Cependant, plus V_{GS} augmente en valeur absolue, plus la conductance décroît ($G_D = 3,7 \text{ m}\Omega^{-1}$ à $V_{GS} = - 300 \text{ mV}$ et $P_{op} = 100 \text{ mW/m}^2$).

III. 3. 2 Effet de la tension drain-source

La figure III. 5 représente l'évolution de la Conductance de sortie en fonction de la densité optique pour différentes polarisations positives de V_{DS} (de 100 à 400 mV). Il est clair que quelle que soit la polarisation, la Conductance de sortie augmente avec l'augmentation de la densité optique P_{op} . On constate que la valeur maximale de la Conductance de sortie ($G_D = 5,8 \text{ m}\Omega$ à $P_{op} = 100 \text{ mW/m}^2$) est obtenue à $V_{DS} = 100 \text{ mV}$. G_D décroît lorsque la tension V_{DS} appliquée augmente, à $V_{DS} = 100 \text{ mV}$, $G_D = 5,8 \text{ m}\Omega^{-1}$ et à $V_{DS} = 400 \text{ mV}$, $G_D = 4,8 \text{ m}\Omega^{-1}$.

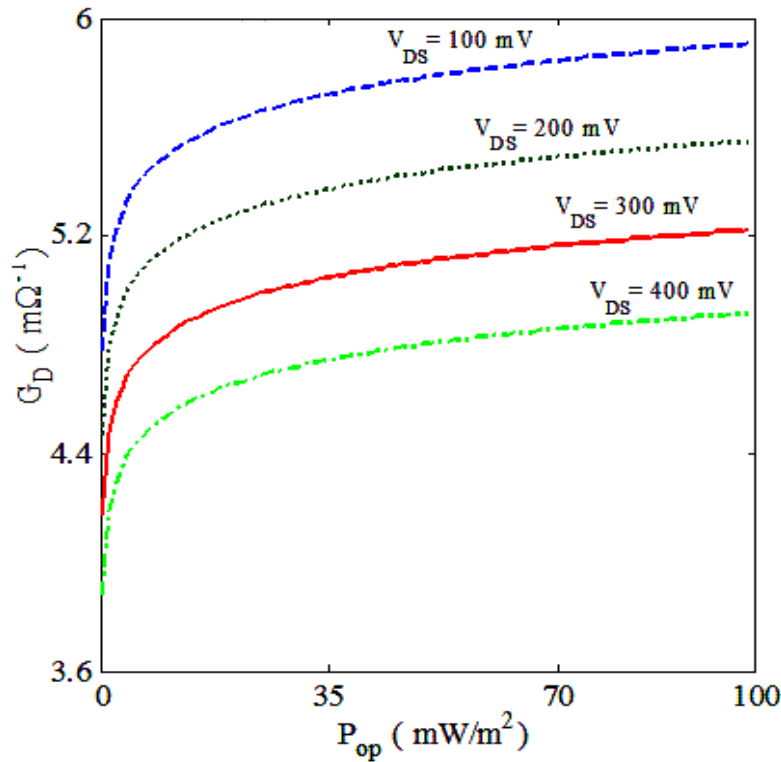


Figure III. 5: Évolution de la conductance de sortie en fonction de la densité optique à différentes V_{DS} et $V_{GS} = 0V$.

III. 3. 3 Analyse des résultats

Le courant qui circule entre le drain et la source ne peut traverser que la région de la zone active non dépeuplée dite canal conducteur. Il paraît que l'application d'une densité optique fait diminuer la profondeur de la zone désertée et par conséquent fait augmenter le courant drain-source modulant ainsi le courant drain, I_{DS} , par la tension optique. Ceci peut

être à l'origine des variations de G_D en fonction des tensions appliquées, V_{DS} et V_{GS} , en relation avec la densité optique.

De plus, les trous et les électrons générés dans le canal contribuent au courant photoconducteur dans la région active. On assiste à l'apparition d'un photo-courant et d'une tension optique développée à travers la jonction Schottky. Aussi, la tension photonique développée à travers la zone de charge d'espace augmente avec l'augmentation de la densité d'éclairement. Ce résultat est prouvé expérimentalement par De salles [21].

En effet, la tension photonique réduit la largeur de la zone de charge d'espace et en conséquence fait croître le courant I_{DS} . Ainsi, sous l'effet de l'éclairement, l'effet photovoltaïque et l'effet photoconducteur augmentent alors que la résistance de sortie diminue. En conséquence, il en résulte une augmentation du courant qui traverse le canal conducteur et par suite une croissance de G_D en fonction de l'augmentation de l'éclairement. De ce fait, on relève deux comportements opposés quant à la largeur du canal: l'effet de la polarisation et celui de l'éclairement qui conduisent à la saturation à forte densité optique.

III. 3. 4 Validation des résultats

Il est toujours important de confronter les résultats obtenus à ceux publiés dans la littérature. Ainsi, la comparaison de nos résultats à ceux obtenus par Shabiha et all [13] a mis en évidence un bon accord. Il est évident que nous avons considérés les mêmes caractéristiques géométriques du composant que celles utilisées par Shabiha et all [13], à savoir: $L_G = 1 \mu\text{m}$; $a = 0,25 \mu\text{m}$ et $Z = 100 \mu\text{m}$. Par ailleurs, pour une meilleure appréciation, nous avons opté pour une représentation graphique, sous forme de courbes. Les figures III. 6 et III. 7; présentent respectivement les résultats des simulations de la caractéristique $G_D(P_{op})$ calculés en régime linéaire, c'est à dire à faible tension de polarisation de drain ainsi que ceux de la référence [13]. Un très bon accord est obtenu, validant ainsi notre démarche comme illustré sur la figure III. 6 qui présente la conductance de sortie en fonction de P_{op} à différentes valeurs de V_{GS} .

Le symbole ($\square \square \square$) représente les valeurs de G_D calculées respectivement à $V_{GS} = 0 \text{ V}$ et $V_{GS} = -0,1 \text{ mV}$ et $P_{op} = 234 \text{ mW/m}^2$ [13].

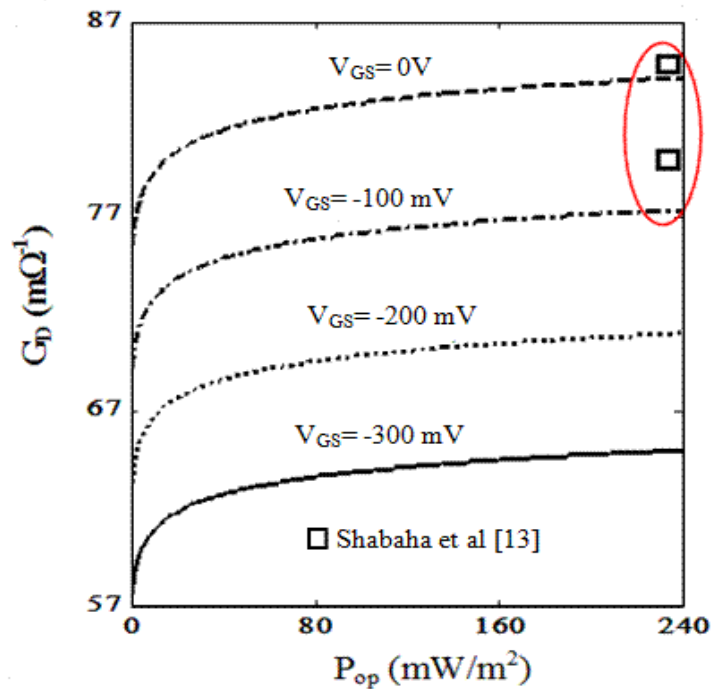


Figure III. 6 : $G_D = f(P_{op})$ à différentes V_{GS} .

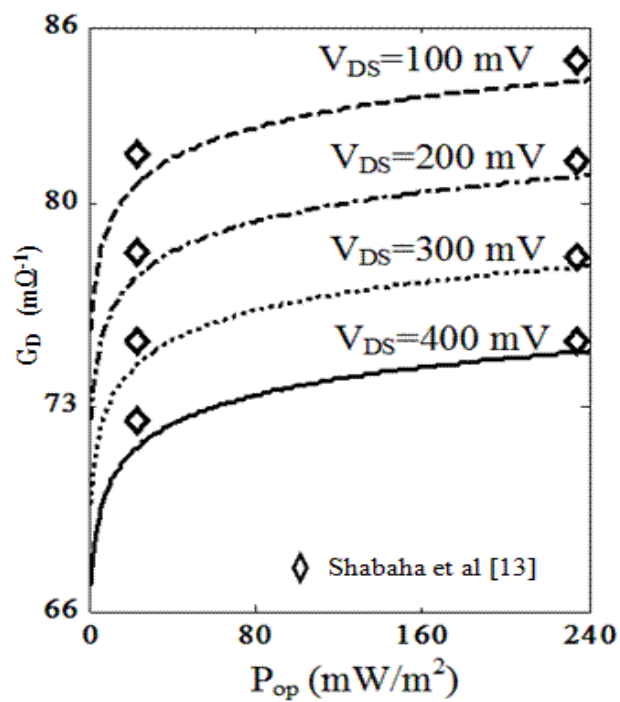


Figure III. 7 : $G_D = f(P_{op})$ à différentes V_{DS}

Nous remarquons également que nos résultats de simulation et ceux obtenus en littérature [13] ont le même comportement aussi bien vis à vis de la densité optique, P_{op} que pour les tensions de polarisation: V_{DS} et V_{GS} .

Un bon accord est obtenu, notamment aux valeurs élevées de la tension V_{DS} . Ceci témoigne de la qualité de nos résultats de simulation comme indiqué dans le tableau 2.

Tableaux III. 2 : Validation du modèle, comparaison des résultats.

$P_{op} = 234 \text{ mW /m}^2$			
V_{GS} (V)	V_{DS} (V)	G_D ($\text{m}\Omega^{-1}$) Nos résultats	G_D ($\text{m}\Omega^{-1}$) Shabiha et al [13]
-01	0,1	79,95	81,10
	0,2	77,41	78,00
	0,3	74,93	75,10
0	0,1	85,33	84,80
	0,2	82,79	83,50
	0,3	80,31	78,20

III. 4 EFFET DE LA STRUCTURE SUR G_D À DIFFÉRENTES DENSITÉS OPTIQUES.

Dans cette partie, nos investigations ont porté sur l'influence des paramètres géométriques tels que la longueur et la largeur de grille, la profondeur du composant, Z , et l'épaisseur de la couche active, a , sur la conductance de sortie. L'organigramme de cette étude est représenté par la figure III. 8.

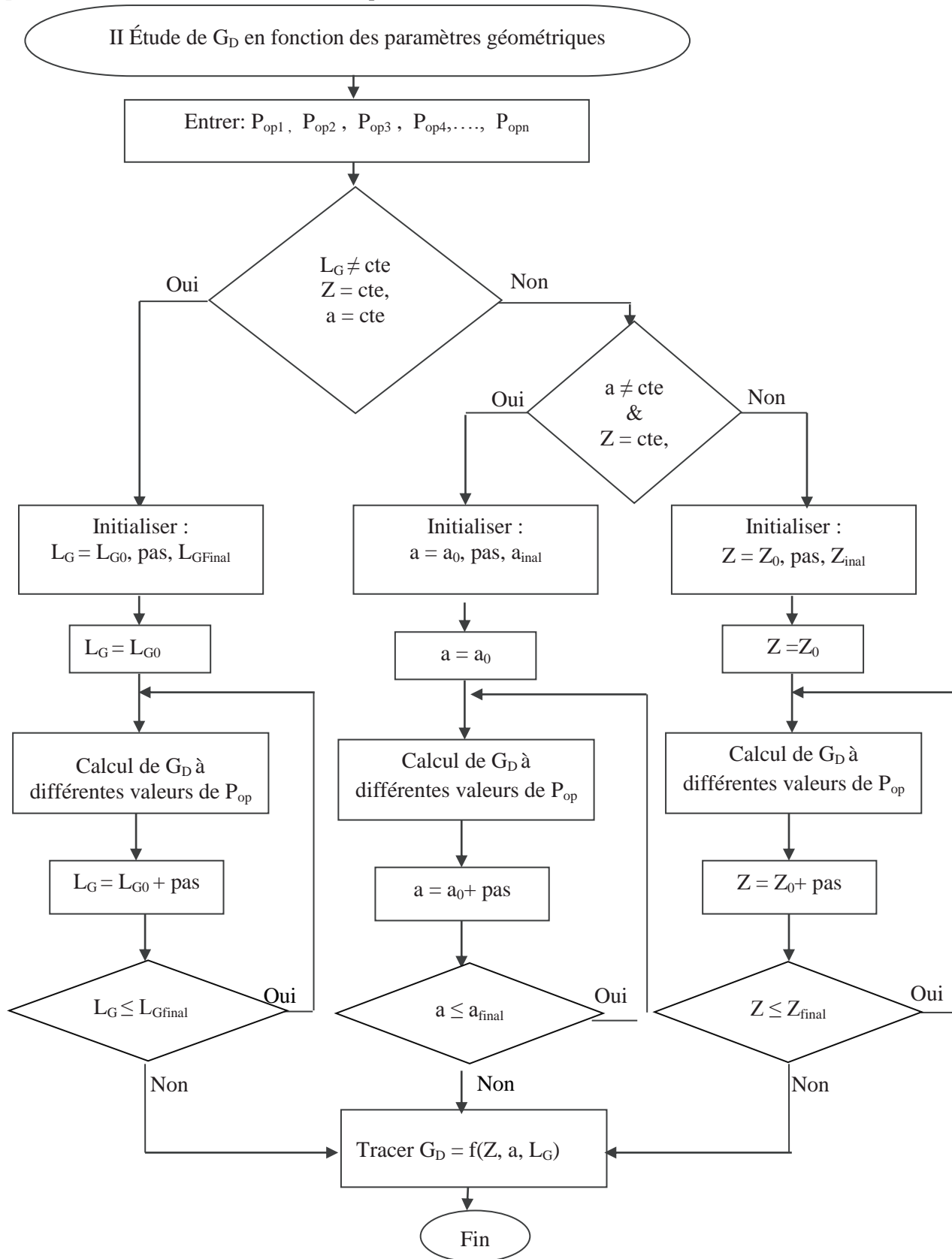


Figure III. 8: Organigramme du sous-programme de calcul de l'influence des paramètres géométriques.

III. 4. 1 Effet de la largeur de grille

a) Mise en évidence

La longueur de la grille est un des paramètres importants dans la conception d'un MESFET. Sa valeur est déterminante quant à la qualité du composant. A de faibles longueurs de grille est associé une amélioration des caractéristiques, particulièrement une réduction du bruit et de la résistance grille-source [14].

La figure III. 9 représente l'évolution de la conductance de sortie en fonction de la largeur de grille, Z , à différentes densités optiques.

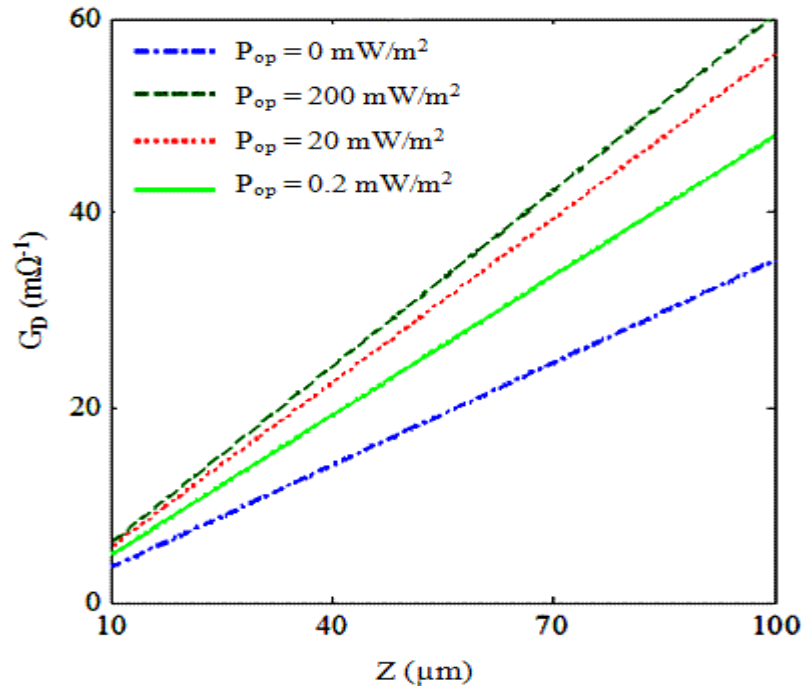


Figure III. 9: Variation de la conductance de sortie en fonction de la largeur de grille Z , à $V_{DS} = 0,1 \text{ V}$ et $V_{GS} = 0 \text{ V}$.

On relève une augmentation linéaire dont la pente est d'autant plus importante que la densité optique est grande. Ceci peut être attribué à l'augmentation de la mobilité des électrons induite par une large couche active qui facilite l'écoulement des porteurs.

b) Quantification

Nous avons bien établi, dans la partie précédente, que la courbe de $G_D(Z)$ à différentes densités optique suit à une variation linéaire. La question qui se pose maintenant est la suivante: comment peut-on exploiter ce résultat pour mieux comprendre l'effet de la densité optique, P_{op} , en relation avec la polarisation sur les pentes de G_D ? Afin de répondre à cette question et généraliser l'étude, nous avons pensé à déterminer des relations universelles des pentes en fonction de la densité optique et de la polarisation positive de drain et négative de grille. Les étapes de calcul se résument comme suit:

- Extraire les pentes de G_D en fonction de Z pour différentes densités optiques.
- Extraire les pentes de G_D en fonction de Z pour différentes polarisations négatives de V_{GS} .
- Extraire les pentes pour différentes polarisations positives de V_{DS} .
- Tracer les pentes en fonction de P_{op} pour différentes polarisation, V_{GS} .
- Tracer les pentes en fonction de P_{op} pour différentes polarisions, V_{DS} .
- Utiliser une méthode d'optimisation afin de déterminer les équations qui expriment les variations des pentes en fonction des densités optiques et des conditions de polarisation.

b-1) Quantification de $\Delta G_D/\Delta Z$ en fonction de V_{DS}

Les résultats typiques de la variation des pentes, $\Delta G_D/\Delta Z$, en fonction de la densité optique, P_{op} , sont représentés par la figure III. 10 a pour différentes polarisations positives de V_{DS} . On remarque une augmentation linéaire des pentes suivie d'une saturation. Afin de mieux illustrer la linéarité, nous avons regroupé les résultats dans la figure III. 10b en échelle semi-logarithmique. Il est clair que l'augmentation de la densité optique appliquée conduit à une croissance des pentes. D'autre part une augmentation de la polarisation positive de V_{DS} fait diminuer les pentes $\Delta G_D/\Delta Z$.

Les équations des variations relatives de la conductance, $\Delta G_D/\Delta Z$, en fonction de V_{DS} sont synthétisées dans le tableau III. 3. Chacune des relations de III. 3 à III. 6 décrit les variations de $\Delta G_D/\Delta Z$ en fonction de P_{op} à une valeur de V_{DS} correspondante.

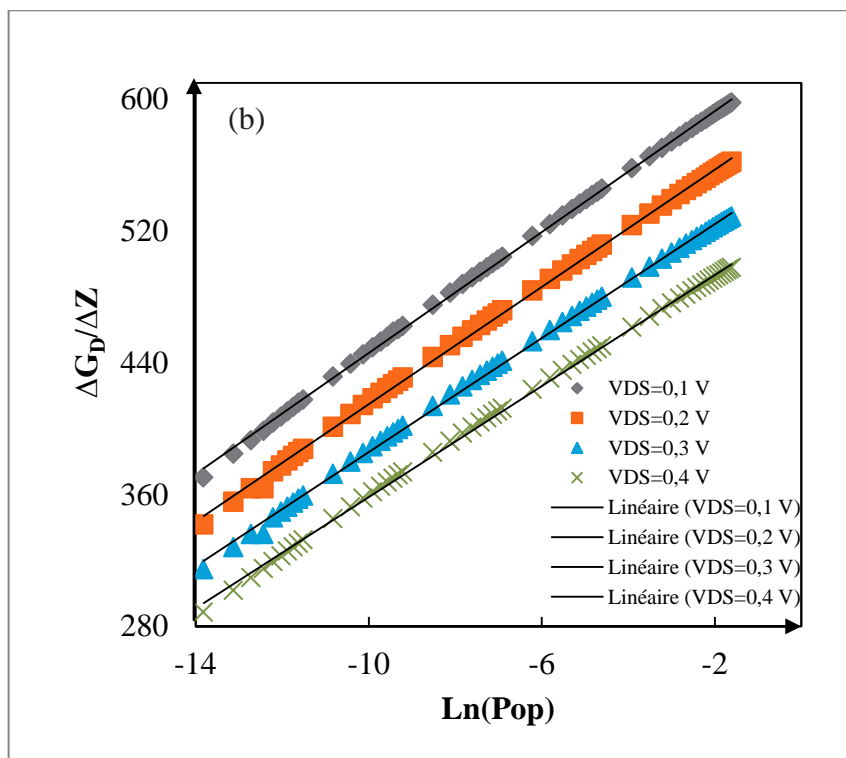
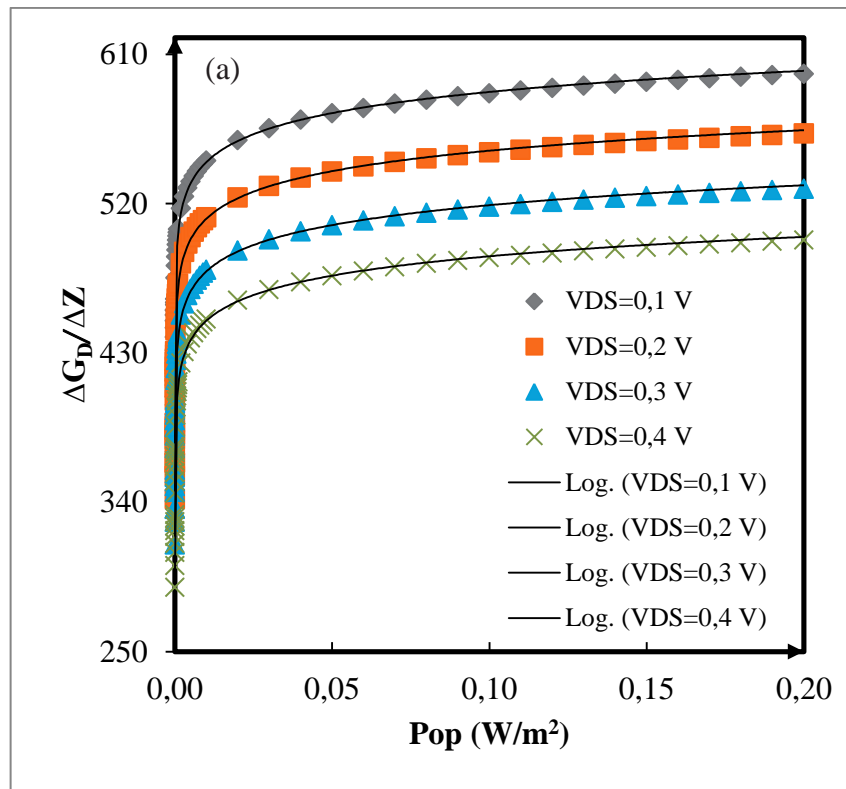


Figure III. 10: Variation de $\Delta G_D / \Delta Z$ pour différentes polarisations, V_{DS} en fonction de : (a) P_{op} et (b) $\ln(P_{op})$.

Tableau III. 3: Équations de variation de $\Delta G_D/\Delta Z$ pour différentes V_{DS} .

$(\Delta G_D/\Delta Z)_{\text{différent } P_{op}} \text{ pour différents } V_{DS}$	
$V_{DS} = 0,1V \rightarrow (\Delta G_D/\Delta Z) = 18,36 \text{Ln}(P_{op}) + 629,6$	(III.3)
$V_{DS} = 0,2V \rightarrow (\Delta G_D/\Delta Z) = 17,80 \text{Ln}(P_{op}) + 692,9$	(III.4)
$V_{DS} = 0,3V \rightarrow (\Delta G_D/\Delta Z) = 17,31 \text{Ln}(P_{op}) + 558,9$	(III.5)
$V_{DS} = 0,4V \rightarrow (\Delta G_D/\Delta Z) = 16,86 \text{Ln}(P_{op}) + 527,1$	(III.6)

Il est évident que toutes les équations, pour les différentes valeurs de V_{DS} , peuvent se mettre sous la forme :

$$(\Delta G_D/\Delta Z) = A \text{Ln}(P_{op}) + B \quad \text{III.7}$$

Avec $A = 9 - 2,5V_{DS}$

et $B = 377 - 194V_{DS}$

Ce résultat est très important du fait qu'il permet de déterminer l'interdépendance entre les variations de la conductance, la densité optique et la tension de polarisation du drain.

b-2) Quantification $\Delta G_D/\Delta Z$ en fonction de V_{GS}

De la même manière que précédemment, nous avons étudié l'influence de la polarisation négative de grille, V_{GS} sur les variations relatives de la conductance. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures III. 11a et III. 11b respectivement en échelle linéaire et semi-logarithmique. On retrouve le même comportement, autrement dit que l'augmentation de la densité optique appliquée conduit à une croissance des pentes, quant à l'augmentation de la valeur absolue de V_{GS} fait diminuer les pentes $\Delta G_D/\Delta Z$. Par ailleurs, les équations descriptives des variations de $\Delta G_D/\Delta Z$ à différents P_{op} et en fonction de V_{GS} sont regroupées dans le tableau III. 4.

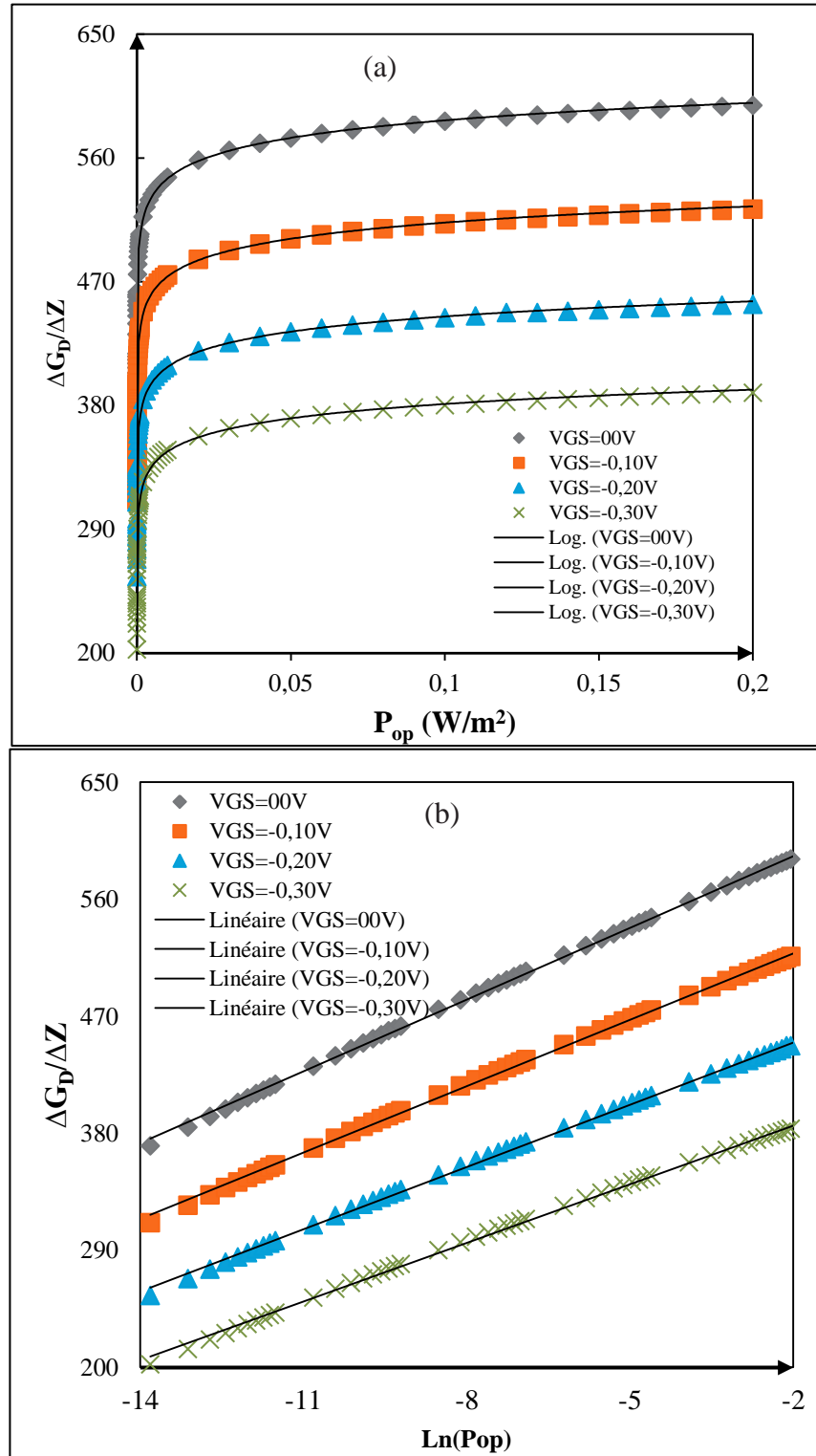


Figure III. 11 : Variation de $\Delta G_p / \Delta Z$ pour différentes polarisations V_{GS} en fonction de (a) P_{op} et (b) $\ln(P_{op})$.

Tableau III. 4: Équations de variation de $\Delta G_D/\Delta Z$ pour différents P_{op} et V_{GS}

$(\Delta G_D/\Delta Z)$ différent P_{op} pour différents V_{GS}		
$V_{GS} = 0V$	$\rightarrow (\Delta G_D/\Delta Z) = 18,36 \text{Ln}(P_{op}) + 629,6$	(III.8)
$V_{GS} = -0.1V$	$\rightarrow (\Delta G_D/\Delta Z) = 17,00 \text{Ln}(P_{op}) + 552,1$	(III.9)
$V_{GS} = -0.2V$	$\rightarrow (\Delta G_D/\Delta Z) = 15,921 \text{Ln}(P_{op}) + 481,4$	(III.10)
$V_{GS} = -0.3V$	$\rightarrow (\Delta G_D/\Delta Z) = 15,01 \text{Ln}(P_{op}) + 415,7$	(III.11)

Les relations regroupées dans le tableau II.4 décrivent les variations des pentes en fonction de P_{op} mais pour plusieurs valeurs de V_{GS} . Par conséquent, à la suite de cette analyse, il est facile de déterminer une relation générale:

$$(\Delta G_D/\Delta Z) = C \text{Ln}(P_{op}) + D \quad \text{III. 12}$$

Avec $C = 11.6 + 19V_{GS}$

et $D = 633 + 719V_{GS}$

Ce résultat est très important, il permet de quantifier l'interdépendance entre les variations de la conductance, la densité optique et la tension de polarisation de grille.

III. 4. 2 Effet de l'épaisseur de la couche active

La figure III.12 représente l'évolution de la conductance de sortie en fonction de l'épaisseur du canal, a , à différentes densités optiques. On relève une augmentation de la conductance de sortie en fonction de la densité d'éclairage ainsi qu'avec l'épaisseur du canal. Dans les conditions sombre, on trouve que la conductance de sortie augmente de $G_D = 0,3 \text{ m}\Omega^{-1}$ à $a = 0,15 \mu\text{m}$ à une valeur de $G_D = 9 \text{ m}\Omega^{-1}$ à $a = 0,3 \mu\text{m}$. Également, la conductance de sortie augmente dans lorsque a croit dans les conditions d'éclairage. Par exemple, à $P_{op} = 200 \text{ mW/m}^2$ on trouve: $G_D = 3 \text{ m}\Omega^{-1}$ à $a = 0,15 \mu\text{m}$ et $G_D = 12,9 \text{ m}\Omega^{-1}$ lorsque l'épaisseur de la couche active devient égale à $0,3 \mu\text{m}$.

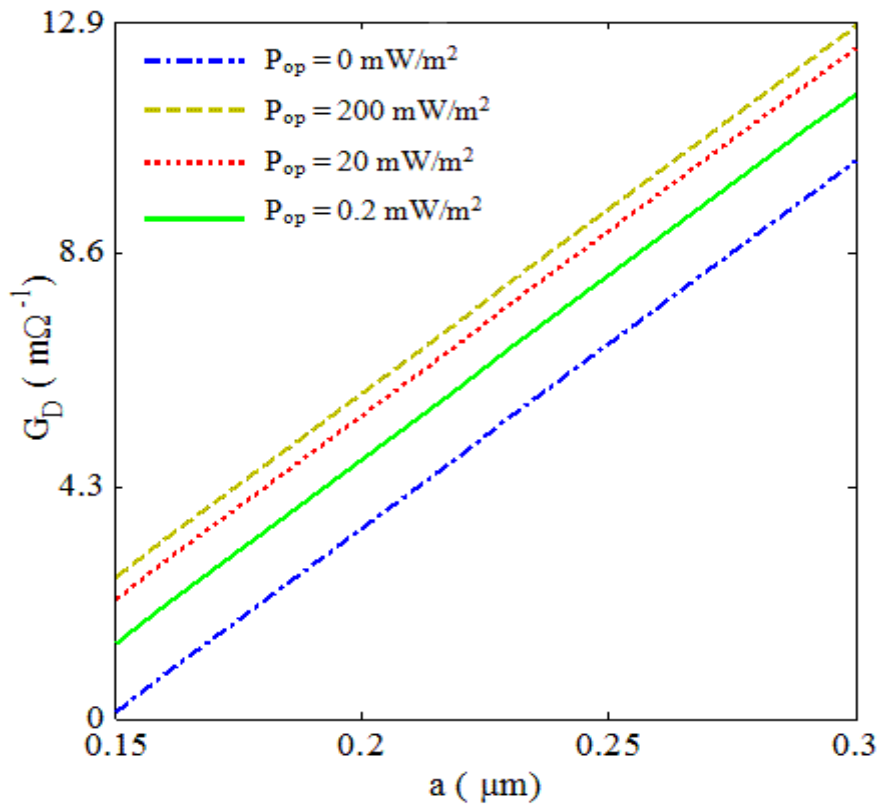


Figure III. 12 : Évolution de la conductance du sortie, à $V_{DS} = 0,1 V$ et $V_{GS} = 0 V$ en fonction de l'épaisseur du canal.

III. 4. 3 Effet de la longueur de grille

L'observation du réseau des caractéristiques de G_D en fonction de la longueur de grille, L_G , représenté par la figure III.13, permet de constater qu'une diminution de L_G conduit à une augmentation de G_D . Dans les conditions sombre, on trouve que la conductance de sortie diminuée de $G_D = 12 \text{ m}\Omega^{-1}$ à $L_G = 0,3\mu\text{m}$ à une valeur de $G_D = 2,1 \text{ m}\Omega^{-1}$ à $L_G = 1,5 \mu\text{m}$. De même, on constate une augmentation de la conductance de sortie en fonction de la densité d'éclairage pour les mêmes valeurs de la largeur de grille, par exemple à $P_{op} = 200 \text{ mW/m}^2$ on trouve que $G_D = 20 \text{ m}\Omega^{-1}$ à $L_G = 0,3 \mu\text{m}$ et $G_D = 3 \text{ m}\Omega^{-1}$ à $L_G = 1,5 \mu\text{m}$.

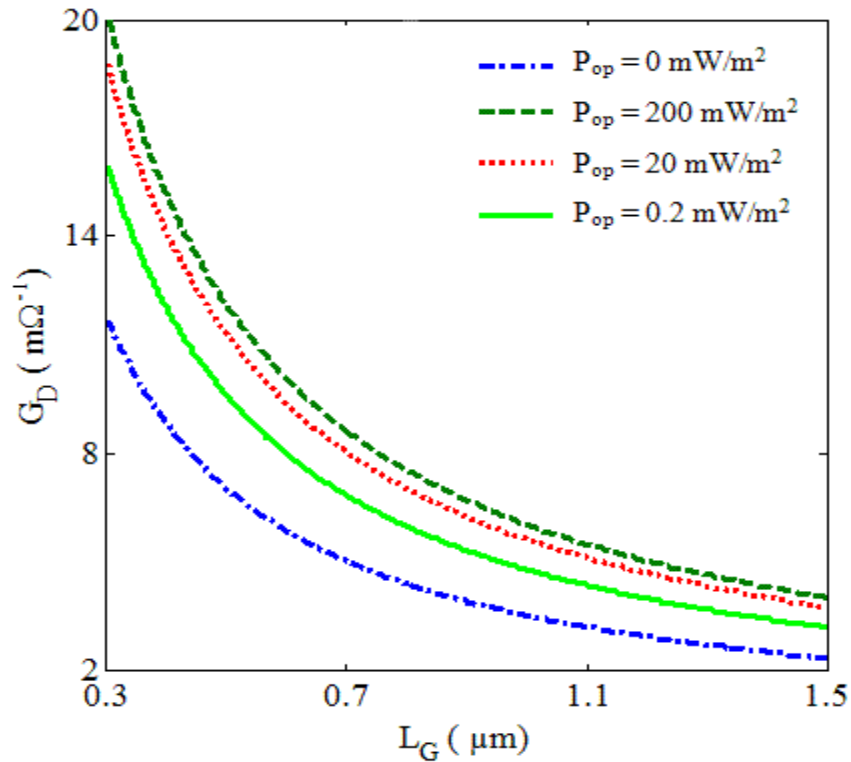


Figure III. 13: Évolution de la conductance de sortie en fonction de la longueur de grille à $V_{DS} = 0.1$ V et $V_{GS} = 0$ V.

III. 4. 4 Analyse des résultats

L'observation du réseau des caractéristiques de G_D en fonction de la longueur de grille, L_G , représenté par la figure III.13 permet de constater qu'une diminution de L_G conduit à une augmentation de G_D . Ce résultat, confirmé par les travaux de Masaaki Tomizawa et al [15], peut être interprété par la réduction de la résistance du canal. Ce comportement, bien connu dans les MESFETs à courte longueur de grille, est attribué à l'extension importante de la zone de charge d'espace coté drain [16]. Une autre interprétation serait la diminution du courant de saturation de drain avec l'augmentation de la longueur de grille. En effet, l'extension latérale de la zone des charges d'espace conduit à un allongement du canal conducteur tout en s'amincissant; ce qui limite le passage des électrons [17]. Autrement dit, plus la grille est longue, meilleur est le contrôle par la grille en efficacité. De plus, il est à noter que la valeur maximale de G_D obtenue à $L_G = 0,3 \mu\text{m}$ est d'autant plus importante que la densité optique est grande. Ceci confirme les résultats précédents qui dénotent la réduction de la résistance du canal lorsque la densité optique augmente [1].

III.5 EFFET DES PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES DU CANAL SUR G_D

Rappelons que la résistivité de la couche active est déterminante des caractéristiques d'un MESFET. Par exemple, des résistivités élevées sont nécessaires dans la conception de MESFETs de puissance. C'est ainsi que nous nous sommes intéressés à l'influence des propriétés du canal conducteur à savoir: la densité du dopage et celle des pièges surfaciques sur la conductance de sortie. Les investigations ont été menées en régime ohmique et à différentes densités optiques. Les étapes de calcul sont regroupées dans l'organigramme de la figure III.14.

III. 5. 1 Influence du dopage de la zone active

La figure III.15 illustre l'augmentation de G_D en fonction du dopage du canal conducteur, N_D , et à différente densité optique. Il est évident que la valeur maximale est obtenue à fort dopage et à la plus grande densité optique. De plus, pour un dopage donné, la conductance croît avec l'augmentation de la densité optique. Ce résultat paraît logique sachant qu'une augmentation du dopage réduit la résistance du canal et en conséquence augmente la conductance de sortie.

Notons que le dopage de la couche active d'un MESFET est d'une grande importance quant à la détermination de la valeur de la résistance du canal. Un dopage élevé maintient non seulement un grand rapport entre la longueur et la hauteur du canal, mais également il réduit les résistances d'accès à la couche active et la résistance du canal et en conséquence augmente la conductance de sortie [16]. Ainsi, il est préférable de choisir un semi-conducteur de faible résistivité, si nous désirons réaliser un transistor de moyenne puissance [17]. Par ailleurs, le fort dopage réduit la largeur des zones dépeuplées entraînant ainsi un canal conducteur large.

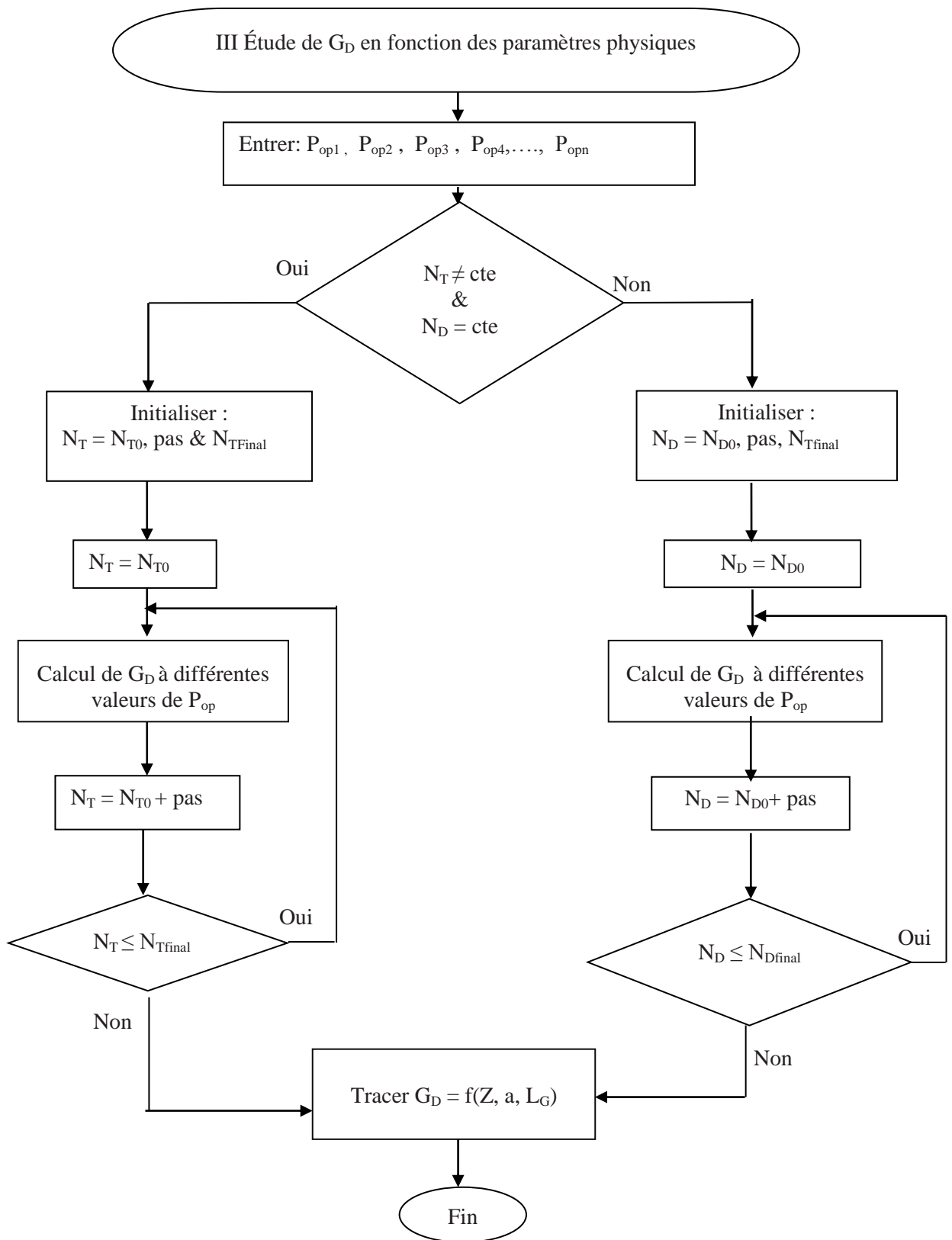


Figure III. 14: Organigramme du sous-programme de calcul de l'influence des paramètres physiques.

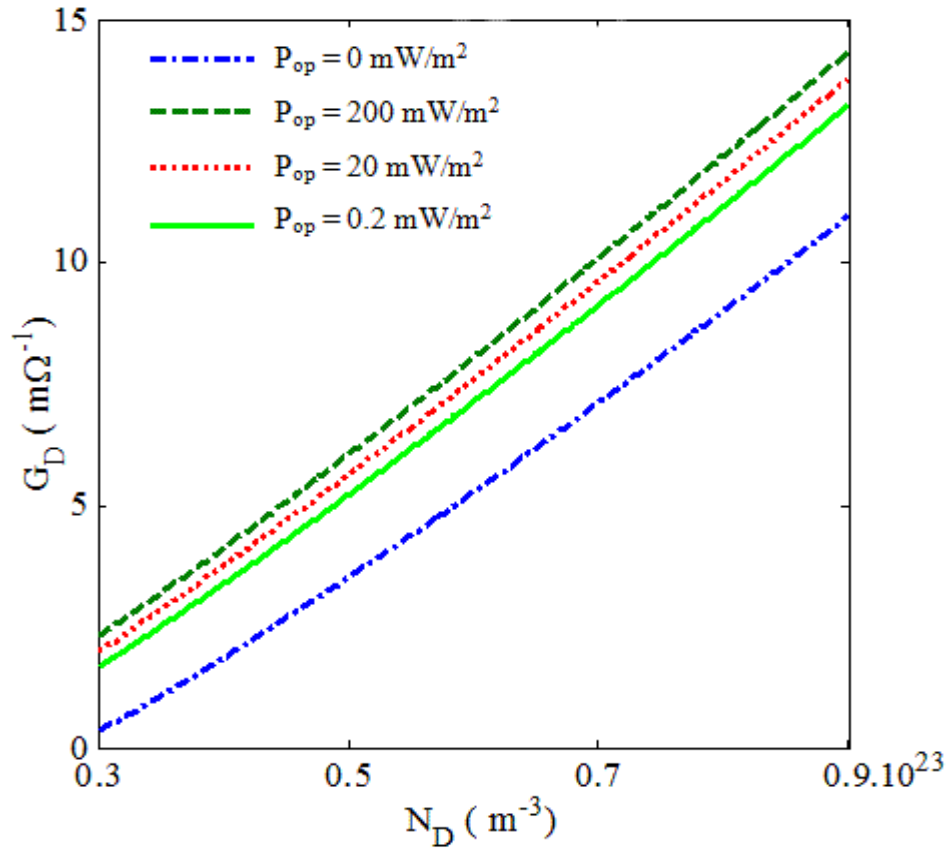


Figure III. 15 : Évolution de la conductance de sortie en fonction de la concentration de dopage.

III. 5. 2 Influence de la densité surfacique des pièges

La croissance d'utilisation des MESFETs est due à l'avancement et à la maîtrise de leur technologie de fabrication. Cependant, lorsqu'on réalise un contact électrique entre un métal et un semi-conducteur (particulièrement le contact de grille) les états de surface sont de densité assez élevée. La présence des pièges aux différentes couches du transistor induit des anomalies lors du fonctionnement du dispositif. Afin d'en tenir compte, nous représentons sur la figure III.16, l'influence de la densité surfacique des pièges, N_T , sur la conductance de sortie à différentes densités optiques. On note qu'au fur et à mesure que la concentration des pièges augmente, la conductance de sortie diminue. Comme valeurs représentatives, nous mentionnons que le passage de N_T de $0,5 \cdot 10^{17} m^{-2}$ à $8 \cdot 10^{17} m^{-2}$ entraîne une décroissance de N_D de $5,9 m\Omega^{-1}$ à $5,7 m\Omega^{-1}$.

Cette étude confirme que la présence des pièges particulièrement en surface fait apparaître une zone de charge d'espace dans le canal (proche de la surface). Ceci conduit à une augmentation des résistances de contact ohmique de drain et de source et par suite à une diminution du courant de drain [18].

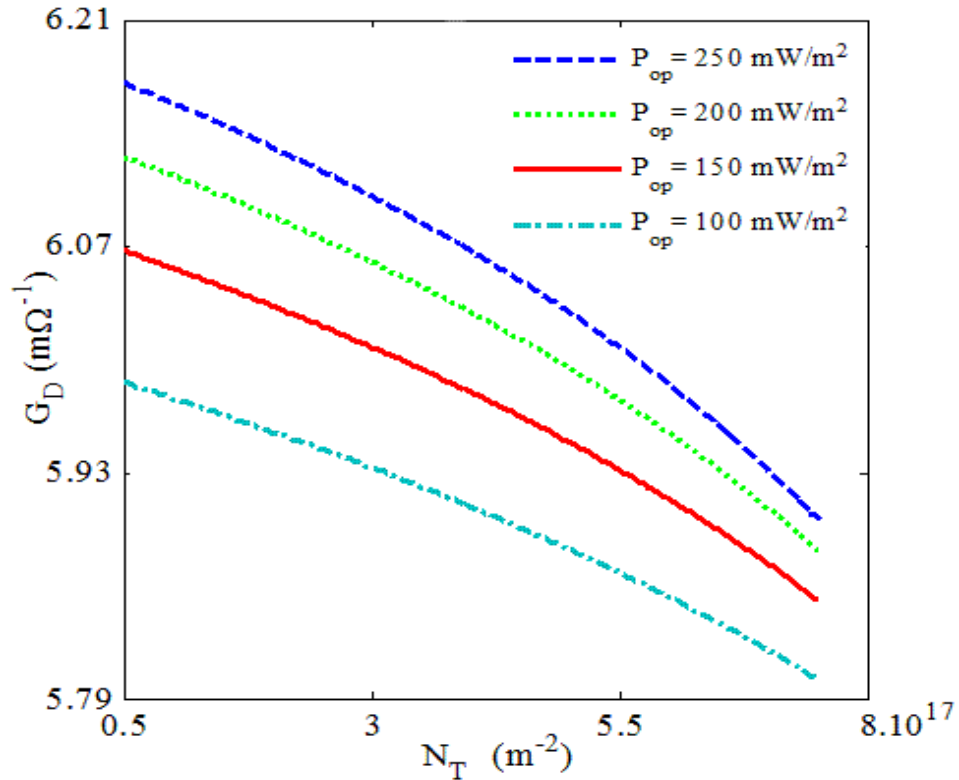


Figure III. 16 : Évolution de la conductance de sortie en fonction de la densité des pièges.

I. 6 CONCLUSIONS

Nous avons mené une étude détaillée de l'influence de la densité optique sur la conductance de sortie en relation avec la polarisation et les propriétés structurales. Ainsi, nous avons développé un programme basé essentiellement sur les phénomènes physiques régissant les MESFETs. Le modèle proposé traite du cas des données numériques et graphiques. Il explique correctement tous les comportements de la conductance de sortie.

De plus, il permet la détermination non seulement des variations de G_D en fonction de L_G , Z , a , N_D et N_T , mais aussi l'évolution de la pente de la conductance de sortie en fonction de la densité optique pour différentes densités optiques ainsi qu'à différentes polarisations V_{GS} et V_{DS} . Nous avons établi une équation universelle qui contrôle l'influence de la densité optique sur G_D en tenant compte de la dimension Z . Enfin, la comparaison de nos résultats avec la littérature a montré un bon accord. Finalement, pour l'amélioration des performances d'un MESFET, certains résultats, de cette étude, nous paraissent devoir plus particulièrement être mis en évidence:

- L'intérêt de l'éclairage qui génère des paires électrons - trous (pour $h\nu > E_g$), cela pourrait expliquer la réduction de la largeur de la zone de charges d'espace augmentant ainsi la conductance de sortie.
- La diminution de la longueur de grille et la densité des pièges surfacique augment la conductance de sortie.
- L'augmentation de la largeur du canal, la largeur de grille et du dopage augmentent la conductance de sortie.
- La relation déterminante de l'évolution de la pente de G_D du MESFET en fonction de l'éclairement et la polarisation est une équation universelle très importante.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail effectué dans cette thèse a porté sur l'étude des caractéristiques des OPFETs à base de GaAs. Le logiciel de simulation que nous avons développé est basé essentiellement sur les phénomènes physiques régissant les MESFETs et il permet d'étudier l'influence de la densité optique en relation avec les caractéristiques géométriques et structurales d'un OPFET.

Pour déterminer la tension de blocage apparente d'un OPFET, nous avons considéré les caractéristiques de transfert, courant de sortie, I_{DS} , en fonction de la tension d'entrée, V_{GS} , à différentes : densités optiques, densités de dopage et épaisseur du canal conducteur. A comparer au MESFET classique, il a été constaté que la tension nécessaire pour bloquer un OPFET augmente en valeur absolue avec l'augmentation des trois paramètres cités précédemment. En effet, l'application de l'éclairement entre les électrodes grille – drain et grille – source induit conduit à l'apparition d'une tension photonique, V_{OP} , positive qui prend en dessous la tension de blocage sans éclairage et tourne le MESFET de nouveau passant. D'où la nécessité d'appliquer une tension supérieure à la tension de blocage d'un MESFET non éclairé. Ainsi, l'OPFET peut être commandé par l'effet photonique sachant que l'utilisation de l'éclairement améliore les performances du MESFET en termes de blocage.

Par ailleurs, l'étude détaillée de l'influence de la densité optique sur la conductance du canal conducteur, G_D , a permis la détermination non seulement des variations de G_D en fonction de: la longueur de grille, la largeur de la zone de déplétion, le dopage de la zone active, l'épaisseur du canal et la densité des pièges. Mais aussi l'évolution de la pente de la conductance du canal en fonction de la densité optique à différentes tensions de polarisation, V_{GS} et V_{DS} . Les principaux résultats obtenus peuvent être résumés comme suit:

- Une augmentation de la densité d'éclairement provoque.
 - Une augmentation de l'épaisseur effective du canal et une diminution de la largeur de la zone de déplétion.
 - Une augmentation de la valeur absolue de la tension de blocage apparente.
 - Une augmentation de la conductance de sortie de l'OPFET.
- Une augmentation de l'épaisseur du canal et de la densité de dopage provoque:

- Une augmentation de la valeur absolue de de la tension de blocage apparente.
- Une augmentation de la conductance du canal.

- La diminution de la longueur de grille et la densité surfacique des pièges provoquent une augmentation de la conductance de sortie.

Enfin, notons que les relations universelles établies aussi bien celle qui quantifie l'évolution de la tension de blocage en fonction de l'éclairement que celle qui détermine les variations de la pente de G_D en fonction de l'éclairement et la polarisation sont des équations universelles très importantes dans la prédiction des caractéristiques d'un MESFET éclairé.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

I. INTRODUCTION

- [1] A. 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 40GHz Bandwidth and 1.5 V $\sqrt{\pi}$." In *Optical Fiber Communication Conference*, pp. Th4E-3. Optical Society of America, 2015.
- [4] Y. Wen, Y. Wang, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano. "Effect of GaAs step layer thickness in InGaAs/GaAsP stepped quantum-well solar cell." *Photovoltaics, IEEE Journal of* 3, no. 1 (2013): 289-294.
- [5] P. C. Schindler, D. Korn, C. Stamatidis, M. F. O'Keefe, L. Stampoulidis, R. Schmogrow, P. Zakynthinos and all. "Monolithic GaAs electro-optic IQ modulator demonstrated at 150 Gbit/s with 64QAM." *Lightwave Technology, Journal of* 32, no. 4 (2014): 760-765.
- [6] Z. Hadjoub, F. Z. Khelifati, D. Nebti, A. Gueraoui, and A. Doghmane. "Determination of GaAs MESFETs self heating temperature via output conductance frequency dispersion." *Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials* 15, no. 9-10 (2013): 1131-1135.
- [7] Z. Hadjoub, K. Cheikh, and A. Doghmane. "Influence of frequencies on output admittance, conductance and susceptance of GaAs MESFETs." *Optoelectronics And Advanced Materials-Rapid Communications* 3, no. 4 (2009): 360-363.
- [8] 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.
- [9] S. N. Chattopadhyay, C. B. Overton, S. Vetter, M. Azadeh, B. H. Olson, and N. El Naga. "Optically Controlled Silicon MESFET Fabrication and Characterizations for Optical Modulator/Demodulator." *J. Semicond. Technol. Sci* 10, no. 3 (2010): 213-224.
- [10] P. Chakrabarti, S. K. Shrestha, A. Srivastava, and D. Saxena. "Switching characteristics of an optically controlled GaAs-MESFET." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 42, no. 3 (1994): 365-375.

II. CHAPITRE I

- [1] M. A. Alsunaidi, and M. A. Al-Absi. "Influence of electrode parameters on the performance of optically controlled MESFETs." *Optics & Laser Technology* 40, no. 5 (2008): 711-715.
- [2] V. V. Kelkar, S. S. Joshi, and R. B. Lohani. "Article: Advancement in OPEFT Model}." *International Journal of Applied* 4: (2012) 44-47.
- [3] P. Chakrabarti, N. L. Shrestha, S. Srivastava, and V. Khemka. "An improved model of ion-implanted GaAs OPFET." *IEEE Transactions on Electron Devices*, 39, no. 9 (1992): 2050-2059.
- [4] A. J. Seeds, and A. A. A. De Salles. "Optical control of microwave semiconductor devices." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 38, no. 5 (1990): 577-585.
- [5] R. N. Simons, "Microwave performance of an optically controlled AlGaAs/GaAs high electron mobility transistor and GaAs MESFET." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 35, no. 12 (1987): 1444-1455.
- [6] Y. Zebda, and S. A. Helweh. "AC characteristics of optically controlled MESFET (OPFET)." *Lightwave Technology, Journal of* 15, no. 7 (1997): 1205-1212.

- [7] S. N. Chattopadhyay, N. Motoyama, A. Rudra, A. Sharma, S. Sriram, C. B. Overton, and P. Pandey. "Optically Controlled Silicon MESFET Modeling Considering Diffusion Process." *JSTS: Journal of Semiconductor Technology and Science* 7, no. 3 (2007): 196-208.
- [8] G. Conte, E. Giovine, M. Girolami, S. Salvatori, A. Bolshakov, V. Ralchenko, and V. Konov. "Polycrystalline diamond UV-triggered MESFET receivers." *Nanotechnology* 23, no. 7 (2012): 075202.
- [9] M. Mikulics, P. Kordoš, D. Gregušová, R. Adam, M. Kočan, S. Wu, J. Zhang, R. Sobolewski, D. Grützmacher, and M. Marso. "Monolithic integration of ultrafast photodetector and MESFET in the GaN material system." *Photonics Technology Letters, IEEE* 23, no. 17 (2011): 1189-1191.
- [10] H. S. Lee, S. S. Baik, K. Lee, S. W. Min, P. J. Jeon, J. S. Kim, K. Choi, H. J. Choi, J. H. Kim, and S. Im. "Metal Semiconductor Field-Effect Transistor with MoS₂/Conducting NiO x van der Waals Schottky Interface for Intrinsic High Mobility and Photoswitching Speed." *ACS nano* 9, no. 8 (2015): 8312-8320.
- [11] 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.
- [12] S. Elzwawi, A. Hyland, M. Lynam, J. G. Partridge, D. G. McCulloch, and M. W. Allen. "Effect of Schottky gate type and channel defects on the stability of transparent ZnO MESFETs." *Semiconductor Science and Technology* 30, no. 2 (2015): 024008.
- [13] S. Jit, and B. B. Pal. "A new optoelectronic integrated device for light-amplifying optical switch (LAOS)." *IEEE Transactions on Electron Devices*, 48, no. 12 (2001): 2732-2739.
- [14] V. M. Schneider, "Schottky barrier photodiodes with antireflection coating." *Bell System Technical Journal* 45, no. 9 (1966): 1611-1638.
- [15] C. Baack, G. Elze, and G. Walf. "GaAs MESFET: A high-speed optical detector." *Electronics Letters* 13, no. 7 (1977): 193.

- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Derek Abbott, Shuguang Cui, and K. Eshraghian. "Photovoltaic gate biasing edge effect in GaAs MESFETs." *Electronics Letters* 27, no. 21 (1991): 1900-1902.
- [19] B. R. Darling, and J. P. Uyemura. "Optical gain and large-signal characteristics of illuminated GaAs MESFET's." *Quantum Electronics, IEEE Journal of* 23, no. 7 (1987): 1160-1171.
- [20] 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.
- [21] A. A. A. De Salles, "Optical control of GaAs MESFET's." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 31, no. 10 (1983): 812-820.
- [22] 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.
- [23] J. M. Zamanillo, C. Navarro, C. Pérez-Vega, A. Mediavilla, and A. Tazón. "Large-signal model predicts dynamic behavior of GaAs MESFET model under optical illumination." *Microwave and Optical Technology Letters* 29, no. 1 (2001): 25-31.
- [24] J. M. Zamanillo, J. Portilla, C. Navarro, C. Pérez-Vega, and A. Mediavilla. "Optical Control of a GaAs Chip MMIC Amplifier at S Band." (2003).
- [25] 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 Transactions on Electron Devices*, 37, no. 1 (1990): 2-10.

- [26] Y. Zebda, and S. Abu_Helweh. "DC characteristics of optically controlled MESFET (OPFET)." *Journal of optical communications* 19, no. 1 (1998): 2-8.
- [27] V. K. Singh, and B. B. Pal. "Effect of diffusion and modulated frequency in an ion-implanted OPFET." *IEEE Transactions on Electron Devices*, 34, no. 11 (1987): 2270-2279.
- [28] B. B. Pal, and S. N. Chattopadhyay. "GaAs OPFET characteristics considering the effect of gate depletion with modulation due to incident radiation." *IEEE Transactions on Electron Devices*, 39, no. 5 (1992): 1021-1027.
- [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] Shubha, B. B. Pal, and R. U. Khan. "Optically-controlled ion-implanted GaAs MESFET characteristic with opaque gate." *IEEE Transactions on Electron Devices*, 45, no. 1 (1998): 78-84.
- [31] J. R. Forrest, F. P. Richards, and A. Perichon. "The microwave MESFET optical detector." In *Electron Devices Meeting, 1982 International*, vol. 28, pp. 529-532. IEEE, 1982.
- [32] K. A. R. Razzooqi, N. J. Gomes, and P. A. Davies. "Physically based circuit model of GaAs MESFET as an optical port for microwave systems." In *Microwave Symposium Digest, 1993., IEEE MTT-S International*, pp. 1553-1556. IEEE, 1993.
- [33] S. Bose, M. Gupta, and R. S. Gupta. "I d–V d characteristics of optically biased short channel GaAs MESFET." *Microelectronics journal* 32, no. 3 (2001): 241-247.
- [34] F. Driouch, D. Cailleu, M. R. Friscourt, and C. Dalle. "GaAs MESFET injection planar Gunn diode optronic applications." *Electronics Letters* 32, no. 24 (1996): 2274-2276.
- [35] 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.

- [36] 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.
- [37] C. Tripon-Canseliet, S. Faci, A. Pagies, V. Magnin, S. Formont, D. Decoster, and J. Chazelas. "Microwave on/off ratio enhancement of GaAs photoconductive switches at nanometer scale." *Lightwave Technology, Journal of* 30, no. 23 (2012): 3576-3579.
- [38] 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.
- [39] R. Ramesh, M. Madheswaran, and K. Kannan. "Optical effects on the characteristics of GaAs nanoscale FinFET with vertical Gaussian doping profile." *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 124, no. 19 (2013): 4019-4025.
- [40] 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).
- [41] J. HSun, R. J. Gutmann, and J. M. Borrego. "Photoeffects in common-source and common-drain microwave GaAs MESFET oscillators." *Solid-State Electronics* 24, no. 10 (1981): 935-940.
- [42] J. H. Sun, R. J. Gutmann, and J. M. Borrego. "Optical Tuning in GaAs MESFET Oscillators." In *Microwave Symposium Digest, 1981 IEEE MTT-S International*, pp. 40-42. IEEE, 1981.
- [43] A. MADJAR, A. PAOLLELA, and P. R. HERCZFELD. "The GaAs MESFET as an optical detector." In *OMW: interactions between microwaves and optics. International summer school*, pp. 81-88. 1998.
- [44] T. Morioka, H. Takara, S. Kawanishi, K. Uchiyama, and M. Saruwatari. "Polarisation-independent all-optical demultiplexing up to 200 Gbit/s using four-

- wave mixing in a semiconductor laser amplifier." *Electronics Letters* 32, no. 9 (1996): 840-842.
- [45] V. Moncrief, "Gravitational radiation from the homologous oscillation of compressible Newtonian spheroids." *The Astrophysical Journal* 234 (1979): 628-631.
- [46] I. D. Phillips, A. D. Ellis, H. J. Thiele, R. J. Manning, and A. E. Kelly. "40 Gbit/s all-optical data regeneration and demultiplexing with long pattern lengths using a semiconductor nonlinear interferometer." *Electronics Letters* 34, no. 24 (1998): 2340-2342.
- [47] G. Raybon, B. Mikkelsen, U. Koren, B. I. Miller, K. Dreyer, L. Boivin, S. Chandrasekhar, and C. A. Burrus. "20 Gbit/s all-optical regeneration and wavelength conversion using SOA based interferometers." In *Optical Fiber Communication Conference, 1999, and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication. OFC/IOOC'99. Technical Digest*, vol. 4, pp. 27-29. IEEE, 1999.
- [48] A. D'Ottavi, E. Iannone, A. Mecozzi, S. Scotti, P. Spano, R. Dall'Ara, G. Guekos, and J. Eckner. "Frequency conversion by four-wave mixing on a frequency range of 8.6 THz." In *Proceedings of ECOC*, vol. 84, pp. 737-740. 1994.
- [49] W. Pieper, C. Kurtzke, R. Schnabel, D. Breuer, R. Ludwig, K. Petermann, and H. G. Weber. "Nonlinearity-insensitive standard-fibre transmission based on optical-phase conjugation in a semiconductor-laser amplifier." *Electronics Letters* 30, no. 9 (1994): 724-726.

III. CHAPITRE II

- [01] A. A. A. De Salles, "Optical control of GaAs MESFET's." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 31, no. 10 (1983): 812-820.
- [02] J. H. Sun, R. J. Gutmann, and J. M. Borrego. "Photoeffects in common-source and common-drain microwave GaAs MESFET oscillators." *Solid-State Electronics* 24, no. 10 (1981): 935-940.
- [03] S. Jit, and B. B. Pal. "New optoelectronic integrated device for optically controlled microwave oscillators." In *Optoelectronics, IEE Proceedings-*, vol. 151, no. 3, pp. 177-182. IET, 2004.
- [04] 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.
- [05] M. S. Shur, J. K. Abrokwah, R. R. Daniels, and D. K. Arch. "Mobility enhancement in highly doped GaAs quantum wells." *Journal of applied physics* 61, no. 4 (1987): 1643-1645.
- [06] H. Uda, T. Sawai, T. Yamada, K. Nogawa, and Y. Harada. "High-performance GaAs switch ICs fabricated using MESFETs with two kinds of pinch-off voltages [for handy phone]." In *Gallium Arsenide Integrated Circuit (GaAs IC) Symposium, 1993. Technical Digest 1993., 15th Annual*, pp. 247-250. IEEE, 1993.
- [07] S. Jit, and N. V. N. Murty. "Analytical study of the photo-effects on common-source and common-drain microwave oscillators using high pinch-off n-GaAs MESFETs." *Microelectronics journal* 37, no. 5 (2006): 452-458.
- [08] P. Chakrabarti, S. K. Shrestha, A. Srivastava, and D. Saxena. "Switching characteristics of an optically controlled GaAs-MESFET." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 42, no. 3 (1994): 365-375.
- [09] N. Rainee Simons, "Microwave performance of an optically controlled AlGaAs/GaAs high electron mobility transistor and GaAs MESFET." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 35, no. 12 (1987): 1444-1455.

- [10] H. Mizuno. "Microwave characteristics of an optically controlled GaAs MESFET." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 31, no. 7 (1983): 596-600.
- [11] 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 Transactions on Electron Devices*, 37, no. 1 (1990): 2-10.
- [12] L. J. Gautier, D. Pasquet, and P. Pouvil. "Optical Effects on the Static and Dynamic Characteristics of a GaAs MESFET (Short Paper)." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 33, no. 9 (1985): 819-822.
- [13] 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.
- [14] M. A. Khatibzadeh, and A. R. J. Trew. "A large-signal, analytic model for the GaAs MESFET." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 36, no. 2 (1988): 231-238.
- [15] G. Nuzillat, F. Damay-Kavala, G. Bert, and C. Arnodo. "Low pinch-off voltage fet logic (lpfl): Isi oriented logic approach using quasinnormally off GaAs mesfets." *Solid-State and Electron Devices, IEE Proceedings I* 127, no. 5 (1980): 287-296.
- [16] J. Téllez, L. M. Matias, D. Córdoba, and L. A. Mendes-Victor. "Structure of the crust in the schistose domain of Galicia-Tras-os-Montes (NW Iberian Peninsula)." *Tectonophysics* 221, no. 1 (1993): 81-93.
- [17] J. L. Cazaux, Jacques Graffeuil, and D. Pavlidis. "Optimisation du profil de dopage d'un MESFET réalisé par implantation ionique." *Revue de physique appliquée* 21, no. 2 (1986): 139-149.
- [18] V. K. Singh, and B. B. Pal. "Effect of optical radiation and surface recombination on the RF switching parameters of a GaAs MESFET." In *Optoelectronics, IEE Proceedings J*, vol. 137, no. 2, pp. 124-128. IET, 1990.

- [19] J. G. Rees. "Surface recombination velocity—A useful concept?." *Solid-state electronics* 28, no. 5 (1985): 517-519.
- [20] S. Tripathi, and S. Jit. "Modeling of photodependent capacitance for short gate-length ion-implanted GaAs MESFETs." In *16th International Workshop on Physics of Semiconductor Devices*, pp. 85492L-85492L. International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [21] K. B. Mishra, L. Jolly, and S. C. Patil. "Characterization of optically controlled ion implanted in 1-ga x as MESFET with buried gate." In *Proceedings of the International Conference & Workshop on Emerging Trends in Technology*, pp. 1125-1132. ACM, 2011.
- [22] Y. L. Lai, and K. H. Hsu. "A new pinched-off cold-FET method to determine parasitic capacitances of FET equivalent circuits." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 49, no. 8 (2001): 1410-1418.
- [23] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*. New Delhi: Wiley Eastem Ltd., 1987
- [24] P. Chakrabarti, N. L. Shrestha, S. Srivastava, and V. Khemka. "An improved model of ion-implanted GaAs OPFET." *IEEE Transactions on Electron Devices*, 39, no. 9 (1992): 2050-2059.
- [25] N. S. Chattopadhyay, C. B. Overton, S. Vetter, M. Azadeh, B. H. Olson, and N. El Naga. "Optically Controlled Silicon MESFET Fabrication and Characterizations for Optical Modulator/Demodulator." *J. Semicond. Technol. Sci* 10, no. 3 (2010): 213-224.
- [26] A. Guerraoui, Z. Hadjoub, D. Nebti, F. Z. Khelifati, A. Doghmane. "Influence of polarization, geometrical and structural parameters on GaAs MESFET output conductance under dark and illuminated conditions." *Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials*, 18, Iss. 1 -2, (2016): 82-88

IV. CHAPITRE III

- [1] K. B. Mishra, L. Jolly, and S. C. Patil. "Characterization of optically controlled ion implanted in 1-ga x as MESFET with buried gate." In *Proceedings of the International Conference & Workshop on Emerging Trends in Technology*, pp. 1125-1132. ACM, 2011.
- [2] H. Tranduc, P. Rossel, J. Graffeuil, C. Azizi, G. Nuzillat, and G. Bert. "Substrate and interface effects in GaAs fet's." *Revue De Physique Appliquee* 13, no. 12 (1978): 655-659.
- [3] P. Canfield, J. Medinger, and L. Forbes. "Buried-channel GaAs MESFET's with frequency-independent output conductance." *Electron Device Letters, IEEE* 8, no. 3 (1987): 88-89.
- [4] S. Choi, and M. B. Das. "Origin and modeling of the frequency dependent output conductance in microwave GaAs MESFET's with buried p layer." *IEEE Transactions on Electron Devices*, 41, no. 10 (1994): 1725-1733.
- [5] A. J. Reynoso-Hernandez, and J. Graffeuil. "Output conductance frequency dispersion and low-frequency noise in HEMTs and MESFETs." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 37, no. 9 (1989): 1478-1481.
- [6] S. M. Genco. *Characterization of Microwave MESFET Circuits under Laser Illumination. Applications to Phased Array Radar, Microwave Communications, and Digital Clock Control*. No. ECE/GWOL/62. COLORADO UNIV AT BOULDER DEPT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, 1994.
- [8] A. Khoualdia, Z. Hadjoub, and A. Doghmane. "Investigation of low frequency dependence of output conductance in GaAs MESFET." *Int. J. Nanoelectronics and Materials* 3 (2010): 9-15.
- [7] S. Han, N. Lal, C. H. Lee, B. Matinpour, J. Laskar, and D. J. Blumenthal. "Single-MMIC four-channel transmitter module for multichannel RF/optical subcarrier multiplexed communications applications." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50, no. 4 (2002): 1173-1179.

- [9] Z. Hadjoub, F. Z. Khelifati, D. Nebti, A. Guerraoui, and A. Doghmane. "Determination of GaAs MESFETs self heating temperature via output conductance frequency dispersion." *Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials* 15, no. 9-10 (2013): 1131-1135.
- [10] P. Chakrabarti, S. K. Shrestha, A. Srivastava, and D. Saxena. "Switching characteristics of an optically controlled GaAs-MESFET." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 42, no. 3 (1994): 365-375.
- [11] B. K. Mishra, L. Jolly, and S. Behra. "Submicron model for illuminated gallium nitride HEMT." In *Proceedings of the International Conference & Workshop on Emerging Trends in Technology*, pp. 1107-1113. ACM, 2011.
- [12] A. A. A. De Salles, "Optical control of GaAs MESFET's." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 31, no. 10 (1983): 812-820.
- [13] Shabiha, B. B. Pal, and R. U. Khan. "Optically-controlled ion-implanted GaAs MESFET characteristic with opaque gate." *IEEE Transactions on Electron Devices*, 45, no. 1 (1998): 78-84.
- [14] H. Fukui. "Optimal noise figure of microwave GaAs MESFET's." *IEEE Transactions on Electron Devices*, 26, no. 7 (1979): 1032-1037.
- [15] M. Tomizawa, M. Uchida, and T. Sugeta. "Improvement in GaAs MESFET drain conductance by a steplike-gate structure." *IEEE Transactions on Electron Devices*, 31, no. 4 (1984): 435-439.
- [17] A. J. Adams, I. G. Thayne, C. D. W. Wilkinson, S. P. Beaumont, N. P. Johnson, A. H. Kean, and C. R. Stanley. "Short-channel effects and drain-induced barrier lowering in nanometer-scale GaAs MESFET's." *IEEE Transactions on Electron Devices*, 40, no. 6 (1993): 1047-1052.
- [16] H. Djelti, M. Feham, and M. Kameche. "Etude comparative des paramètres géométriques et électriques du transistor MESFET bigrille en GaAs et en 4H-SiC." In *4th International Conference: Sciences Of Electronic, Technologies Of Information And Telecommunications, SETIT 2007*.

- [18] Z. Hadjoub, K. Cheikh, A. Zouyed, A. Khoualdia, and A. Doghmane. "Quantification of surface state effects in GaAs MESFETs." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 28, no. 1, p. 012036. IOP Publishing, 2012.

Influence of polarization, geometrical and structural parameters on GaAs MESFET output conductance under dark and illuminated conditions

A. GUERRAOUI, Z. HADJOUR, D. NEBTI, F. Z. KHELIFATI, A. DOGHMANE*

Laboratoire des Semi-Conducteurs, Département de Physique, Faculté des Sciences, Université Badji-Mokhtar, BP 12, Annaba, DZ-23000, Algérie

In this work, we investigate the effects of photonic intensity on several electrical and structural parameters of GaAs MESFETs. First, a simulation software, describing the physical phenomena, is developed to calculate, display and plot the results. This program correctly explains all the behavior of the output conductance under illumination, as a function of polarization, geometrical and structural properties of these devices. Interesting results were obtained: (i) Increasing the photonic intensity and the channel thickness, the gate width and the doping lead to an increase in the output conductance. (ii) Reducing the gate length and the density of surface traps lead to an increase in the output conductance. (iii) Any increase in the illumination intensity optic lead to a progressive decrease in the apparent value of pinch-off voltage under illumination for which a universal equation is deduced in order to predict the apparent blocking voltage of an illuminated MESFET.

(Received February 11, 2015; accepted February 10, 2016)

Keywords: GaAs MESFET, Output Conductance, Optical controlled, Photo-switching, Pinch-off voltage

1. Introduction

Modern electronic and optoelectronic technologies require the understanding and the investigations of photonic effects in several devices, such as MOSFETs, MESFETs, MISFETs, photoreceptors, etc. Thus, a great interest is shown due to the importance of optical performances of large band semiconductors among which gallium arsenide remains the most widely used material in device fabrication, such as solar cells, photodetectors, lasers, Electro-Absorption Modulators (EAM) GaAs, Metal-Semiconductors-Metal Photo Detector (MSM-PD), and the Photoconductive Semiconductor Switch (PCSS) [1-3]. Recently [4], the effect of GaAs step layer thickness in the Multiple-Stepped Quantum-Well (MSQW) solar cells was studied; it was reported that a decrease of the losses is induced by radiative recombination in the multiple quantum well MQW. It should be recalled that over recent decades, the field effect transistors based on Schottky barrier gallium arsenide, GaAs MESFET's, optically controlled (GaAs OPFET), attracted considerable attention in the design of various monolithic circuits. These circuits are optically controlled, particularly the Monolithic Microwave Integrated Circuits (MMICs) adopted to high signal generation [5] such as power amplifiers, oscillators, optoelectronic integrated circuits (OEICs) and mobile telecommunications circuits. However, microwave optical characteristics of the MESFETs are highly dependent on the device output conductance and the

blocking voltage. Thereby, a specific theoretical model for the photo-dependence of the GaAs MESFET output conductance can solve this problem for MMICs and OEICs. For example, the output conductance trends are used in the linear circuits to improve the maximum frequency disposable [6-7].

In this context, we investigate the phenomenon of illumination in GaAs MESFETs, in order to contribute to the understanding of the physical laws that govern this phenomenon. It is worth noting that several experimental and theoretical models related to the study the effect of illumination on some MESFET parameters have been reported in the literature [8-11]. The starting point in the present study consists of considering some reported data [11] to investigate the influence of polarization, geometrical and structural parameters on GaAs MESFET output conductance, G_D , taking into account the effect of illumination. We then apply the results of this analysis to the determination of what might be the optimal illumination in order to improve the optical efficiency. Finally, we quantify the influence of the optical density on the channel blocking voltage.

2. Methodology

2.1 Device structure

The schematic structure of a conventional MESFET is shown in Fig.1. It is shown that on the semi-insulating GaAs substrate is deposited an n-type GaAs layer, of a thickness a , which forms the conducting channel. The drain, D , and

source, S, contacts are Ohmic whereas the gate, G, contact is a Schottky contact. Various processes can be combined to create excess carriers in the semiconductor. Among these processes, we mention the photo excitation that leads to the generation of excess carriers with respect to equilibrium conditions, due the presence of illumination.

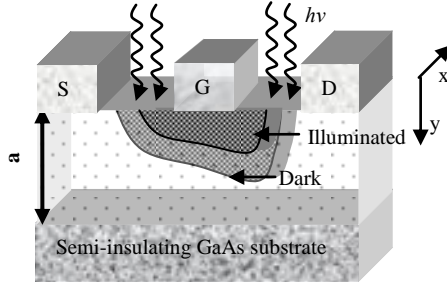


Fig.1. Structure of MESFET under dark and illuminated conditions.

The device, operated in the ohmic region, is illuminated by vertical optical radiation, $h\nu$, along the y axis. It should be noted that during their propagation photons are absorbed by the GaAs material. This phenomenon is characterized by an absorption coefficient, representing relative variation of the photon intensity per unit of length $\alpha_{\text{GaAs}} = 10^6 \text{ m}^{-1}$, at a wavelength $\lambda_{\text{GaAs}} = 0.87 \mu\text{m}$.

The effect of illumination on electrical and structural characteristics is studied and analyzed through the development of a simulation program. This software takes into account the laws that describe the physical phenomena. It leads to the calculation of the derivative and the solution of a system of equations as well as displaying the results in the form of curves. The present investigation concerns the influence of (i) polarization, (ii) geometrical and (iii) structural parameters on the output conductance of a MESFET illuminated by different optical densities. Finally, an important part has been devoted to the quantification of the pinch-off voltage, V_{GSoffA} , appearing under variable and increasing illumination intensities.

2.2 Theoretical model

It is well established that the output conductance of a MESFET may be obtained using the following relationship:

$$G_D = \left(\frac{\partial I_{\text{DS}}}{\partial V_{\text{DS}}} \right)_{V_{\text{GS}} = \text{cst}} \quad (1)$$

where V_{DS} is drain-source voltage and I_{DS} is the drain-source current.

The fundamental physical mechanism that appears under optical illuminations of MESFETs is the generation of free carriers (electron-hole pairs) in the semiconductor. This mechanism appears when the

absorbed photon energy is greater than or equal to the semiconductor band gap. The incident photon fluxes create a photocurrent arising from the layer of semiconductor, metal side, which develops a photonic voltage (photovoltage) through the Schottky junction [12].

The presently adopted model describes the expression of the current of a MESFET as a function of a photo-induced potential across the Schottky barrier, the life time of minority carriers, the rate of recombination and the rate of the photo-generation [11], as follows:

$$I_{\text{DS}} = \frac{qZ\mu_n N_D}{2L_c} \left\{ 2a - \left(\frac{2\varepsilon}{qN_D} (V_{\text{bi}} - V_{\text{GS}} - V_{\text{op}})^{1/2} \right) V_{\text{DS}} - \frac{2}{3} \left\{ \left(\frac{2\varepsilon}{qN_D} \right)^2 \left((V_{\text{bi}} - V_{\text{GS}} + V_{\text{op}} - V_{\text{DS}})^2 - (V_{\text{bi}} - V_{\text{GS}} - V_{\text{op}})^2 \right) \right\} \right\} + \frac{qZ\mu_n P_{\text{op}}}{L_c} (1 - R_m)(1 - R_s)(1 - \exp(-\alpha a)) \tau_l V_{\text{DS}} - \frac{h\nu L_c}{qZ\mu_n \eta} V_{\text{DS}} \quad (2)$$

where Z is the gate width, L_G the gate length, a the thickness of channel, P_{op} is the optical density; ε the permittivity ($\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$); R_s and R_m are reflection coefficients of the semiconductor and the gate metal, respectively; μ_p and μ_n are hole and electrons motilities, respectively; N_D the doping concentration in the active layer; V_{bi} is the potential of the Schottky barrier junction; q the electron charge; h the Planck constant; α the coefficient of optical absorption; λ the wavelength of incident illumination, τ_l lifetime of minority carriers, R is the recombination rate, V_{op} the optical voltage, and ν is the frequency of the optical beam. Finally the photovoltage, V_{op} , is simply given by the expression [11]:

$$V_{\text{op}} = \frac{nkT}{q} \ln \left[\frac{qG_{\text{op}} \sqrt{\frac{kT}{q}} \mu_p \tau_l - Rq}{J_s} \right] \quad (3)$$

Where n , k , T and J_s are the ideality factor of the Schottky junction, the Boltzmann constant, the temperature in Kelvin, the inverse saturation current density of the Schottky junction, respectively; G_{op} is the rate generation, per unit volume, of excess carriers at the gate metal-semiconductor interface. From Eq.3, it is easy to note that: if the density of the incident light varies the rate of optical generation varies and consequently the photo-voltage developed through the junction gate is also changed.

Eq.1 and Eq.2 are used to derive the expression of the output conductance G_D as a function of geometrical parameters of the device and the characteristics of the channel parameters namely doping, N_D , and the surface density of traps N_T .

$$G_D = \frac{qZ\mu_n N_D}{2L_g} \left[\left\{ 2a - \left(\frac{2\epsilon}{qN_{dD}} (V_{bi} - V_{GS} - V_{OP}) \right)^{\frac{1}{2}} \right\} - \left\{ \left(\frac{2\epsilon}{qN_D} \right)^{\frac{1}{2}} (V_{bi} - V_{GS} - V_{OP} + V_{DS})^{\frac{1}{2}} \right\} + \frac{qZ\mu_n P_{OP}}{L_g} (1 - R_m)(1 - R_s)(1 - \exp(-\alpha a) \tau_L) - \frac{qZR\mu_n \tau_i}{L_g} \right] \quad (4)$$

This expression takes into account not only the photovoltaic effect through the optical voltage developed at the Schottky junction, but also the polarization of the device and the lifetime of minority carriers.

Furthermore, the rate of recombination at the surface, R , which is an important parameter in the modelling of photo-active devices [13], is given by:

$$R = \frac{N_t K_n K_p (n_s p_s - n_t p_t)}{K_n (n_s + n_t) + K_p (p_s + p_t)} \quad (5)$$

Where K_n and K_p are the capture factors of electrons and holes, respectively; n_s and p_s are the surface concentration of the carriers which take the values n_t and p_t when the Fermi level coincides with that of the traps [13].

2.3 Calculation procedure

The present simulation is based on relations (1) to (5) and the use of MATLAB version R2014b (8. 4. 0. 150421). The first step consists of using the commands of MATLAB to derive I_{DS} (Eq.2) with respect to V_{DS} in order to determine the conductance of the channel. Then, we study the influence of some structural parameters (L_G , a and Z) or GaAs characteristics (N_D and N_T) or the bias voltages (V_{GS} and V_{DS}) on changes in G_D . Finally, the results are plotted, interpreted and compared to literature. Details of the calculations and the sequence of steps are better represented by the flow chart given in appendix 1. The physical and geometrical characteristics of device parameters [11, 14] chosen in this simulation are summarised in Table 1.

The calculation are organized into five steps that consist of:

- i. Introducing the device characteristic parameters: V_{bi} , R_s , R_m , α , λ , K_n , K_p , n_s , p_s , η , μ_n and μ_p .
- ii. Deriving the output current, I_{DS} , with respect to V_{DS} .
- iii. Initializing the parameters (Table.1), calculation and curves' plotting.
- iv. Extracting V_{GSoff} values from $I_{DS} = f(V_{GS})$ curve, then plotting them as a function of P_{OP} .
- v. Using an optimization technique to deduce the universal equations of V_{GSoff} as a function of illumination.

Table 1. Physical and geometrical parameters of the OPFET.

Parameters	Value	Ref
L_G (μm)	1	[11]
Z (μm)	10	[11]
a (μm)	0.2	[11]
R_s (%)	0.1	[14]
R_m (%)	0.1	[14]
N_D (/m ³)	0.5×10^{23}	[11]
N_T (/m ²)	4×10^{17}	[11]
V_{bi} (V)	0.8	[11]
α (m ⁻¹)	10^6	[11]
λ (μm)	0.83	[11]

3. Results and discussions

3.1 Effect of polarization on output conductance

Fig.2.a and Fig.2.b represent the change of output conductance as a function of the optical density for different negative polarizations V_{GS} (from 0 to -300 mV) and different positive polarizations of V_{DS} (100 to 400 mV). It should be noted that this study was carried out in static and ohmic regime. It is clear that regardless of the polarization, the channel conductance increases for small values of the optical density ($P_{op} < 30 \text{ mW/m}^2$) and then undergoes a saturation. Furthermore, for $P_{op} < 10 \text{ mW/m}^2$, this increase is linear. Moreover, we notice that the maximum value of the output conductance ($G_D = 5.8 \text{ m}\Omega^{-1}$ at $P_{op} = 100 \text{ mW/m}^2$) is obtained for $V_{GS} = 0.0 \text{ V}$. However, when V_{GS} increases, in absolute value, the output conductance decreases ($G_D = 3.7 \text{ m}\Omega^{-1}$ at $V_{GS} = -300 \text{ mV}$ and $P_{op} = 100 \text{ mW/m}^2$). On the other hand, for a given optical power (e.g., $P_{op} = 100 \text{ mW/m}^2$), G_D decreases when the applied voltage V_{DS} increases; at $V_{DS} = 100 \text{ mV}$, $G_D = 5.8 \text{ m}\Omega^{-1}$ and at $V_{DS} = 300 \text{ mV}$, $G_D = 4.8 \text{ m}\Omega^{-1}$.

It is important to note that the current flowing between the drain and the source can only cross the active region, known as the conducting channel. The application of an optical density reduces the depth of the depletion region and therefore increases the drain-source current; thus modulating the drain current I_{DS} , by the optical power. This could be origin of G_D variations as a function of applied voltages V_{DS} and V_{GS} which depend on optical density. Moreover, the holes and the electrons generated in the channel contribute to the photoconductive current in the active region. We observe the appearance of an optical current and an optical voltage developed across the Schottky junction. The photonic voltage developed across the space charge region increases with increasing illumination density, in agreement with experimentally reported results [12].

This photonic voltage reduces the width of the space charge zone and accordingly increases the current I_{DS} . Thus, under illumination, both photovoltaic and photoconductive effects increase while the output resistance decreases.

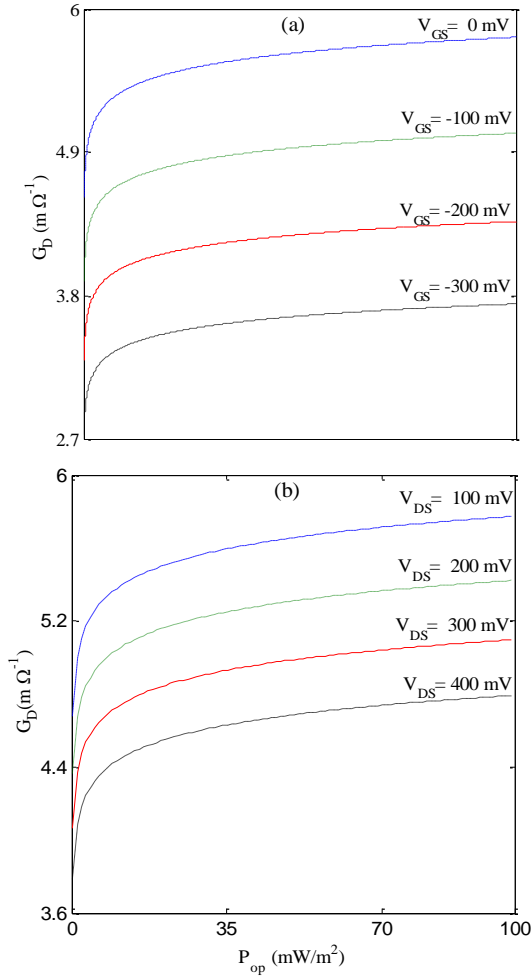


Fig.2. Output conductance versus optical densities: a) at different V_{GS} and $V_{DS} = 100$ mV, b) at different V_{DS} and $V_{GS} = 0$ V.

Consequently, increasing illumination leads to an increase in not only the current flowing through the conducting channel but also in G_D . So we identified two opposite behaviours with respect to the channel width: the effect of polarization (reduction) and illumination (widening) which lead to the saturation at high optical density. To put into evidence the validity of the present results we compare them (Table 2) to those reported in literature [15] for an optical density, $P_{op} = 234$ mW/m² for $L_G = 1$ μm, $Z = 100$ μm and $a = 0.25$ μm; it is clear that the agreement is quite good.

Table 2. Model validation and comparison with literature.

$P_{op} = 234$ mW /m ²			
V_{GS} [V]	V_{DS} [V]	G_D [mho] [Present Work]	G_D [Ref. 15]
-01	0.1	79.95	81.10
	0.2	77.41	78.00
	0.3	74.93	75.10
0	0.1	85.33	84.80
	0.2	82.79	83.50
	0.3	80.31	78.20

3.2 Structure effects

In this section, we focused our investigations on the influence of geometrical parameters namely, the gate length, L_G , and width, Z , and the thickness of the active layer, a , on the output conductance. Then we studied the influence of the conducting channel characteristics: the density of doping and density of surface traps. All the investigations were carried out, in ohmic regime, at different optical intensities.

3.2.1 Geometrical properties

Figs. 3.a. and 3.b. represent the evolution of the output conductance as function of the gate width, Z , and the channel thickness, a , respectively, at different optical densities. A linear increase is noticed with the slope increasing when the optical density increases. This can be attributed to an increase of electrons mobility induced by a large active layer which facilitates the carriers flow.

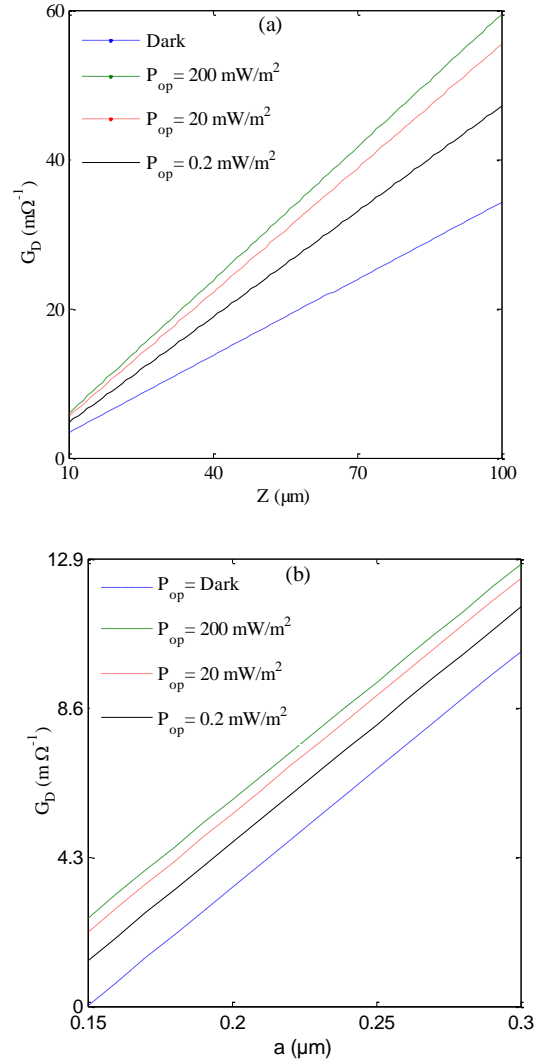


Fig.3. Output conductance, at $V_{DS} = 0.1$ V, $V_{GS} = 0$ V, as a function of gate width (a), channel thickness (b).

The variations of G_D as a function of the gate length, L_G , for different optical densities are shown in Fig. 4, from

which we can deduce that a reduction of L_G leads to an increase in G_D . This result, which is in good agreement with literature [16], can be explained by the reduction of the channel resistance. This behaviour, well known in the MESFETs of short length gates, is attributed to the substantial extension of the space charge zone at the drain side. Moreover, it should be noted that the maximum value of G_D obtained at $L_G = 0.3 \mu\text{m}$ becomes more important for higher optical densities. This is in agreement with previous results mentioning a reduction of the channel resistance when the optical density increases [14].

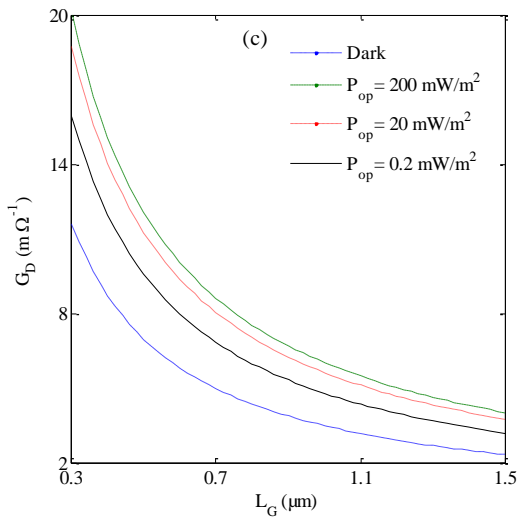


Fig.4. Output conductance, at $V_{DS}=0.1 \text{ V}$, $V_{GS}=0\text{V}$, as a function of gate length (c).

3.2.2 Characteristic parameters of conducting channel

The active layer doping of a MESFET is of great importance in the control of the value of the channel resistance. It is well established that a high doping not only keeps a large ratio between the length and height of the channel, but it also reduces the values of access resistances [17]. Moreover, the high doping reduces the width of depopulated areas and leads to a more important conducting region.

To evaluate the influence of the doping of the active region, N_D , on the output conductance of the illuminated device, we illustrate in Fig. 5.a, the obtained results of G_D versus N_D at different optical densities. It is clear that all the curves show a linear increase with maximum values for the highest doping levels and optical densities.

Furthermore, for a given doping, the conductance increases with the increase of the optical density. This result is due to the fact that any increase of the doping reduces the resistance of the channel and consequently leads to an increase in the output conductance.

To improve the MESFETs performances, it is of great importance to reduce the surface state densities that inevitably exists at the metal/semiconductors interface

when preparing device contacts. The presence of traps in such surface states leads to the appearance of several anomalies during device operations. In this context, we illustrate in Fig. 5.b, the influence of the surface traps density, N_T , on the output conductance at different optical densities. It can be seen that, for all optical densities, the output conductance decreases with increasing N_T . This behaviour confirms the presence of traps especially on the surface which create a space charge zone in the channel; this leads to an increase in the resistances of the source-drain ohmic contacts, and consequently to a decrease in the drain current.

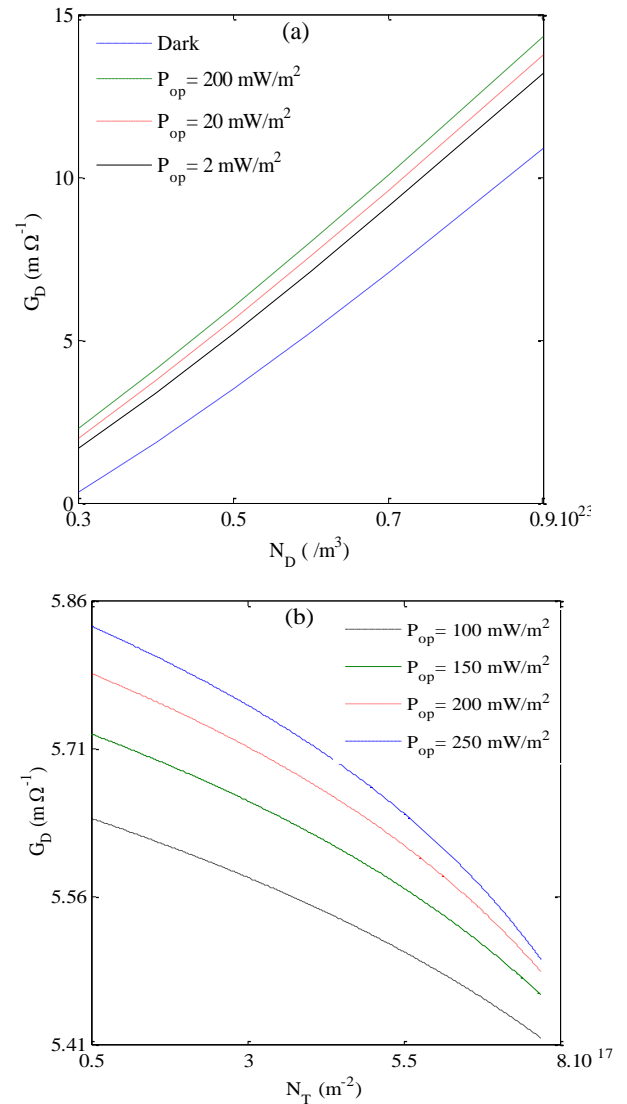


Fig.5. Variations of output conductance with doping concentrations (a) and density of traps (b).

3.3 Quantification of illumination effects on the blocking voltage

The most important phenomenon to consider in the design of a GaAs MESFET is the control of its blocking voltage, V_{GSoff} . Under normal operation, when the device is illuminated, the classic pinch off voltage is modified due the reduction of the width of the space charge zone (caused by

the illumination) and the appearance a photonic tension through the depletion region. Hence, the pinch offvoltage is notonly one of OPFET electrical parameters, but also an important variable forthe optimizationmanufacturing parameters such the channel depth [10]. Thus, to quantify the apparent value of this voltage of the illuminated device, defined as the V_{GS} voltage corresponding to a null output current, I_{DS} , and noted V_{GSoffA} , we carry out a simulation of transfer characteristics $I_{DS} = f(V_{GS})$ at different optical densities. The value of V_{GSoffA} was deduced from $I_{DS} = f(V_{GS})$ characteristics at different optical densities. The obtained results are shown in Fig.6. The curve can be divided into two distinct regions: (i) For low optical densities ($P_{op} < 10 \text{ mW/m}^2$), there is a rapid and linear increase which is better illustrated in the insert of Fig. 6 and (ii) for higher optical densities V_{GSoffA} varies very slowly with P_{op} leading to a saturation region.

Using an optimization technique, the linear region (insert of Fig. 6) may be approximated by the following equation:

$$|V_{GSoffA}| = 9.10^{-3}P_{op} + 0.73 \quad (6)$$

Let us recall that in the absence of illumination, for a constant doping N_D , the voltage V_{GSoff} is given by.

$$V_{GSoff} = V_{bi} - V_p \quad (7)$$

Where V_{bi} is the internal potential and V_p is the pinch-off voltage with:

$$V_p = \frac{qa^2N_D}{2\epsilon}$$

By considering the data in Table1, it is easy to determine:

$$V_p = \frac{qa^2N_d}{2\epsilon} = 1.53 \text{ V}$$

and

$$V_{GSoff} = V_{bi} - V_p = 0.8 - 1.53 = -0.73 \text{ V}$$

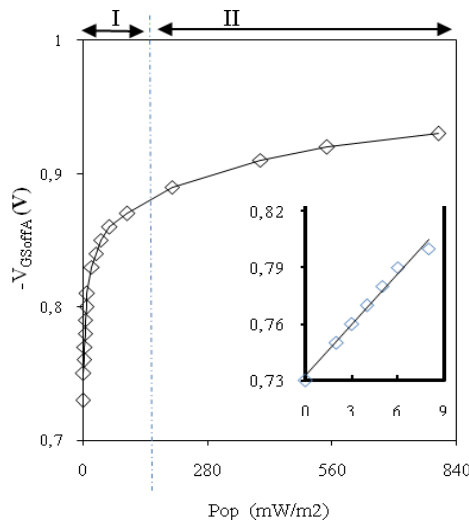


Fig.6. Apparent pinch voltage as a function of optical densities

Thus, relation (6) can be written as:

$$V_{GSoffA} = V_{GSoff} - 9.10^{-3}P_{op} \Rightarrow$$

$$\frac{V_{GSoffA}}{V_{GSoff}} = 1 - \frac{9.10^{-3}}{V_{GSoff}}(P_{op}) \quad (8)$$

The analysis of this relation shows that under dark conditions ($P_{op} = 0$) we get $V_{GSoffA} = V_{GSoff}$. Whereas, under illumination ($P_{op} \neq 0$), we obtain $V_{GSoffA} < V_{GSoff}$. Moreover, as the illumination gets higher the pinch-off voltage becomes lower. Thus, reducing the width of the space charge region and consequently the conducting channel gets larger, in agreement with literature [10].

4. Conclusions

We investigated the influence of optical densities on the output conductance dependence on polarization and structural properties of MESFETs via the development of a program based on physical phenomena governing such devices. The developed a model which treats the data numerically and graphically enabled us to correctly explains all the behaviour of the output conductance. Moreover, it not only led to the determination of the variation of G_D as a function L_G , W , n and N_T , but also to the evolution of the current as a function of V_{GS} at different optical densities thereby determining the apparent blocking voltage introduced by the optical effect. Thus, through this model, a universal formula was established that can be used to control the influence of the optical density on the blocking voltage of a MESFET. The comparison of our results with the literature showed good agreement. Finally, and in order to improve the performance of a MESFET, some results of this study are highlighted:

- The illumination that generates pairs electron - hole pairs (for $h\nu > E_g$) explains the reduction of the width of the space charge zone and thereby the increase of the channel output conductance.
- The reduction of the gate length and the density of surface traps increase the output conductance
- Increasing the channel thickness, the gate width and the doping lead to an increase of the output conductance.
- The relationship determining the variations of the blocking voltage of the MESFET as a function of the illumination is an important universal equation for the prediction of the apparent blocking voltage of an illuminated MESFET.

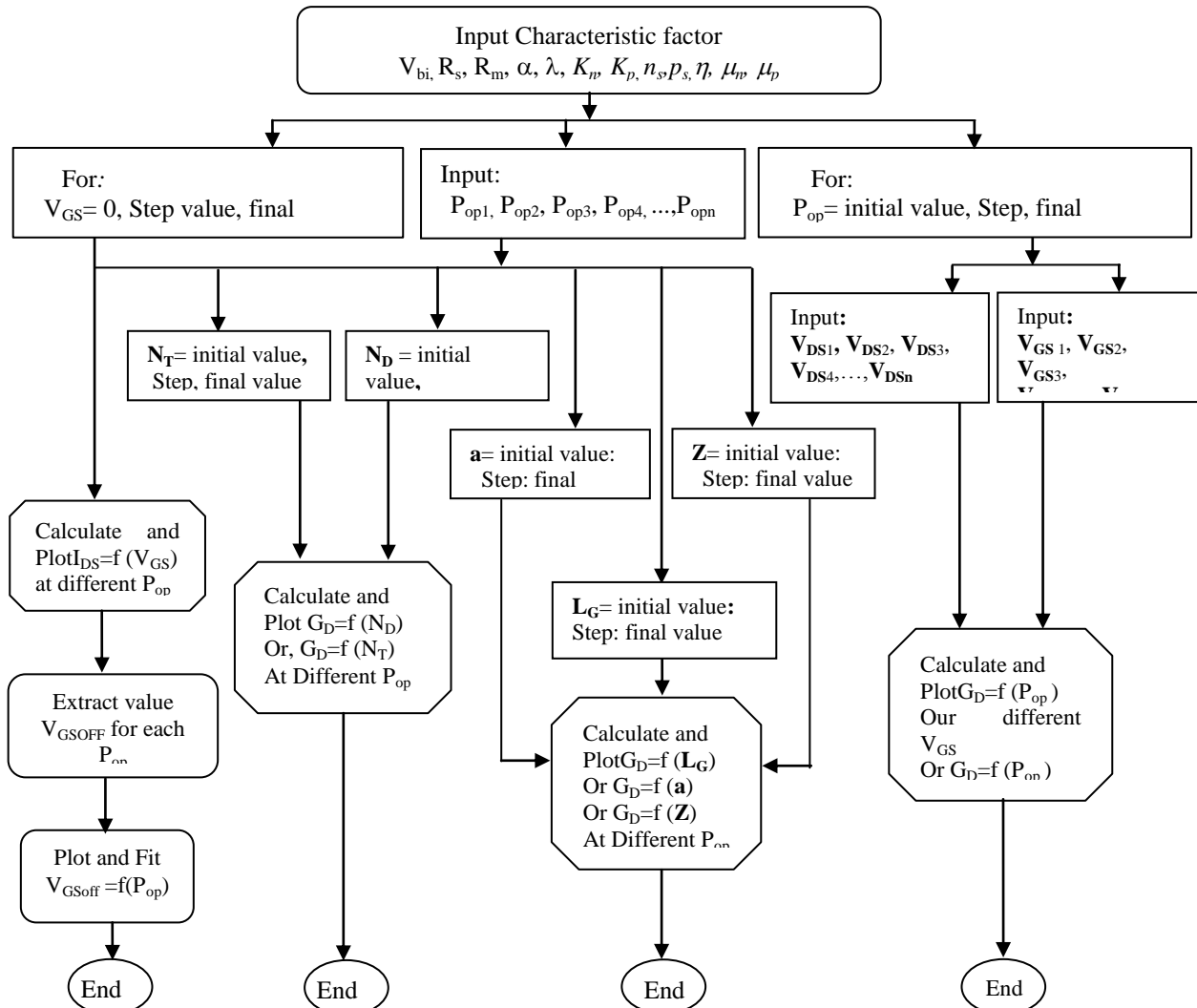
References

- [1] R. G. Walker, J. Heaton, in 'Broad Band Optical Modulators-Science, Technology and Applications', A. Chen and E. J. Murphy, Eds. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 207 (2012).
- [2] A. Karar, C. L. Tan, K. Alameh, Y. T. Lee, F. Karouta, J. Lightwave Technol. **31**, 1088 (2013).

- [3] W. Shi, X. Wang and L.Hou IEEE Trans. Electron.Devices.**60**, 1361 (2013).
- [4] Y. Wen, Y. Wang, K. Watanabe, M. Sugiyama and Y. Nakano, IEEE J. Photovoltaics, **3**, 289 (2013).
- [5] P. C. Schindler, D. Korn, C. Stamatidis, M. F. O’Keefe, L. Stampoulidis, R. Schmogrow, P. Zakyntinos, R. Palmer, N. Cameron, Y. Zhou, R. G. Walker, E. Kehayas, S. Ben-Ezra, I. Tomkos, L. Zimmermann, K. Petermann, W. Freude, C. Koos, and J. Leuthold, J. Lightwave Technol.**32**, 760 (2014).
- [6] Z. Hadjoub, F. Z. Khelifati, D. Nebti, A. Gueraoui and A. Doghmane, J. Optoelectron. Adv. Mater.**15**, 1131 (2013).
- [7] Z. Hadjoub, K. Cheikh and A. Doghmane, Optoelectron. Adv. Mater. -Rapid Commun.**3**, 360 (2009).
- [8] C. Zhao, L. Bie, R. Zhang., and J. Kanicki, IEEE Electron Device Lett., **35**, 75 (2014).
- [9] S.Tripathi and S.Jit, IET Circuits Devices Syst. **109**, 053102 (2013).
- [10] S.N. Chattopadhyay, C. B. Overton, S. Vetter, M. Azadeh, B. H. Olson, and N. El Naga, J. Semicond. Technol. Sci.**10**, 213 (2010).
- [11] P. Chakrabarti, S. K. Shrestha, A. Srivastava, and D. Saxena, IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**42**, 365(1994).
- [12] A. A. A. De Salles, IEEE Trans.Microwave Theory Tech., **MTT-31**, 812 (1983).
- [13] G.J.Rees, Solid-State Electronics **28**, 517 (1985).
- [14] B.K. Mishra, L. Jolly and S.Behra, IJRRAS **9**, 442 (2011).
- [15] Shubha, B. B. Pal, and R. U. Khan, IEEE Trans. Electron Devices **45**, 78 (1998).
- [16] M. Tomizawa, M. Uchida and T.Ugeta, IEEE Trans. Electron Devices**ED4-31**, 435 (1984).
- [17] J. A. Adams, I. G. Thyne, C. D. W. Wilkinson, S . P. Beaumont, N. P. Johnson, A. H. Kean and C. R. Stanley, IEEE Trans. Electron Devices **40**, 1047 (1993).

*Corresponding author: a_doghmane@yahoo.fr

Appendix 1



Flow chart.

© Laboratoire de recherche: semi-conducteurs
Faculté des sciences / Département de physique
Université Badji Mokhtar
Annaba/ALGÉRIE.