



**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ «ABBÈS LAGHROUR» DE KHENCHELA
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE**



Département des Sciences de la Matière

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Filière : Physique

Spécialité : Physique des Matériaux

Intitulé :

Modélisation et simulation des Propriétés optoélectroniques des Composants à Base de Nanotubes de Carbone

Réalisé par :

**-KEZIZ AHCEN
- ZERAOULIA SOUFINE**

Dirigé par : Dr. KHEMISSI SAAD EDDINE

Membres de jury :

<i>NOM</i>	<i>Prénom</i>	<i>Pr.</i>	<i>Président</i>
<i>NOM</i>	<i>Prénom</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>
<i>NOM</i>	<i>Prénom</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>

Présenté le

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

*Avant tous à : **mon dieu***

*À Monsieur **Dr. KHEMISSI Saad Eddine***

*À Monsieur **PR, ADJLOLE ABD ALKAD***

*À tous les membres de ma famille et toute
personne qui porte le nom*

keziz , Zeraoulia , KHEMISSI ,

*Aussi, je dédie ce travail à tous mes chers
amis*

*Arwa, khabtane (hassiba) , redha , abode
yacine , mosa3be , karim , nadhjh ne3ma
3azra, farah, tara9, ahlem, sife, liday, chafia
Ka7louche, sam3ile , ASSIA , netcha*

*À mes Frères : **Ahlem, Zouhie, Anoure***

*À tous les enseignants et toutes les
enseignantes de **Physique des Matériaux***

*À la fin je dédie très chaleureusement ce
mémoire à mon binôme :*

Sofiane zeraoulia

Ahcen ...

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

*Avant tous à mon dieu
(MERCI ALLH)*

*Et à tous les membres de ma famille et toute
personne qui porte le nom*

*KEZIZ, ZERAOULIA, KHEMISSI,
TRIKY*

*Aussi, je dédie ce travail à tous mes chers amis
OMRE, KARAM, HAMZA, DOUDO, bahi
Achrafe, salah, Naoui, ardjoune,
fahima, fatima,
Djamal, fouade, hakim, boudi, akram firasse,
Hanine, Amani, TARKI,*

*À tous les enseignants et toutes les
Enseignantes de Physique des Matériaux*

*À la fin je dédie très chaleureusement ce
mémoire à mon binôme :*

KEZIZ AHCEN

SOUFINE ZERAOULIA



REMERCEMENTS

*En premier lieu, nous tenons à remercier
notre Dieu "Allah",
notre créateur pour nous avoir donné la
force pour accomplir ce travail.*

*Nous adressons nos vifs remerciements à nos
promoteurs*

Mr : Dr. KHEMISSI Saad Eddine.

*Egalement nos remerciements vont à
Membres de jury*

*Nous présentons nos chaleureux remerciements
aux employeurs du département Sciences de la
Matière pour leurs aides et orientations
durant notre formation.*

*Nos derniers remerciements, vont à tous ceux
qui ont contribué de près ou de loin
L'aboutissement de ce travail. Et un merci
tout particulier à mes camarades de la
promotion 2017 physique des matériaux et
promotiom bac (2012,2011, zoui)*




Tableau des tableaux :

Tableau (I.2)	Comparaison de la conductivité thermique des NTC avec celle de d'autres matériaux	(14)
Tableaux (III.1)	Les paramètres utilisés dans l'étude	(46)

Tableau des Figures :

Figure (I. 1)	Structure du graphite hexagonal	(5)
Figure (I. 2)	Structure du diamant	(5)
Figure (I.3)	Structure de graphène	(6)
Figure (I. 4)	Le fullerène C60, C76, C80	(7)
Figure (I. 5)	Structure d'un nanotube de carbone	(8)
Figure (I. 6)	Structure d'un nanotube de carbone avec fullerènes	(8)
Figure (I. 7)	Structure d'un plan de graphène en deux dimensions. Le réseau hexagonal est décrit à partir des deux vecteurs de base \vec{a}_{11} et \vec{a}_{12}	(9)
Figure (I. 8)	Exemple d'une structure de nanotube multi-parois.	(9)
Figure (I. 9)	Schéma de principe de la méthode de synthèse par arc électrique.	(10)
Figure (I. 10)	Schéma de principe de la méthode de synthèse par ablation laser	(11)
Figure (I. 11)	Schéma représentant un réacteur CVD utilisé pour la croissance de nanotubes de carbone	(12)
Figure (I. 12)	Figure I.12. Schéma de bandes d'énergie d'une feuille de graphène ,a) cas métallique, b) cas semi conducteur.	(13)
Figure (I. 13)	Schéma du montage électrique réalisé d'un transistor à base de nanotubes de carbone	(17)
Figure (I. 14)	Diagrammes d'énergie d'un CNTFET MOS-like type N sous deux conditions de polarisation montrant : (a) l'état passant et (b) l'état bloqué	(18)
Figure (I. 15)	Vue en coupe du DG-CNFET. Les flèches rouges et vertes représentent l'effet de la grille avant et de la grille arrière respectivement	(19)
Figure (I. 16)	Coupe transversale du transistor CNTFET à modulation de la hauteur de barrière ou C-CNTFET	(20)
Figure (I. 17)	Profile de la bande de conduction pour un C-CNTFET : (a) et d'un SB-CNTFET, (b) montrant la variation du potentiel de surface en fonction du potentiel appliqué de la grille	(21)
Figure (I. 18)	Diagrammes de bande d'énergie qui expliquent pour le même V_{DS} (a) le comportement de type P donnant lieu à un courant de trous (V_{GS} négatif), (b) le comportement de type N donnant lieu au courant d'électrons (V_{GS} positif).	(22)

Figure (I. 19)	Représentation schématique de la structure d'un SB-CNTFET	(23)
Figure (I. 20)	Représentation schématique des bandes d'énergie du transistor C-CNFET selon l'axe source-drain pour $V_{GS} = 0$ V et $V_{DS} > 0$ V.	(23)
Figure (I. 21)	Représentation schématique d'un OG-CNTFET	(24)
Figure (I. 22)	Représentation schématique de la dynamique de l'effet "Optical Gating" dans un OG-CNTFET	(25)
Figure (I. 23)	Intensités de photoluminescence des trois échantillons de nanotubes en fonction de leur degré de purification.	(27)
Figure (I. 24)	Gain optique dans les CNT	(28)
Figure (I. 25)	Intensité de l'émission spontanée amplifiée en fonction de la longueur du faisceau d'excitation pour différentes énergies de pompe	(29)
Figure (II. 1)	a) Représentation schématique d'un OG-CNTFET b) Caractéristiques IDS-VGS d'un OG-CNTFET sans et sous illumination	(30)
Figure (II. 2)	Représentation schématique de la dynamique de l'effet "Optical Gating" dans un OG-CNTFET.	(35)
Figure (II. 3)	Validation du modèle expérimental de l'absorption optique de P3OT	(36)
Figure (II. 4)	Simplification du réseau de condensateurs dans la zone effective pour la modélisation optique	(39)
Figure (II. 5)	Bilan schématique des charges qui modulent le potentiel du canal dans l'OG-CNTFET	(41)
Figure (III.1)	Logiciel utilisés : a) Fortran Power Station version 4.0, b) Origine version 6.1	(42)
Figure (III.2)	Organigramme de calcul.	(43)
Figure (III.3)	Réseau des caractéristiques courantes tensions I_{ds} - V_{ds} du composant étudié.	(46)
Figure (III.4)	Variation du courant de drain en fonction de la tension de grille pour plusieurs valeurs de la tension de drain.	(47)
Figure (III.5)	Réseau des caractéristiques I_{ds} - V_{ds} « Description des trois zones de fonctionnement ».	(47)
Figure (III.6)	Effet de longueur de grille sur le réseau des caractéristique I_{ds} - V_{ds} du CNTFET	(48)
Figure (III.7)	Influence du diamètre de CNT sur les caractéristiques I_{ds} - V_{ds} du CNTEFT.	(49)

Figure (III.8)	Effet de l'épaisseur de l'oxyde sur les caractéristique I_{ds} - V_{ds} du CNTEFT	(50)
Figure (III.9)	Effet de la tension de seuil sur les caractéristique I-V du CNTEFT.	(51)
Figure (III.10)	Relation puissance optique- courant lumineux produit dans l'OG-CNTEFT	(52)
Figure (III.11)	Effet de la longueur d'onde du Laser sur le courant lumineux dans l'OG-CNTEFT étudié.	(53)
Figure (III.12)	Effet de largeur de la zone effective sur le courant lumineux du CNTFET.	(54)
Figure (III.13)	Effet du diamètre du spot lumineux sur le courant lumineux du CNTFET.	(54)
Figure (III.14)	Effet de la gaussienne σ sur le courant lumineux du CNTFET.	(55)
Figure (III.15)	Comparaison entre le courant de drain total (au-dessus) et le courant de drain dans l'obscurité (au-dessous) : (a) pour $V_{gs} = 0,4$ V et (b) pour $V_{gs} = 0,8$ V.	(56)
Figure (III.16)	Influence du courant optique sur la caractéristique I_{ds} - V_{gs} pour $V_{ds} = 0,4$ V	(57)
Figure (III.17)	Figure III-17 : Caractéristique $I_{t,} = f(V_d)$ pour différentes valeurs de puissances optiques.	(58)
Figure (III.18)	Effet de largeur de la zone effective sur le courant lumineux du CNTFET.	(58)

Liste des abréviations:

CNT :	Nanotube carbone
MWNT :	nanotube multicouche
MWNTs :	Les nanotubes multicouches
SWNT :	Le nanotube de carbone mono-paroi
CVD :	Chemical vapor desposition
HiPco :	High Pressure Carbone Monoxide
CNTFET :	Transistors à nanotube de carbone
CNTFETs :	Les Transistors à nanotube de carbone
FET :	Transistors à effet de champ
DG- CNTFET :	Transistors à nanotube de carbone à double grille
OG-CNTFET :	Transistors à grille commandé optiquement
SB-CNTFET :	Transistors à barrière Schottky
C-CNTFET :	Transistors à modulation de hauteur de barrière
MOSFET :	Metal Oxyde Semi-conductor Field Effect Transistor
MESFET :	Metal Semiconductor Field Effect Transistor
MISFET :	Metal Isolant Semi-conductor Field Effect Transistor
HEMT :	Hight Electron Mobility Transistor
CMOS :	Complentary MOS
P_3O :	film mince de poly (3-octylthiophène)
SGM:	Scanning Gate Microscopycomme
SPCM:	Scanning PhotoCurrent Microscopy
GAA :	gate all around
p-FET :	P type Fieled effect transistors
n-FET :	N type Fieled effect transistors

Tableau de Symbole

Symbole	Définition	La valeur +unité usuelle
*	bande de conduction	/
	bande de valence	/
i	nombre entier	/
\vec{C}_h	vecteur de chiralité	$ \vec{C}_h = nm$
m, n	nombres entiers	/
\vec{a}_1, \vec{a}_2	les vecteurs de base dits unitaires du maillage hexagonal	$\vec{a}_1 = \vec{a}_2 = 0,246nm$
a_{C-C}	distance entre deux atomes de carbone	$0.142n$
θ	angle d'hélicité	degré
d_C	diamètre du nanotube	nm
k	Vecteur d'onde	nm
Φ^0_f	potentiel de canal	V
α_0	maximum de la gaussienne	0,0366
\vec{T}	vecteur de translation	$ \vec{T} = nm$
N	N est le nombre de paires de carbone dans la cellule unitaire	
λ_0	longueur d'onde centrale	nm
h	Constant de Planck	$6,62606957 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
γ	Le coefficient fixe la largeur	$1,45 \times 10^{14} \text{ nm}^{-2}$
n_t	densités des électrons photo-générés piégés	/
$n_p - g$	densités paires d'électron-trou photo-générées	/
$rate_s$	taux de séparation des paires d'électron-trou photo-générées	S

Tableau de Symbole

A_e	aires de la zone effective des pièges d'interface	nm
Δ_P	le bas de la pième sous-bande de conduction (ou le haut de la pième sous-bande de valence pour les trous)	eV
Δ_1	1ère sous-bande	eV
$E(k)$	énergie	eV
g_0	densité d'état métallique	eV
Cox	capacité de la couche d'oxyde	
A_S	taille du spot lumineux	nm
T(E)	coefficient de transmission	/
fS (E) et fD (E)	fonctions de Fermi côté source et côté drain respectivement	/
$D_N (E)$	la densité d'états	eV
K_{II}	la conductance	$\mu A / V$
ϵ_0	la permittivité du vide	F/nm
k_r	la permittivité relative de l'oxyde	F/nm
μ	mobilité	$cm^2/V.s$
T	température	K
e	Charge élémentaire	$1.602 \cdot 10^{-19} C$
d	diamètre	nm
L	Longueur de grille	nm
V_{th}	Tension de seuil	V
P_o	puissance optique	V
e_o	l'épaisseur de la couche d'oxyde	nm
L	Longueur de grille	nm
P_L	puissance lumineuse	W

Tableau de Symbole

ν_L	la fréquence	HZ
λ_L	longueur d'onde	nm
I_0	Courant optique	A
W_e	largeur de la zone effective	nm
S	surface de la couche d'oxyde	cm ²
d_s	le diamètre du spot lumineux	nm
V_g	Tension grille-source	V
V_d	Tension drain-source	V
V_L	potentiels de laseri	V
V_G	Tension grille	V
V_d	Tension drain	V
ΔQ	densité de charge	eV
$I_{d(s)}$	Courant saturation	A
C_D	les capacités électrostatiques du côté drain	F/nm ²
C_S	les capacités électrostatiques du côté source	F/nm ²
I_t	Courant totale	A

Sommaire

Sommaire :

<i>Introduction générale</i>	(1)
<i>CHAPITRE 01 : Etude bibliographique</i>	
<i>I.1.Introduction</i>	(4)
<i>I.2.Le Carbone</i>	(4)
<i>I.2.1.Les formes classiques du carbone</i>	(4)
I.2.1.a.Le graphite	(4)
I.2.1.b. Le diamant	(5)
I.2.2.Les nouvelles formes du carbone	(6)
<i>I.2.2.a. Le graphène</i>	(6)
<i>I.2.2.b. Fullerènes</i>	(6)
<i>I.3. Les nanotubes de carbone</i>	(7)
I.3. 1.Structure géométrique	(7)
<i>I.3. 1.a. Le nanotube de carbone mono-paroi</i>	(7)
<i>I.3. 1.b. Nanotubes multicouches(MWNT)</i>	(9)
<i>I.4.Méthodes de synthèses</i>	(10)
I.4.a. L'arc électrique	(10)
I.4.b. L'ablation laser	(10)
I.4.c. Le dépôt chimique en phase vapeur CVD	(11)
I.4.d. Croissance catalytique en phase gazeuse HiPco	(11)
<i>I.5. Propriétés des nanotubes de carbone (CNT)</i>	(12)
I.5.a. Propriétés électroniques	(12)

I.5.b. Propriétés optoélectroniques	(14)
I.5.c. Propriétés mécaniques	(14)
<i>I.5.c.1. La dureté</i>	(14)
<i>I.5.c.2. L'élasticité</i>	(15)
I.5.d. Propriétés Thermiques	(15)
<i>I-6. Transistors à nanotube de carbone (CNTFET)</i>	(15)
I.6.1.Définition et types de FET	(15)
I.6.2.Les transistors FET à base de nanotubes de carbone (CNTFET)	(16)
I.6.3.Structure d'un CNTFET	(16)
I.6.4. Principe de fonctionnement du transistor CNTFET	(17)
I.6.5. Différents types de CNTFET	(18)
<i>I.6.5. a.Transistors à double grille (DG- CNTFET)</i>	(18)
<i>I.6.5. b .Transistors à modélisation de hauteur de barrière (C-CNTFET)</i>	(19)
<i>I.6.5. c . Transistors barrière Schottky (SB-CNTFET)</i>	(20)
<i>I.6.5. d .Transistors à grille commandé optiquement (OG- CNTFET)</i>	(24)
I.6.5. d.1 .Le principe du fonctionnement	(24)
<i>I.7. Une nouvelle photonique à base de nanotubes de carbone</i>	(25)
<i>I.7.1.Nouvelles propriétés optiquesdes nanotubes semi-conducteurs</i>	(25)
<i>I.7.2. Gain optique</i>	(27)
<i>I.7.3. Vers le laser à nanotubes de carbone</i>	(28)
<i>CHAPITRE 02 : Modélisation des caractéristique courants-tensions d'un OG-CNTFET</i>	
<i>II.1.Introduction</i>	(30)

<i>II.2. Description générale de l'OG-CNTFET</i>	(30)
<i>II.3. Modélisation des caractéristiques statiques du transistor OG-CNTFET</i>	(31)
<i>II.3.1 : Caractéristiques I-V dans l'obscurité</i>	(31)
<i>II.3.1.a. Relation de dispersion dans les CNT</i>	(31)
<i>II.3.1.b. Calcul de la densité de charge</i>	(32)
<i>II.4. Modulation du canal par l'illumination</i>	(34)
<i>II.4.1 Analyse de la modulation optique</i>	(35)
<i>II.4.2. Modélisation de la modulation optique</i>	(36)
<i>II.4.2.a .Modélisation de l'absorption optique de P3OT</i>	(36)
<i>II.4.2.b. Modélisation des pièges d'électron à l'interface P3OT/SiO₂</i>	(37)
<i>II.4.2.c Modélisation de la source de courant dépendante de la puissance optique</i>	(37)
<i>II.4.2.d Modélisation de la "commande optique" avec l'effet mémoire non volatile</i>	(38)
<i>II.5.Courant total</i>	(40)

CHAPITRE 03 : Résultats et interprétations

<i>III.1.Introduction</i>	(42)
<i>III.2.Logiciel de simulation</i>	(42)
<i>III-3. Caractéristiques courant tension I-V</i>	(44)
<i>III-3. 1. L'effet des paramètres sur les caractéristique I-V du CNTEFT dans l'obscurité</i>	(48)
<i>III-3. 1. a. L'influence de longueur de grille</i>	(48)
<i>III.3.1.b. Effet de variation du diamètre de nanotube de carbone</i>	(49)
<i>III.3.1.c. L'influence de l'épaisseur de l'oxyde sur les caractéristiques I-V</i>	(50)
<i>III.3.1.d. L'influence de la tension de seuil sur les caractéristiques I-V</i>	(50)

<i>III-4. L'effet des paramètres sur courant lumineux (courant optique)</i>	(51)
<i>III-4. a. L'effet de la puissance optique sur courant lumineux</i>	(52)
<i>III -4. b. L'effet de longueur d'onde de laser sur courant lumineux</i>	(52)
<i>III-4. c. L'effet de la surface ($S=L *W_e$.[nm²]) sur courant lumineux</i>	(53)
<i>III-4. d. L'effet de diamètre du spot lumineux et l'effet de la gaussienne sur courant lumineux</i>	(54)
<i>III-5. L'effet des paramètres sur courant totale</i>	(55)
<i>III-5. 1. L'effet de la puissance optique sur le courant total</i>	(57)
<i>III-5. 2.'effet de longueur d'onde sur le courant total</i>	(57)
<i>III-6. Conclusion</i>	(59)
Conclusion générale	(60)
BIBLIOGRAPHIE	(62)

Introduction générale

Introduction générale :

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

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

Les transistors à effet de champ sont toujours parmi les composants électroniques omniprésents dans notre vie quotidienne, ils jouent un rôle très important dans la nouvelle technologie. Ils résident au cœur de la révolution qui a porté une grande part de développement technologique de très haut niveau [1].

Historiquement, le principe de fonctionnement des transistors à effet de champ a été décrit pour la première fois par W. Shockley en 1952 [2]. Il repose sur la modulation du courant passant entre les électrodes de drain et de source. Cette modulation est commandée par la tension appliquée sur l'électrode latérale de grille. Ce dispositif présente l'avantage d'être unipolaire : un seul type de porteurs participe à la conduction du courant.

Les premiers transistors à effet de champ ont été réalisés en silicium (Si). Ce semi-conducteur présente de nombreux avantages pour la réalisation de composants électroniques : structure cristalline simple, peu onéreux, facile à réaliser, existence d'un oxyde de silicium isolant... . Cependant le silicium permet des fréquences d'utilisation maximales de l'ordre de quelques gigahertz. Afin de disposer de composants pouvant fonctionner à des fréquences plus élevées, le silicium a été remplacé par les nanotubes carbonés, qui possèdent des propriétés électroniques, thermiques, optoélectroniques et mécaniques remarquables plus élevée que le silicium.

Le choix des nanotubes carbonés comme un matériau permettant d'obtenir de très hautes performances pour réaliser les circuits intégrés et les appareils électroniques de futur, n'est pas uniquement lié à ses propriétés physiques et chimiques très intéressantes, aussi les caractéristiques plus marquantes de ce dernier, est leur aptitude selon leur diamètre et leur chiralité, à être soit métallique soit semi-conducteur. Ils sont l'unique matériau dans la nature à posséder cette propriété, la périodicité induite par l'enroulement du graphène sur lui-même entraîne une quantification des vecteurs d'ondes électroniques, cette propriété alliée à leur taille nanométrique

A partir de la découverte de la nature semi-conductrice des nanotubes de carbone, et grâce à leurs dimensions nanométriques et leurs caractéristiques électriques typiques, ce matériau devient le premier candidat pour remplacer le silicium dans la technologie MOS en futur proche.

Le transistor à nanotube de carbone (en anglais CarbonNanoTube Field Effect Transistor : CNTFET) a été cité pour la première fois en 1998 par deux groupes de chercheurs. Le premier est issu de l'université de Delft au Pays-Bas et le deuxième appartient à la multinationale américaine IBM (International Business Machine) [3]

Pour mieux exploiter les qualités de ces transistors et avant toute réalisation, il est nécessaire de mettre au point des techniques de conception des systèmes utilisant ce dispositif. Ces techniques seront basées sur des méthodes de calculs numériques sophistiqués utilisant en particulier la dépendance entre les caractéristiques électriques, statiques et dynamiques des dispositifs et les paramètres géométriques et technologiques des composants.

Ainsi l'objectif de notre travail est de présenter une étude sur la modélisation et la simulation des propriétés des composants à base de nanotube de carbone (transistor à base nanotube carbone à effet de champ), Ce travail comportera les chapitres suivants :

Le premier chapitre rappelle tout d'abord la structure et les propriétés électroniques, thermiques et optoélectroniques des nanotubes de carbone suivi d'une analyse des différents procédés de fabrication, Ensuite la structure et le principe de fonctionnement de quelques types de transistors CNTFET sont présentés et expliqués, et enfin, ce chapitre termine par un coup-d'œil sur la nouvelle photonique à base de nanotubes de carbone et de transistors de type OG-CNTFET.

Le deuxième chapitre traite la modélisation physique du transistor à grille commandé optiquement (OG- CNTFET). Dans ce cadre nous avons présenté au début la structure et le

principe de fonctionnement de ce composant, et ensuite le traitement mathématique des caractéristiques courant tension, des caractéristiques optoélectroniques et enfin l'influence de l'excitation lumineuse sur la performance du composant.

Le troisième chapitre a été réservé exclusivement pour la présentation et l'interprétation des résultats de la simulation. Le chapitre est commencé au premier temps par la présentation du logiciel établie suite par la présentation des caractéristiques courant tension du dispositif simulé à l'obscurité, puis la présentation aussi des caractéristiques optoélectronique du composant ainsi l'influence des différents paramètres géométriques et technologique sur ces caractéristiques, ensuite en termine par une représentation de l'influence de l'excitation lumineuse sur la performance du composant OG-CNTFET.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale et perspective du sujet abordé au cours de ce mémoire.

Chapitre I :

Etude bibliographique

I.1. Introduction

Dans le premier chapitre de ce manuscrit, nous avons présenté tout d'abord une étude bibliographique sur les nanotubes de carbone (CNT), et leurs applications en générale, et les transistors à effet de champ à base de nanotubes de carbone CNTFET en particulier. Des notions de base nécessaires sur le carbone, les nanotubes de carbone et leurs propriétés chimiques, physiques, mécaniques, électroniques et optoélectroniques sont présentés au cours de ce chapitre, ainsi que une brève présentation des transistors à base de nanotubes de carbone (CNTFET) et leurs structure, leurs principe de fonctionnement, leurs types et leurs nouvelles applications, et ensuite à la fin de ce chapitre un coup d'œil sur la nouvelle photonique à base de CNT a été aussi présentée et expliquée.

I.2. Le Carbone

Élément fondamental de la vie, le carbone est un atome capable de se lier d'une manière variée à un grand nombre d'atomes différents, ce qui lui permet d'offrir des possibilités de synthèse multiples. Cette versatilité est due à sa structure électronique particulière : $1s^2 2s^2 2p^2$. Ses orbitales atomiques sont capables de s'hybrider avec d'autres atomes de carbone ou des hétéroatomes, pour former des orbitales moléculaires de type sp^1 , sp^2 ou sp^3 , ce qui confère au carbone un caractère bi-, tri-, ou tétravalent. Il est donc possible de rencontrer des structures carbonées monodimensionnelles, bidimensionnelles, ou tridimensionnelles. La seule forme thermodynamiquement stable du carbone est le graphite hexagonal. Les autres formes allotropiques du carbone sont métastables dans les conditions normales de température et de pression. Les formes traditionnelles du carbone sont le graphite, le diamant, les carbones mal organisés. De nouvelles formes du carbone ont été récemment découvertes, tels que les fullerènes, les nanotubes multi feuillets, les nanotubes mono feuillets [4].

I.2.1. Les formes classiques du carbone :

a) Le graphite :

Le graphite présente une structure lamellaire constituée d'un empilement de feuillets. Chaque feuillet, ou plan de graphène est constitué d'atomes de carbone en état d'hybridation sp^2 , formant un réseau hexagonal de paramètre de maille 0,246 nm, la longueur de la liaison C-C étant de 0,142 nm. Il existe deux façons d'empiler les plans de graphène sur eux-mêmes, résultant en deux formes cristallines différentes de graphite. La forme cristalline stable est le

graphite hexagonal [5]. Les plans de graphène sont empilés, comme sur la (figure I.1) La distance inter-feuillets est de 0,334 nm.

b) Le diamant :

Le diamant est une forme allotropique tridimensionnelle du carbone. Dans le diamant, les atomes de carbone sont en état d'hybridation sp^3 , et donc tétravalents. Il existe plusieurs structures cristallines du diamant [6], comme le diamant hexagonal, mais la structures la plus courante est de loin le diamant cubique (figure I.2). La maille de cette structure est de type cubique faces centrées, avec un paramètre de maille de 0,356 nm, et une distance interatomique de 0,154 nm.

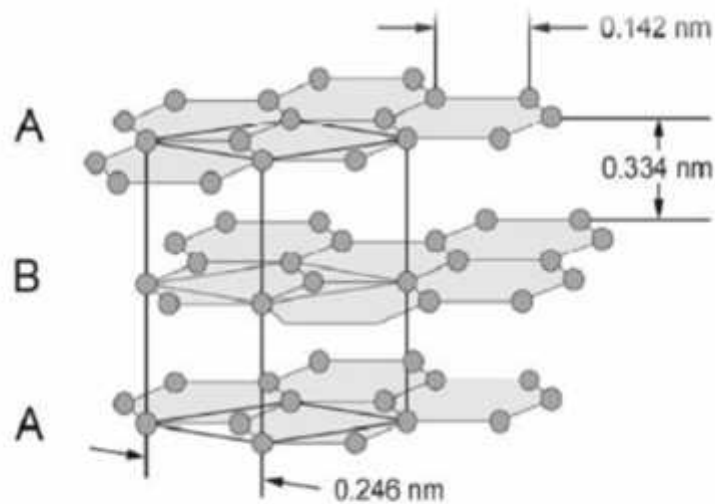


Figure I.1. Structure du graphite hexagonal [5]

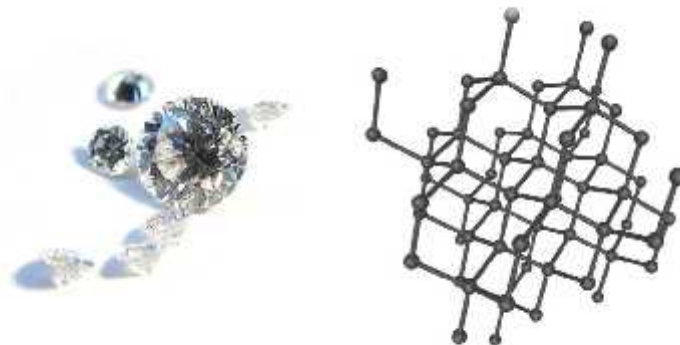


Figure I.2. Structure du diamant [6]

I.2.2. Les nouvelles formes du carbone :

a) Le graphène :

Le graphène est le nom que l'on donne à un plan de graphite lorsqu'il est isolé. Il possède donc également une structure hexagonale avec des liaisons de type sp^2 . Le graphène est à mi-chemin entre le graphite et le nanotube. Jusqu'à récemment, il était seulement un objet théorique, permettant notamment de modéliser les propriétés des nanotubes. Depuis quelques années, des techniques expérimentales permettant de l'isoler, ont été mises au point et l'étude expérimentale est devenue possible. Il est ainsi, depuis quelques années, l'objet d'un intérêt croissant. Le graphène peut être considéré comme un matériau bidimensionnel (2D) parfait (Figure I.3), puisqu'il n'est constitué que d'un seul plan d'atomes (une couche plane d'atome) [7].

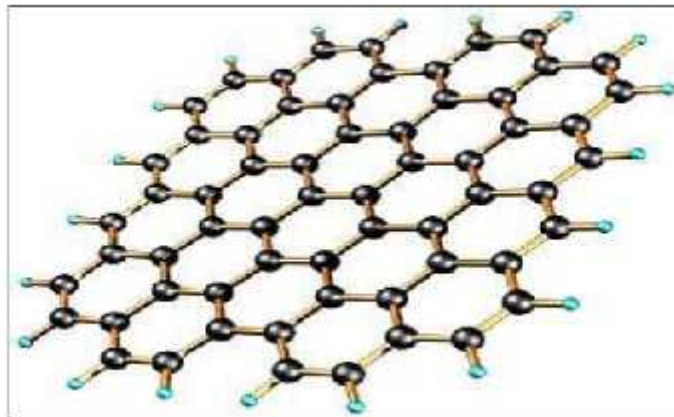


Figure I.3. Structure de graphène [7].

b) Fullerènes :

Les premiers fullerènes ont été synthétisés en 1985, il s'agit de petites molécules symétriques composées de plusieurs dizaines d'atomes de carbones, et sont agencés suivant un mélange d'hexagones (similaires à la structure des plans de graphite) et de pentagones [5]. Le plus couramment étudié est le fullerène C₆₀, composé de plus de 60 atomes de carbone, 20 hexagones et 12 pentagones, tel un ballon de football (Figure I.4). Dans ces structures, chaque atome a trois voisins comme dans le cas du graphite, mais du fait de la courbure, les liaisons ne sont pas purement de type sp^2 , mais sont en fait un mélange sp^2 et sp^3 . Grâce à leur symétrie, les fullerènes C₆₀ ont un module d'incompressibilité supérieur à celui du diamant [8,9].

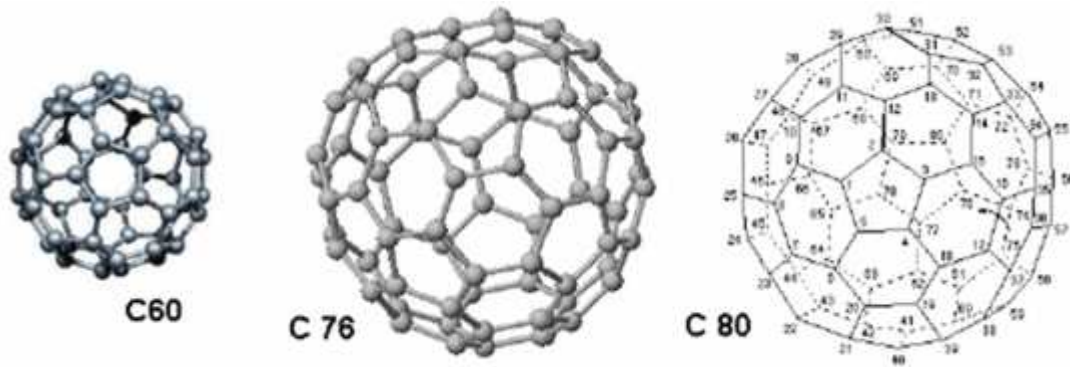


Figure I.4. Le fullerène C60, C76, C80. [8]

I.3. Les nanotubes de carbone:

I.3.1. Structure géométrique :

Si le CNT est constitué d'un seul feuillet de graphène, on parle de nanotube mono-feuillet (SWNT, pour Single Wall Nanotube ou nanotube mono paroi), et s'il est constitué de plusieurs couches, on parle de nanotubes multi-parois (MWNT, pour Multi Wall Nanotubes ou nanotubes multi-feuillets) [10,11].

a) Le nanotube de carbone mono-paroi :

Le nanotube de carbone mono-paroi peut être vu comme l'enroulement d'une forme stable de feuille de graphène sur elle-même produisant ainsi un cylindre (Figure I.5). La structure de ce nanotube est déterminée par le couple de nombres entiers (n,m) définissant un vecteur caractéristique de l'enroulement appelé vecteur de chiralité :

$$\vec{C}_n = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2 \quad (1)$$

Les vecteur \vec{a}_1 et \vec{a}_2 sont les vecteurs de base dits unitaires du maillage hexagonal. Sachant que la distance a_{C-C} entre deux atomes de carbone voisin est $a_{C-C} = 0.142n$, on a $|\vec{a}_1| = |\vec{a}_2| = 0,246nm$. Ainsi, le diamètre du nanotube, en nm, s'écrit :

$$d_C = 0,246 * \frac{\sqrt{n^2 + m.n + m^2}}{\pi} \quad (2)$$

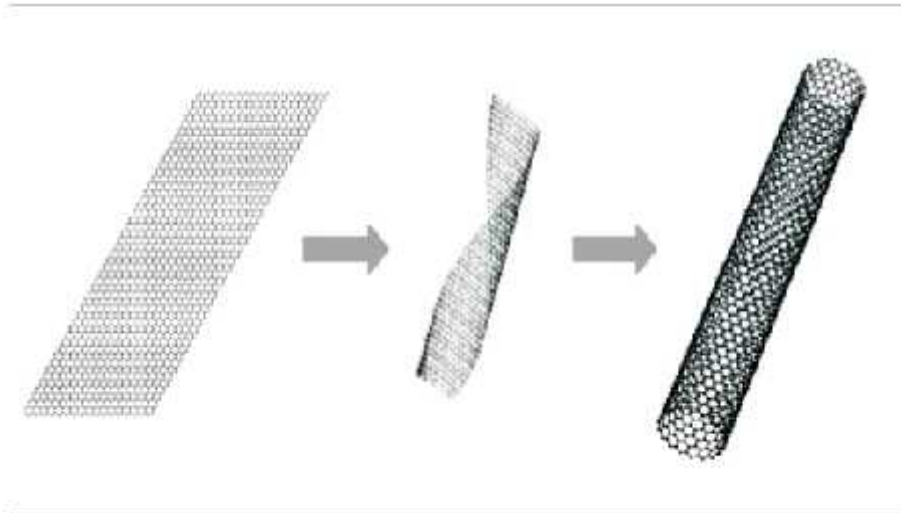


Figure I.5. Structure d'un nanotube de carbone [8].

Ainsi en connaissant l'amplitude de \vec{a}_1 et \vec{a}_2 , on peut déduire la circonférence du tube puis son diamètre [13]. On peut aussi connaître l'angle d'hélicité caractérisant l'enroulement de la feuille de graphène. Cet angle est formé par le vecteur \vec{C}_n et le vecteur de base \vec{a}_1 et il est exprimé par [14].

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{3}m}{m+2n}\right) \quad (3)$$

C'est suivant la valeur de cet angle d'hélicité (compris entre 0 et 30°) qu'on peut déterminer le type des nanotubes de carbone mono-paroi. En réalité, la plupart des nanotubes sont statistiquement chiraux c'est-à-dire qu'ils sont superposables à leurs images par symétrie miroir. Toutefois, il existe d'autres nanotubes possédant des symétries distinctifs :

-On parle de tubes "armchair" (Figure I.6) lorsque l'angle est égal à 30° ce qui se traduit par des indices chiraux égaux (n, n).

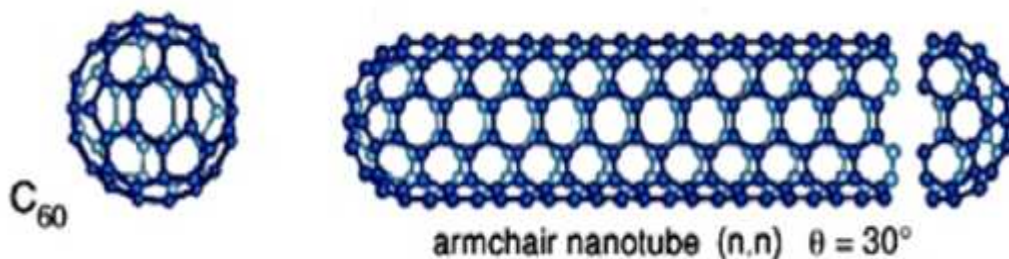


Figure I.6. Structure d'un nanotube de carbone avec fullerènes [12]

-On parle de tubes "zigzag" lorsque l'angle est nul et l'un des indices chiral est nul (n, 0).

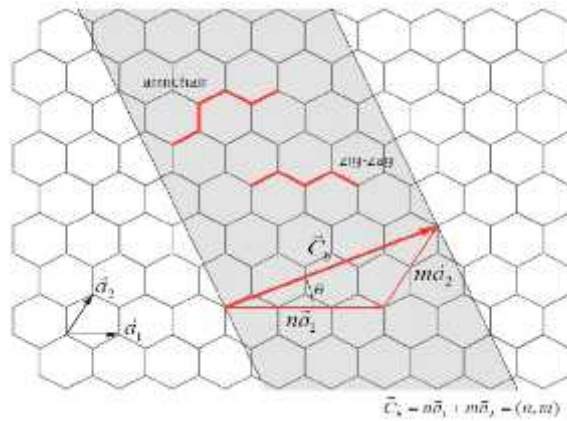


Figure I.7. Structure d'un plan de graphène en deux dimensions. Le réseau hexagonal est décrit à partir des deux vecteurs de base \vec{a}_{11} et \vec{a}_{21} [15].

b) Nanotubes multicouches(MWNT):

Les nanotubes multicouches (ou MWNT, Multi Walled Carbone Nanotube) (Figure I.8) sont constitués de plusieurs tubes concentrique n'ayant pas la même chiralité, créant ainsi une structure turbostratique. En effet, on appelle graphite turbostratique un empilement désordonné de plans de graphènes. La distance entre les couches dans les MWNTs est de l'ordre de 3,4 Å, ce qui est proche de la distance inter plants dans le graphite.

Les nanotubes multicouches ont un diamètre variant bien entendu avec le nombre de feuillets: entre 2 et 25nm, pour une longueur allant de 20 à 80 µm.

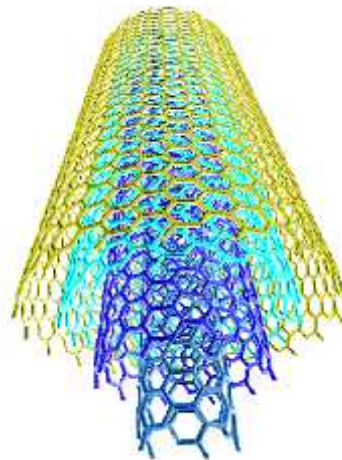


Figure I.8. Exemple d'une structure de nanotube multi-parois.

I.4. Méthodes de synthèses

Aujourd'hui y a plusieurs techniques de synthèse des CNTs, tels que: arc électrique, ablation laser, et CVD (chemical vapor deposition). Ces méthodes permettent de produire des MWNTs ou SWNTs en grande quantité ou avec des diamètres précis. Certaines sont déjà commercialisées et les autres sont en voie d'améliorer notamment s'agissant du rendement de la production.

a) L'arc électrique :

Son principe est basé sur la création d'une décharge entre deux électrodes de graphite sous atmosphère inerte. Les hautes températures engendrées entre ces électrodes durant le processus entraînent la sublimation du graphite. En creusant un trou dans l'anode en son centre, on peut y introduire un mélange de métaux finement divisés et de poudre de graphite.

Un grand nombre de paramètres tels que la nature des catalyseurs et leurs concentrations, la pression et la nature de l'atmosphère inerte, le courant ou encore la géométrie du réacteur interviennent lors de la production (Voir la figure I.9) [16-18].

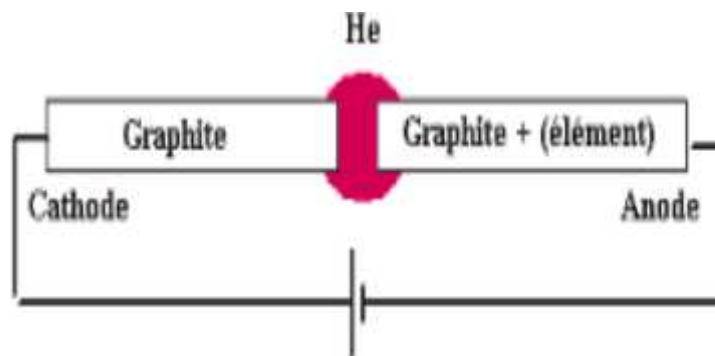


Figure I.9. Schéma de principe de la méthode de synthèse par arc électrique.

b) L'ablation laser :

Une seconde technique performante pour la synthèse de nanotubes monocouches est l'ablation laser. Rappelons que l'ablation laser fut historiquement la première méthode pour générer des fullerènes en phase gazeuse. La sublimation du carbone est provoquée par un laser pulsé et focalisé à la surface d'un disque de graphite sous un flux de gaz inerte. La cible de graphite est placée au centre d'un four permettant de contrôler la température autour de

1200°C. Les vapeurs de carbone sublimé sont entraînées jusqu'à un collecteur où elles se condensent (Figure I.10) [16, 19,20]

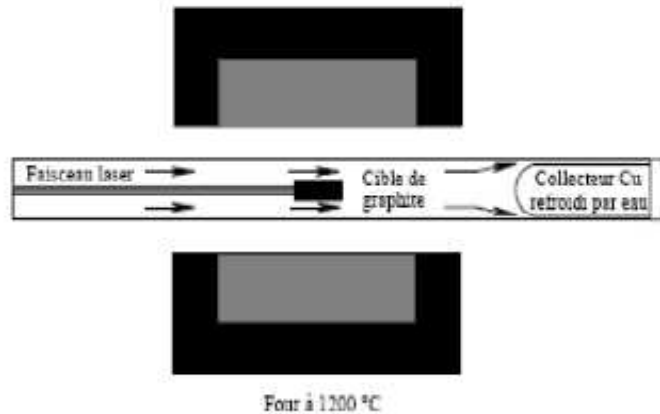


Figure I.10. Schéma de principe de la méthode de synthèse par ablation laser

c) Le dépôt chimique en phase vapeur CVD :

Le principe d'élaboration de nanotubes de carbone par CVD (Chemical Vapor Deposition) repose sur la décomposition d'un gaz carboné à la surface d'une particule catalytique nanométrique. Dans cette méthode, des hydrocarbures (CH_4 , C_6H_6 ...) et de l'hydrogène sont mis en présence de catalyseurs métalliques (Fe, Co, Ni...), le tout dans un four porté à haute température ($> 700\text{C}$). Les nanotubes se forment alors sur les plots de catalyseurs. L'un des avantages de cette méthode est que les nanotubes se forment de façon continue (contrairement à la méthode d'ablation laser par exemple). Nous pouvons espérer trouver des conditions expérimentales permettant de fabriquer des nanotubes purs avec un contrôle parfait du diamètre et de la chiralité. Par ailleurs, trois paramètres principaux gouvernent la croissance de nanotubes de carbone dans ce procédé : le catalyseur, le gaz injecté, et la température [21,22].

d) Croissance catalytique en phase gazeuse HiPco:

Le procédé de croissance catalytique de nanotube de carbone en phase gazeuse (HiPco Pour High Pressure Carbone Monoxide) a été développé par l'équipe de R.E. Smalley de Rice University en 1998. Le principe est d'injecter un flux de monoxyde de carbone avec un précurseur catalytique en phase gazeuse dans une enceinte sous haute pression (30-50 atm) et haute température (900-1100°C). Dans ces conditions, le catalyseur se décompose sous forme

de nanoparticules de fer. Puis le monoxyde de carbone réagit et produit du dioxyde de carbone plus un atome de carbone à la surface de catalyseur. Comme pour le mécanisme de CVD, les atomes de carbone se déplacent au bord des nanoparticules du catalyseur et forment des SWNTs. En ajustant les paramètres du procédé, le rendement de la production sélective de SWNT peut atteindre pratiquement 100% ; le diamètre de nanotube peut être réduit jusqu'à 0,7 nm. Une start-up de R.E. Smalley "Carbone Nanotechnologies Inc." améliore ce procédé et fournit des SWNTs en quantité importante et avec une pureté élevée pour les industries et les recherches électroniques, ainsi que pour les applications biomédicales et énergétiques [7].

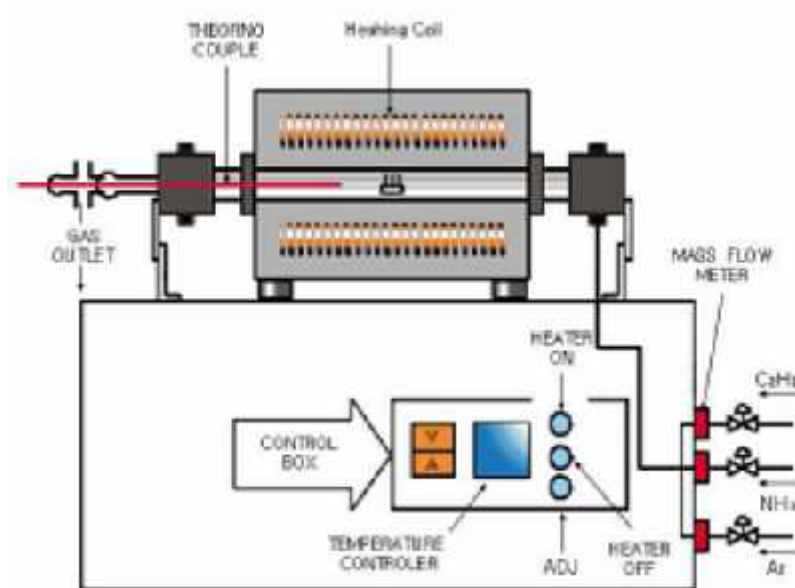


Figure I.11. Schéma représentant un réacteur CVD utilisé pour la croissance de nanotubes de carbone [21,22]

I.5. Propriétés des nanotubes de carbone (CNT) :

Depuis leur découverte, les nanotubes ont révélé d'extraordinaires propriétés physiques qui ont motivé de très nombreuses études scientifiques. Un grand nombre d'applications ont d'ores et déjà été envisagées.

a) Propriétés électroniques :

Les propriétés électroniques remarquables des nanotubes de carbone mono-paroi permettent de fabriquer montages et composants comme des interconnexions et des via par les métalliques [23] ou des diodes [24] et des transistors selon leur nature métallique ou semi-

conductrice. Un nanotube mono-paroi peut être semiconducteur ou métallique selon sa chiralité. Comme le montre le diagramme des bandes d'énergie du graphène représenté dans la figure (I.12) [25]. Dans la zone de Brillouin, la bande de conduction * et la bande de valence convergent aux points K et forment des vallées. Au point K, la différence entre les deux bandes décrit la bande interdite du nanotube. Selon la vue en coupe, si les courbes des deux bandes se croisent ou si la différence est inférieure à quelques dizaines de MeV, alors le nanotube présente des propriétés métalliques, sinon, le CNT présente des propriétés semiconductrices. Le niveau de Fermi se situe dans le milieu de la bande interdite d'un nanotube semiconducteur.

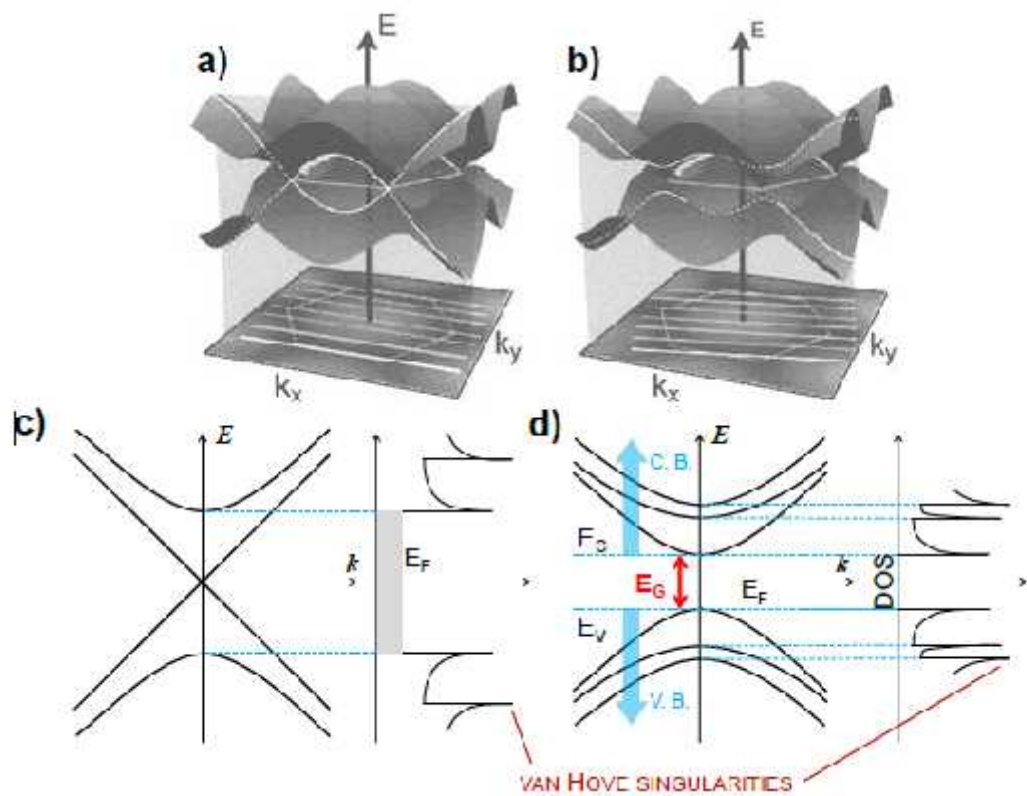


Figure I.12. Schéma de bandes d'énergie d'une feuille de graphène [25],
a) cas métallique, b) cas semi-conducteur.

On note ici, que les propriétés électroniques des nanotubes de Carbone dépendent de la chiralité (n,m) selon les relations suivantes :

- Lorsque $n = m$, le nanotube est métallique ;

- Lorsque $n - m = 3i$ (avec i est un entier), le nanotube a une faible bande interdite, on considère qu'il a un comportement métallique ;
- Lorsque $n - m \neq 3i$, le nanotube est semiconducteur.

b) Propriétés optoélectroniques:

Les nanotubes de carbone de type semi-conducteur sont à bande interdite direct, cette condition est favorable aux dispositifs optoélectroniques. Pour l'émission de lumière, il est intéressant d'utiliser des transistors à nanotubes ambipolaires étant donné qu'ils permettent la présence de courant de trous et d'électrons simultanément.

Pour des canaux (distance que les porteurs de charge doivent parcourir) suffisamment longs où le taux d'interactions est important, le courant de recombinaison est maximal [26]. L'émission de lumière vient alors d'un point particulier du canal qui peut être déplacé en modifiant l'une des tensions appliquées. Les courants de trous et d'électrons sont situés dans les bandes de valence et de conduction respectivement: Les nanotubes de carbone peuvent être photo luminescents et photoconducteurs, l'absorption d'un photon génère un exciton qui peut réémettre un photon (photoluminescence), ou en présence d'une polarisation, générer et séparer des paires électron-trou (photoconduction) [26].

L'émission de champ requiert un (ou des) nanotube(s) verticaux. Les électrons sont émis par l'extrémité du nanotube. Une grille, placée au-dessus du nanotube et percée pour laisser passer les électrons, permet de générer le champ électrique nécessaire. À partir de ce principe, il est possible de fabriquer des réseaux de dispositifs à émission de champ des amplificateurs micro-ondes et des canons à électrons [27].

c) Propriétés mécaniques :

Les nanotubes de carbone présentent une très grande rigidité, comparable à celle de l'acier, tout en étant extrêmement légers. Les principales caractéristiques sont [28]:

La dureté

La résistance mécanique des nanotubes de carbone devrait être (théoriquement) environ 200 fois supérieure à celle de l'acier pour un poids 6 fois moindre (à section équivalente) grâce à leur géométrie hexagonale qui permet une répartition uniforme des contraintes et des déformations. Ces propriétés varient aussi selon la nature du nanotube. Les nanotubes multi-feuillets sont beaucoup plus résistants que les nanotubes mono-feuillets [28].

L'élasticité

L'élasticité est la contrainte mécanique qui engendre un allongement de 100% de la longueur initiale d'un matériau (il double donc de longueur). Le nanotube se déforme de façon permanente, ou se casse, bien avant que cette valeur soit atteinte [29]. Le nanotube de carbone présente une grande élasticité et une grande flexibilité [30].

d) Propriétés Thermiques

Les nanotubes de carbone possèdent une conductivité thermique fortement anisotrope, comprise entre 1800 et 6600 W.K-1.m-1. Ainsi les nanotubes de carbone sont cinq fois plus conducteurs que le cuivre et trente fois plus que le fer (Voir le tableau suivant), ce qui en fait de bons candidats pour la dissipation de chaleur dans les circuits électroniques.

	Conductivité thermique (W /m .k)	Echelle
MWCNT	1800-3000	Nanométrique
SWCNT	2500-6600	Nanométrique
Fer	80	Massif
Or	317	Massif
Cuivre	485	Massif
Diamant	1000	Massif

Tableau (I. 1.) : Comparaison de la conductivité thermique des CNT avec celle d'autres matériaux [31].

I-6. Transistors à nanotube de carbone (CNTFET):

I.6.1. Définition et types de FET [32]

Le principe physique des transistors à effet de champ FET (Field Effect Transistors) a été inventé en 1952 par W. Shockley. Le transistor à effet de champ est un dispositif unipolaire où seuls les porteurs majoritaires interviennent dans le fonctionnement. Les électrons présentant les propriétés de transport (mobilité, vitesse et coefficient de diffusion) les plus intéressantes, donc les FETs fabriqués sont essentiellement de type N. Principalement il y a trois structures des transistors à effets de champ correspondant à différents contacts de grille:

- Grille à jonction PN pour le transistor **JFET** (**J**unction **F**ield **E**ffect **T**ransistor),
- Grille métallique isolée pour les transistors **MOSFET** (**M**etal **O**xyde **S**emi-conductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor) et **MISFET** (**M**etal **I**solant **S**emi-conductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor),
- Grille métallique à barrière Schottky pour les transistors **MESFET** (**M**etal **S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor) et **HEMT** (**H**igh **E**lectron **M**obility **T**ransistor).

I.6.2. Les transistors FET à base de nanotubes de carbone (CNTFET)

A partir de la découverte de la nature semi-conductrice des nanotubes de carbone, et grâce à leurs dimensions nanométriques et leurs caractéristiques électriques typiques, ce matériau devient le premier candidat pour remplacer le silicium dans la technologie MOS en futur proche.

Le transistor à nanotube de carbone (en anglais Carbon NanoTube Field Effect Transistor CNTFET) a été cité pour la première fois en 1998 par deux groupes de chercheurs. Le premier est issu de l'université de Delft au Pays-Bas et le deuxième appartient à la multinationale américaine IBM (International Business Machine) [33]

I.6.3. Structure d'un CNTFET

Un nanotube, déposé sur un substrat isolant (SiO_2 sur Si), relié à deux contacts, se comporte comme un transistor à effet de champ (FET) dans lequel le courant entre les deux contacts est modulé par une tension de grille extérieure. La conductivité peut être modulée sur plus de cinq ordres de grandeur. Depuis cette première démonstration des FET à base de nanotubes de carbone, d'immenses progrès ont été réalisés afin d'améliorer leurs caractéristiques électriques. Un des inconvénients de l'expérience était la composition de la grille constituée d'une épaisse couche d'oxyde de silicium. Bachtold et al [34] ont remplacé la couche d'oxyde de silicium par une mince couche d'alumine (Al_2O_3) déposée sur une grille en aluminium, ce qui a permis de minimiser la tension de grille, et d'augmenter la transconductance. Une étape supplémentaire a été franchie par Wind et al en utilisant un dispositif avec une grille en surface (ou top gate) : ils ont fabriqué le premier transistor de type MOSFET à base de nanotube. L'amélioration de la géométrie de la grille a permis d'augmenter le champ électrique du nanotube, et le bon choix du matériau de contact peut diminuer les résistances ohmiques.

Un transistor à effet de champ comprend deux électrodes “source” et “drain” connectées par un SWNT (Figure I.13). Le nanotube joue le rôle de canal. Une troisième électrode, la grille, est séparée du canal par un film isolant mince. En fonction de la position

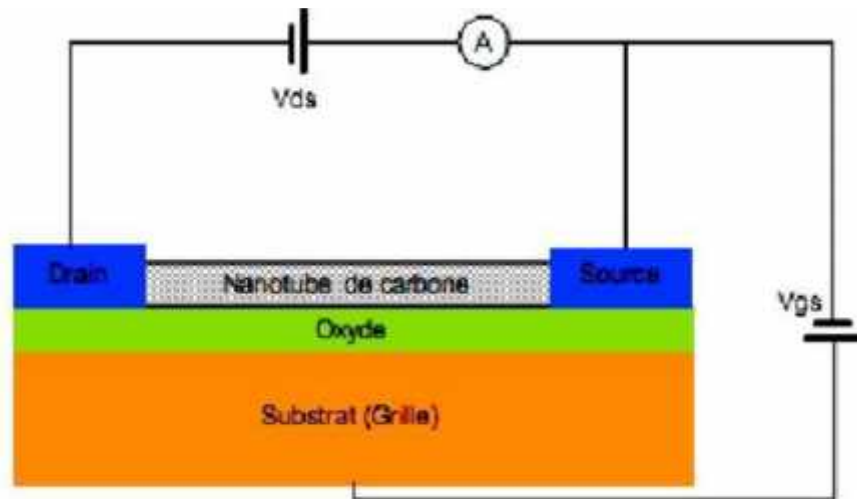


Figure I.13. Schéma du montage électrique réalisé d'un transistor à base de nanotubes de carbone [34].

I.6.4. Principe de fonctionnement du transistor CNTFET

Le principe de fonctionnement du transistor à effet de champ à base de nanotube de carbone (Carbon Nanotube Field Effect Transistor pour CNTFET) est très similaire à un MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) en considérant le remplacement du matériau de canal pour profiter du transport balistique dans le CNT. La représentation schématique du transport d'électron montrant le vecteur d'onde dans un CNTFET de type N est présenté figure 1.14 selon l'évolution du schéma des bandes d'énergie en fonction de la polarisation. Dans cette représentation schématique, le drain et la source sont supposés être des contacts ohmiques avec le canal du nanotube. La polarisation de la grille module le potentiel électrique du canal pour autoriser ou bloquer le transport d'électrons. Du fait de la similitude de comportement avec le MOSFET, ce transistor est souvent appelé CNTFET à modulation de hauteur de barrière ou MOS-like CNTFET. Cependant, le transport dans le CNTFET diffère par rapport à celui dans le MOSFET puisque dans des conditions de longueur du canal inférieure ou proche du libre parcours moyen des électrons, le transport électronique dans le CNTFET se caractérise par un fort taux de balisticité supérieur à 80% [35]

[36]. En effet, dans les CNTFETs de type N, les électrons injectés côté drain et côté source contribuent au courant balistique selon la direction du vecteur d'onde longitudinal, $-k$ ou $+k$, respectivement. C'est-à-dire que les deux contributions sont de même nature mais de sens opposé. Dans les CNTFETs de type P, le même principe le fonctionnement est valable avec un transport de trous dans la bande de valence.

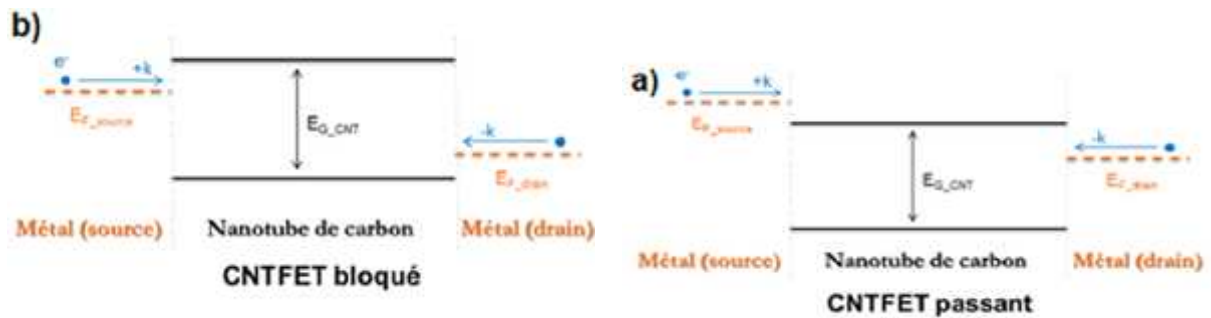


Figure 1.14. Diagrammes d'énergie d'un CNTFET MOS-like type N sous deux conditions de polarisation montrant : (a) l'état passant et (b) l'état bloqué [35] [36].

I.6.5. Différents types de CNTFET:

Dans cette section, nous allons présenter les différents types de CNTFET qui ont été réalisés. Actuellement, il y a quatre structures possible de fabriquer pour le CNTFET: le CNTFET à modulation de hauteur de barrière, Transistors à barrière Schottky (SB-CNTFET) et le CNTFET à double grille. En outre, on peut avoir le Transistors à grille commandé optiquement (OG- CNTFET).

La différence entre le principe d'opérations de ces différents structures de CNTFET réside dans la forme adoptée pour la grille et de la nature du courant (tunnel ou thermoïnique). Dans les paragraphes de suit, nous allons présenter ces différents types et expliquer leurs régimes de fonctionnement.

a) Transistors à double grille (DG- CNTFET):

Le CNTFET à double grille (Double Gate CNTFET, comme DG-CNTFET) possède une grille avant supplémentaire placée entre les accès source et drain et en dessous du nanotube de carbone.

Une fine couche d' Al_2O_3 d'environ 4 nm existe entre cette grille avant en Aluminium (Al) et le nanotube [37]. En effet, le principe de fonctionnement de ce type de transistor repose sur l'idée de faire doper électro-statiquement les zones d'accès pour avoir une configuration **n/i/n** ou **p/i/p** comme dans le cas du CNTFET à modulation de la hauteur de barrière (Figure I.16). Ce dopage électrostatique des zones d'accès du nanotube est assuré par le champ électrique créé par la polarisation de la grille arrière alors que sa partie interne est écranté par la grille avant.

La conception de transistor à effet de champ double grilles est envisageable avec un canal à nanotube ou avec un canal en silicium. Un exemple de FET "gate all around" (ou GAA) double grille est représenté Figure I.15 [38]. Cependant, il est technologiquement difficile de fabriquer des transistors en silicium fonctionnant en régime balistique, puisque le libre parcours moyen est inférieur à 20 nm à température ambiante. Dans ce cas, la lithographie limite le dépôt et la gravure de la deuxième grille. Par contre, grâce au libre parcours moyen élevé dans le nanotube, il est parfaitement possible de concevoir des circuits logiques avec des CNTFETs double grille. Un prototype a été développé avec un canal de 100 nm et une grille avant de 40 nm [39].

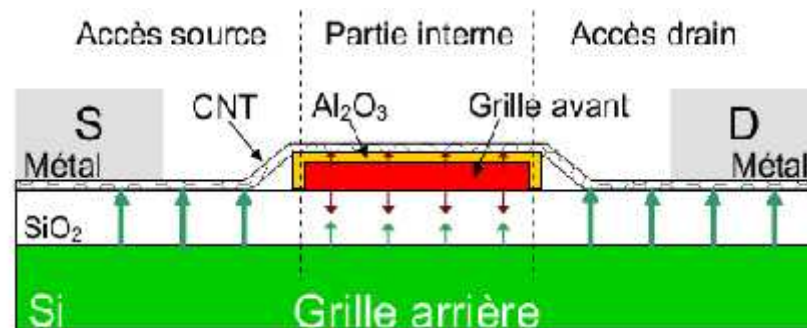


Figure I.15. Vue en coupe du DG-CNFET. Les flèches rouges et vertes représentent l'effet de la grille avant et de la grille arrière respectivement [38].

b) Transistors à modulation de hauteur de barrière (C-CNTFET):

Le transistor à nanotube de carbone à modulation de la hauteur de barrière ou aussi CNTFET conventionnel (C-CNTFET) est réalisé à partir d'un nanotube de carbone mono-paroi ayant un dopage de type **n/i/n** ou **p/i/p** [40,41].

Il est très similaire à un transistor MOSFET (Metal- Oxide- Semiconductor Field Effect Transistor) en considérant le remplacement du matériau de canal par un nanotube de carbone pour profiter du transport balistique des CNT (Figure I-16).

Du fait de la similitude de comportement avec le MOSFET, ce transistor est souvent appelé MOS-like CNTFET. Cependant, le transport dans le CNTFET diffère par rapport à celui dans le MOSFET puisque dans des conditions de longueur du canal inférieure ou proche du libre parcours moyen des électrons, le transport électronique dans le CNTFET se caractérise par un fort taux de mode balistique supérieur à 80% [35,36].

Le contact entre le métal de source ou de drain et le nanotube est supposé ohmique ou avec une hauteur de barrière faible [42,43], améliorée par rapport au transistor à nanotube à barrière Schottky.

Les extrémités du nanotube, à proximité des contacts de source et de drain, servent d'accès aux porteurs tandis que la partie interne, dont la position des bandes d'énergies est modulée par la polarisation de grille, bloquera ou non le passage des porteurs.

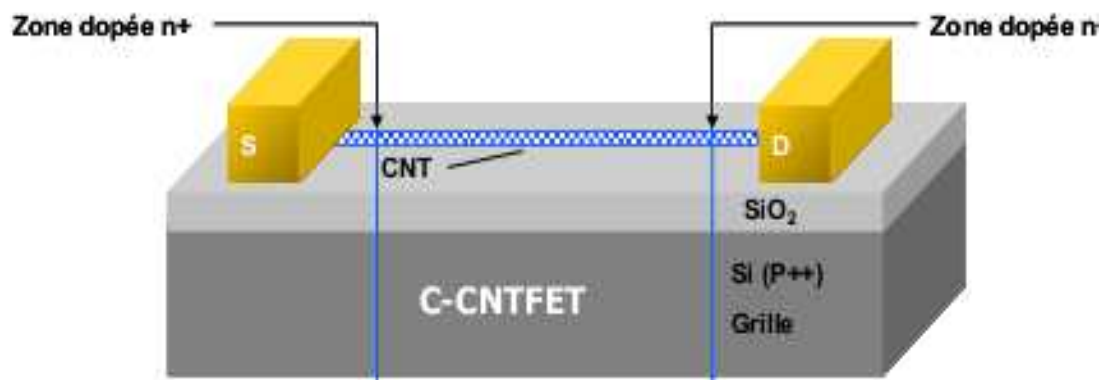


Figure 1.16. Coupe transversale du transistor CNTFET à modulation de la hauteur de barrière ou C-CNTFET [44].

c) Transistors à barrière Schottky (SB-CNTFET):

Un transistor à nanotube de carbone est formé de deux contacts de type métal/nanotube côté source et drain. La nature du métal peut être soit en aluminium (Al), titane (Ti), palladium (Pd) ou scandium (Sc), le platine (Pt) est rarement utilisé puisqu'il présente une mauvaise

mouillabilité avec les nanotubes de carbone [45] c'est-à-dire il présente une faible énergie d'adhésion.

Au niveau des interfaces formées par le contact métal et le nanotube semi-conducteur, des barrières de potentiel Schottky sont formés et s'opposent à la transition des porteurs entre source et drain via le canal nanotube. Ainsi, ces barrières ont un rôle important dans la détermination du courant puisqu'elles déterminent le nombre des porteurs présents côté métal et transmis dans le canal [46].

Ainsi, pour mettre en évidence la présence de ces barrières Schottky dans les transistors à nanotube de carbone, Freitag et al [47] ont observé ces barrières en employant deux différents procédés de microscopie : la microscopie à grille ajustable (en anglais : Scanning Gate Microscopy comme SGM) [48] et la microscopie de photo-courant à balayage laser (Scanning PhotoCurrent Microscopy comme SPCM) [49]. Dans ces expériences de microscopie, les nanotubes de carbone utilisés ont un diamètre de 1–2 nm et ils sont synthétisés par CVD du substrat en silicium avec une couche de sur 100–200 nm d'oxyde. Selon Freitag et al [47], pour assurer une bonne mouillabilité du métal de type Palladium (Pd) des accès source et drain aux nanotubes de carbone, une fine couche ($\sim 7\text{\AA}$) de Titane (Ti) a été ajoutée. La hauteur de la barrière Schottky résulte de la différence entre le travail d'extraction métal et l'affinité électronique de nanotube qui est fonction de la chiralité (ou diamètre). Pour avoir une relation directe entre la hauteur de la barrière Schottky et les travaux d'extractions métal et nanotube, on a intérêt à utiliser des hauteurs de barrières Schottky à mi-gap.

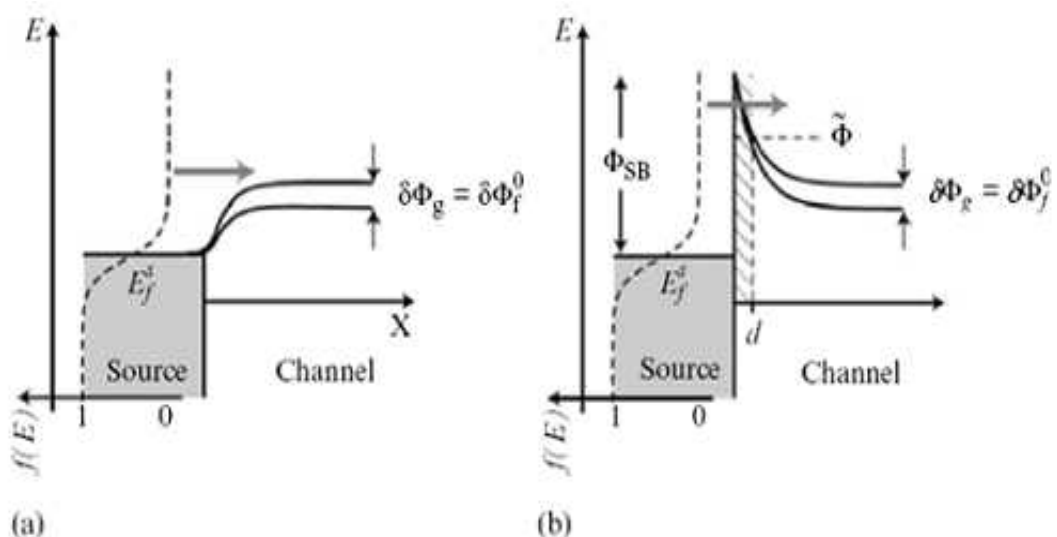


Figure I.17. Profile de la bande de conduction pour un C-CNTFET : (a) et d'un SB-CNTFET, (b) montrant la variation du potentiel de surface en fonction du potentiel appliqué de la grille [51].

Dans un CNTFET à modulation d'hauteur de la barrière, c'est le potentiel de canal de nanotube, notée ici Φ_f^0 , qui détermine le flux du courant dans le canal à l'interface métal/nanotube. Les électrons qui ont une énergie supérieure à Φ_f^0 contribuent au courant total. Une variation du potentiel de la grille modifie le potentiel de canal Φ_f^0 et module la quantité de porteurs contribuant au courant [50].

Dans le cas des SB-CNTFET, la situation est différente : un changement dans le potentiel de la grille change le potentiel du canal Φ_f^0 mais modifie également la forme des barrières Schottky de source et drain qui déterminent l'injection des porteurs (Figure I.17).

Un changement de la polarisation de la grille ou du drain change le potentiel de canal Φ_f^0 mais fait aussi varier les dimensions (hauteur et largeur) des deux barrières Schottky. D'une façon générale, le profile de bandes d'énergie proche du contact dépend fortement des polarisations V_G et V_D (Figure I-18)

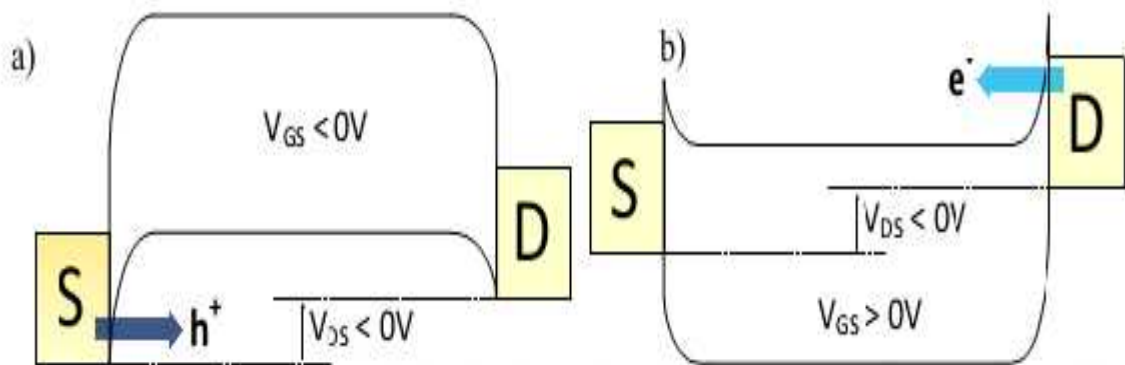


Figure I.18. Diagrammes de bande d'énergie qui expliquent pour le même V_{DS} , (a) le comportement de type P donnant lieu à un courant de trous (V_{GS} négatif), (b) le comportement de type N donnant lieu au courant d'électrons (V_{GS} positif).

Dans la figure suivante (I.19), nous avons présenté une structure de SB-CNTFET en configuration "back-gate" et ensuite dans la figure I.20 nous avons présenté un schéma des bandes d'énergie (pas de barrières Schottky) du transistor C-CNFET selon l'axe source-drain

pour $V_{GS} = 0$ V et $V_{DS} > 0$ V. $E_{F,S}$ et $E_{F,D}$ sont les niveaux de Fermi des métaux de source et drain respectivement.

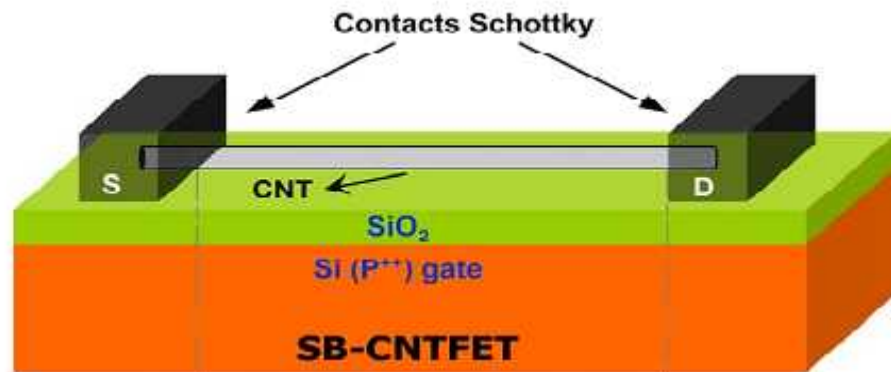


Figure I.29. Représentation schématique de la structure d'un SB-CNTFET.

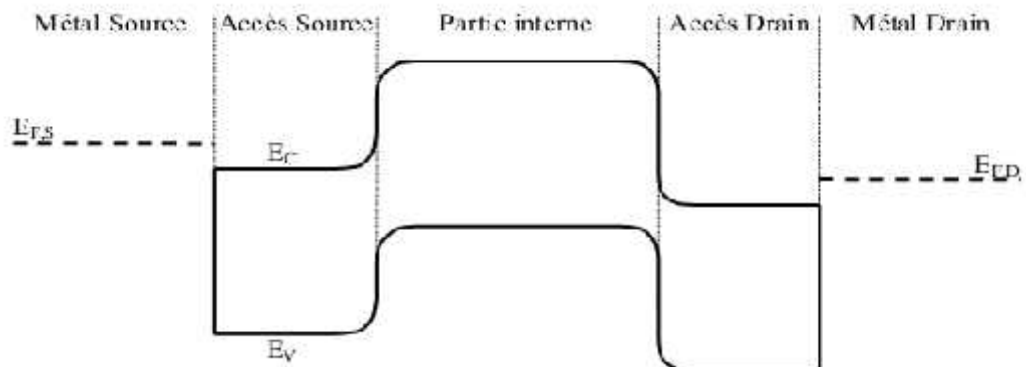


Figure I.20. Représentation schématique des bandes d'énergie du transistor C-CNFET selon l'axe source-drain pour $V_{GS} = 0$ V et $V_{DS} > 0$ V.

Un exemple de procédé de fabrication qui se veut proche du procédé plan utilisé pour les MOSFETs [52]. Le canal en CNT est réalisé par dépôt à la place de l'épitaxie dans le procédé CMOS (Complementary MOS). Ensuite, les électrodes drain et source sont déposées. Selon la nature du métal et le diamètre du nanotube, le contact est de type N ou P. Par exemple, les électrodes sont en Al dans une réalisation de n-FET [53]. Un autre exemple, les électrodes sont en Au dans un p-FET [54]. Le diélectrique de la grille est déposé localement par CVD. Puis le métal de grille est déposé.

Ce procédé de fabrication conduit à la configuration "grille avant" (top gate). Dans la configuration "grille arrière" (back gate), la grille est souvent réalisée (en Si fortement dopé ou en Al) avant l'oxyde qui est réalisé par croissance in situ. Grâce à la facilité apparente de ce procédé de fabrication, le CNTFET pourrait être compatible avec la technologie CMOS actuelle.

d) Transistors à grille commandé optiquement (OG- CNTFET):

L'OG-CNTFET est fabriqué à base d'un CNTFET avec la grille arrière de type P. Le diélectrique de grille est l'oxyde de silicium réalisé à partir de croissance thermique locale (Figure I-21). Cela permet d'obtenir une couche de SiO₂ locale en grande qualité diélectrique. Un film mince de poly (3-octylthiophène) (P₃O) est déposé sur tout le wafer par la technique "spin-coating" avec une épaisseur d'environ 5 nm [55]. P₃O) est un polymère photosensible qui est souvent utilisé dans les applications de conversion d'énergie solaire en électrique [56,57]. Sous l'illumination, des électrons photo-générés modulent le canal de l'OG-CNTFET pour une durée de plus d'une journée. Ce transistor peut donc être considéré la fois comme un composant optoélectronique et à la fois comme une mémoire non-volatile.

Le principe du fonctionnement

Le principe du fonctionnement de l'OG-CNTFET est similaire. Quand un OG-CNTFET est sous l'illumination avec une longueur d'onde adéquate, des paires d'électron-trou sont générées dans le polymère. Une petite partie, moins de 5% des électrons photo-générés est ensuite piégée dans le matériau(P₃O) [58]. Si le transistor est électriquement bloqué par la grille (V_{GS} positive), les électrons photo-générés sont attirés par le champ électrique créé par la grille et, piégés à l'interface P₃O)-SiO₂ sur toute la zone éclairée. Les électrons piégés proches du nanotube contribuent à la modulation du potentiel du canal (Figure I.22).

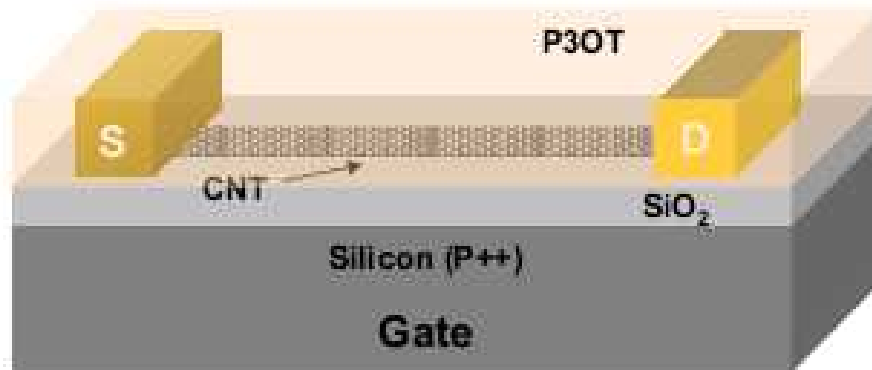


Figure I.21. Représentation schématique d'un OG-CNTFET [58].

En effet, la charge qui représente ces électrons est localisée très proche de la grille. Ainsi, l'effet de la modulation de la grille est écranté par celui des électrons. Ce phénomène est appelé "Optical Gating". Quand l'illumination est éteinte, les électrons piégés ne se recombinent pas immédiatement. L'effet "Optical Gating" dure plus d'une journée [53].

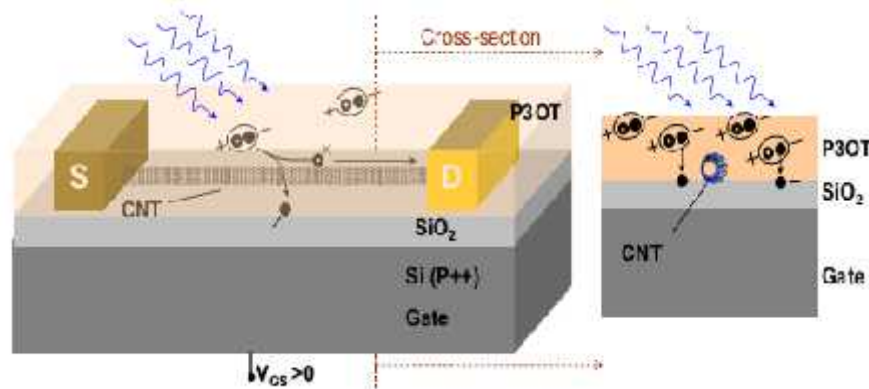


Figure I.22. Représentation schématique de la dynamique de l'effet "Optical Gating" dans un OG-CNTFET.

I.7. Une nouvelle photonique à base de nanotubes de carbone [59]

Grace aux propriétés optiques et optoélectroniques des nanotubes de carbone qui motivent actuellement la communauté scientifique, on peut noter une forte luminescence obtenue par excitation optique ou électrique des nanotubes de carbone, ainsi que des effets d'électro-absorption et d'électro-réfraction. Ce sont autant d'effets physiques originaux pour ces nano-objets que l'on peut envisager d'exploiter pour des applications en photonique et en photoélectrique. Cependant, tous les nanotubes ne sont pas également intéressants pour la photonique et il s'avère indispensable de trier de façon efficace ceux qui présentent les meilleures propriétés optiques. Nous verrons que ces nanotubes particuliers présentent un gain optique, c'est-à-dire la propriété d'amplifier un flux de photons. C'est une première étape essentielle vers la réalisation d'un laser à nanotubes.

I.7.1. Nouvelles propriétés optiques des nanotubes semi-conducteurs

L'évaluation de la qualité d'extraction des nanotubes semi-conducteurs par le PFO [59] est menée en comparant les propriétés optiques de trois couches minces avec : (i) des nanotubes bruts, (ii) des nanotubes ayant subi une faible centrifugation (réduction du nombre de nanoparticules et de nanotubes métalliques) et (iii) des nanotubes semiconducteurs purs.

Plusieurs techniques optiques peuvent être utilisées pour enregistrer les spectres de photoluminescence pour différentes longueurs d'onde de la pompe optique excitatrice. Dans le cas des nanotubes, la longueur d'onde de pompe explore des énergies S_{22} tandis que la mesure de la longueur d'onde d'émission (photoluminescence) est celle des énergies S_{11} . Une telle cartographie de photoluminescence se traduit par un ensemble de pics distincts identifiés par des couples (longueur d'onde d'excitation – longueur d'onde d'émission), correspondant chacun à un couple (S_{22} , S_{11}), et donc à une chiralité (n, m) bien définie.

Après une extraction des nanotubes semi-conducteurs incomplète une réduction du nombre de chiralités présentes est observée, pour aboutir à deux chiralités, les nanotubes (8,6) et (8,7) après extraction complète. L'extraction des nanotubes semi-conducteurs par le PFO correspond à une sélection de l'angle chiral des nanotubes extraits. En effet, les tubes (8,6) et (8,7) ont tous les deux des angles chiraux supérieurs à 25° , ce qui conduit à un enroulement en biais du réseau hexagonal des atomes de carbone autour de l'axe du nanotube. Ceci se corrèle bien avec l'enroulement hélicoïdal que forme naturellement le PFO lorsque ce polymère est en solution.

Une question importante demeure : quelle est l'influence de l'enrichissement en nanotubes semi-conducteurs sur l'intensité de la photoluminescence ? La figure I.23 présente les spectres de photoluminescence des trois couches minces PFO/nanotubes précédemment décrites, excitées avec un laser de pompe à la longueur d'onde de 740 nm qui permet de sonder uniquement les nanotubes (8,6). La concentration en nanotubes (8,6) dans les couches minces a été ajustée de façon à être constante pour les trois couches, pour permettre la comparaison. L'effet de l'enrichissement en nanotubes semi-conducteurs (et donc de l'appauvrissement en nanotubes métalliques) est clairement observé sur cette figure. L'intensité de photoluminescence provenant des nanotubes (8,6) est améliorée d'un facteur 3 par rapport à l'échantillon semi-purifié, et au-delà d'un facteur 6 en comparaison avec l'échantillon non purifié.

L'origine de cette amélioration du signal de photoluminescence est à corrélérer à l'élimination des impuretés (nanoparticules carbonées et métalliques) et surtout à la diminution jusqu'à disparition des nanotubes métalliques présents dans les échantillons non purifiés (environ un tiers en quantité). En effet, les nanotubes métalliques offrent des chemins de relaxation non-radiatifs indésirables pour les excitons créés dans les nanotubes semi-conducteurs, réduisant considérablement le signal de photoluminescence. De fait, leur disparition dans le dernier échantillon où l'extraction des nanotubes semi-conducteurs a été

effectuée de manière très efficace entraîne une forte augmentation du signal de photoluminescence.

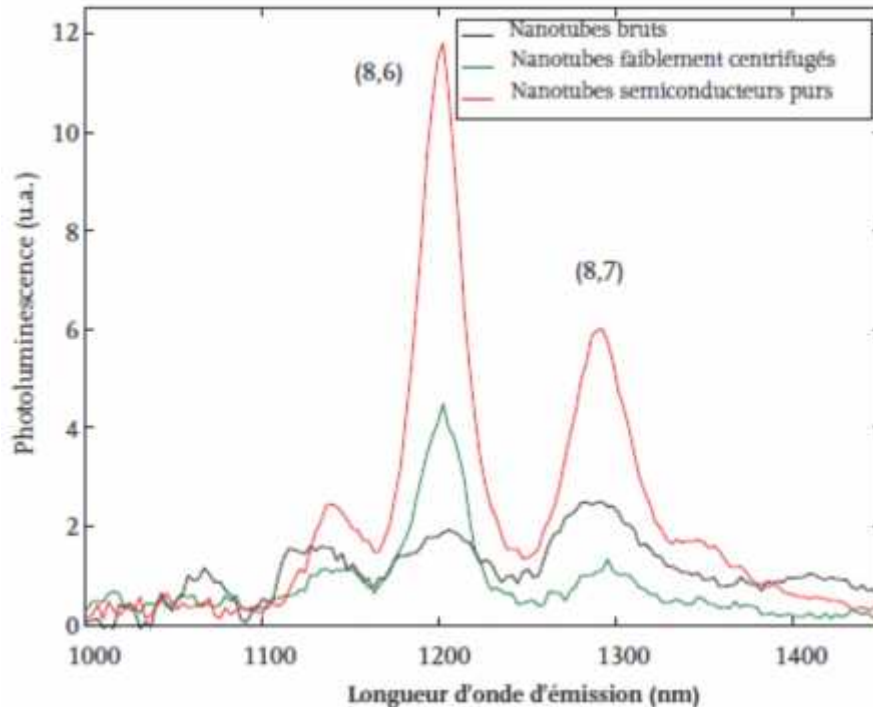


Figure I.23. Intensités de photoluminescence des trois échantillons de nanotubes en fonction de leur degré de purification.

Cependant, le rôle exact de la matrice PFO sur les nanotubes semi-conducteurs (par exemple, comme couche de protection vis-à-vis de l'oxygène) reste encore inconnu, et les recherches continuent. On peut néanmoins affirmer que la présence de nanotubes métalliques et de nanoparticules est particulièrement néfaste pour la photoluminescence, et plus généralement pour toutes les propriétés optiques dues aux nanotubes semi-conducteurs.

I.7.2. Gain optique

Il existe plusieurs mécanismes impliqués dans le processus de photoluminescence. L'absorption (Figure I.24), où un photon incident d'énergie supérieure à l'énergie de transition promeut un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. L'émission spontanée, où un électron de la bande de conduction se désexcite spontanément pour retourner vers la bande de valence en émettant un photon. Enfin, l'émission stimulée, où un photon incident

provoque la désexcitation d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence avec émission d'un photon ayant les mêmes caractéristiques de longueur d'onde, phase et polarisation que le photon incident. Ce mécanisme d'émission stimulée est à la base de l'amplification d'un signal optique, et donc du gain optique et de l'effet laser.

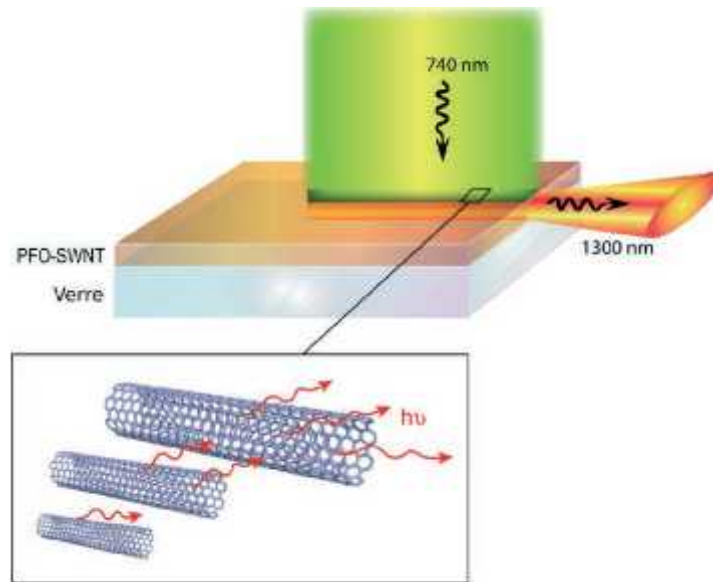


Figure I.24. Gain optique dans les CNT

I.7.3. Vers le laser à nanotubes de carbone

Ainsi, une couche mince de nanotubes triés, contenant uniquement des nanotubes semi-conducteurs, présente des propriétés de photoluminescence considérablement améliorées par rapport à l'échantillon de base. Mais pour que les nanotubes de carbone aient un intérêt pour des applications en photonique, il faut qu'ils démontrent des propriétés non pas simplement bonnes, mais supérieures à celles des matériaux concurrents. Ceci commence par la démonstration de la présence de gain optique dans les échantillons de nanotubes. Le gain optique d'un milieu exprime sa capacité à amplifier un flux de photon qui le traverse. C'est une propriété fondamentale pour l'obtention d'un effet laser. Des explications sur les techniques de mesure du gain optique sont données dans l'encadré 2. L'étude du gain optique a été menée en déterminant les propriétés de deux couches minces PFO/nanotubes : la première, appelée échantillon A ne contient que des nanotubes semi-conducteurs (8,6) et (8,7), tandis que la deuxième couche mince, appelée échantillon B, contient un mélange de nanotubes

semiconducteurs et métalliques. Les résultats de mesures du gain optique réalisées sur ces deux couches sont présentés sur la figure I.25.

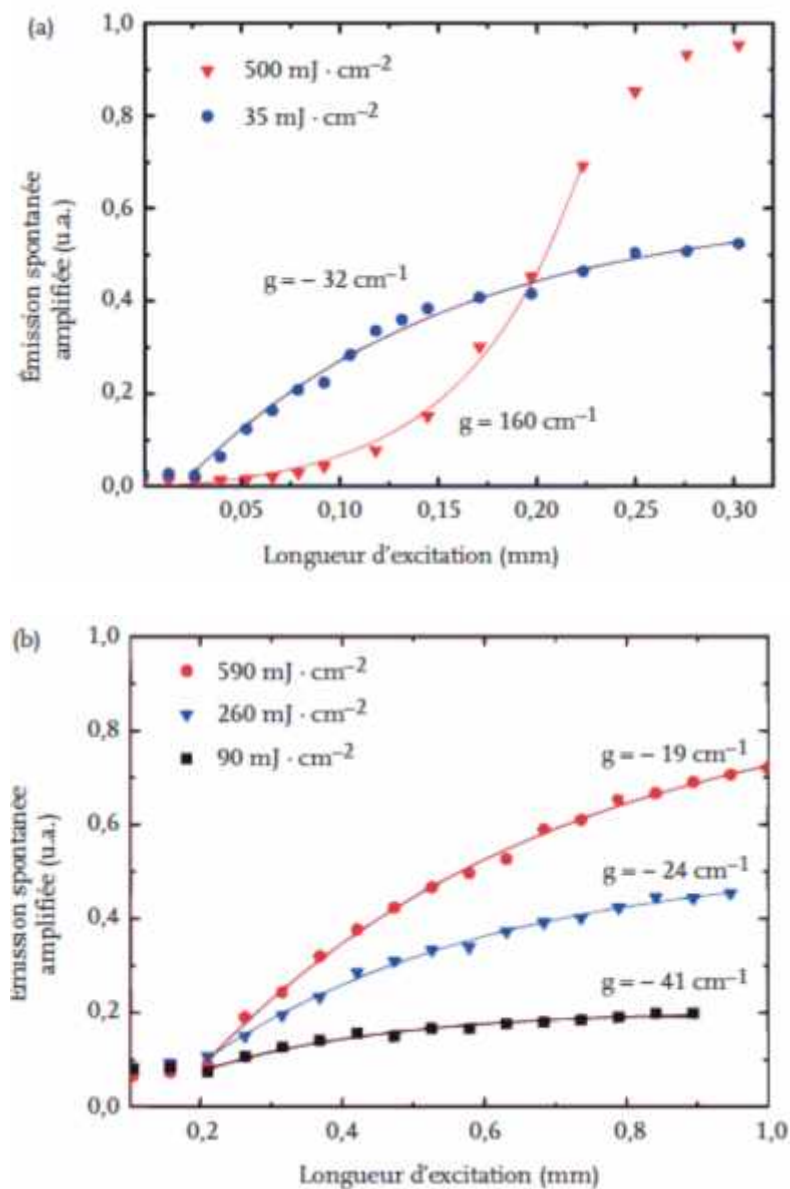


Figure I.25. Intensité de l'émission spontanée amplifiée en fonction de la longueur du faisceau d'excitation pour différentes énergies de pompe.

Chapitre II :

**Modélisation des
caractéristiques I-V du
transistor OG-CNTEFT**

II.1. Introduction

Ce deuxième chapitre est réservé pour présenter le modèle mathématique utilisé dans ce mémoire. Une présentation du composant étudié est illustré tous d'abord au début du chapitre, ensuite une étude analytique est présentée pour description des caractéristiques courant tension du transistor OG-CNTFET dans l'obscurité ainsi que sous l'influence de la lumière, cette méthode permet aussi de calculer la charge totale dans le canal du transistor ainsi que la capacité de l'oxyde sous la grille. L'étude proposée est une adaptation de quelques modèles et études existent dans la littérature.

II.2. Description générale de l'OG-CNTFET

L'OG- CNTFET est fabrique à base d'un CNTFET avec la grille arrière de type P. Le diélectrique de grille est l'oxyde de silicium réalisé à partir de croissance thermique locale (figure II.1.a) .Cela permet d'obtenir une couche de SiO₂ locale en garde qualité diélectrique. Un film mince de poly (3-octylthiophène) (P3OT) est déposé sur tout le wafer par la technique « spin-coating » avec une épaisseur d'environ 5 nm [60].P3OT est un polymère photosensible qui est souvent utilisé conversion d'énergie solaire en électrique [61][62].Sous l'illumination, des électrons photo-générés modulent le canal de l'OG-CENTFET pour une durée de plus d'une journée (figure II.1.b) [60].Ce transistor peut donc être considéré à la fois comme un composant optoélectronique et à la fois comme une mémoire non-volatile.

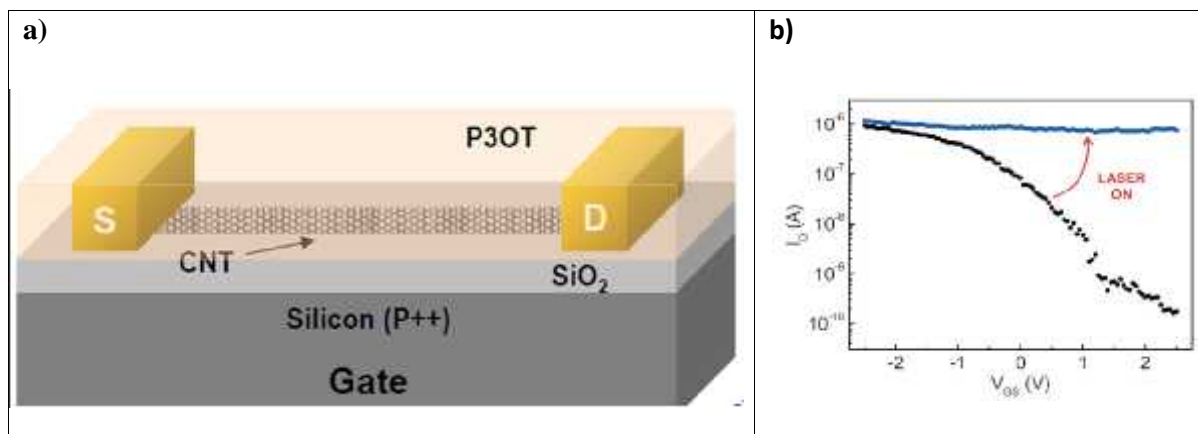


Figure II.1. a) Représentation schématique d'un OG-CNTFET

b) Caractéristiques I_{ds} - V_{gs} d'un OG-CNTFET sans et sous illumination [60].

II.3. Modélisation des caractéristiques statiques du transistor OG-CNTEFT

II.3.1 : Caractéristiques I-V dans l'obscurité

Pour calculer les caractéristiques I-V des CNTEFT, nous avons basé sur les travaux de Dinh Sy Hien, et al [63] où il est présenté un modèle analytique simple et bien expliqué les phénomènes physiques spécifiques des CNTEFT. Le formulaire de Landauer ainsi que l'hypothèse du transport balistique si la longueur du canal est inférieure au libre parcours moyen des porteurs ont été respectés et utilisés.

Le calcul du minima de sous-bande, le nombre d'effective des sous-bandes et le courant de drain dans les CNTEFT de façon précise sont les objectifs de la plus part des modèles physiques travaillant dans ce champ, ainsi l'objectif de notre travail dans ce mémoire, et en plus, nous avons intéressé aux modèles les plus simples en traitement mathématique et plus expliqués les phénomènes physiques.

a) Relation de dispersion dans les CNT

Dans cette section, la méthode utilisée est celle de pliage la zone de construire de la structure de bande du CNT. Ce dernier qui caractérisé par le vecteur chiral $Ch.$, et le vecteur de translation T , qui sont données comme suit :

$$\vec{C}_h = n_1 \vec{a}_1 + n_2 \vec{a}_2, \quad 0 \leq n_2 \leq n_1 \quad (\text{II.1})$$

$$\vec{T} = t_1 \vec{a}_1 + t_2 \vec{a}_2, \quad (\text{II.2})$$

Où : n_1, n_2, t_1 et t_2 sont des nombres entiers.

Les vecteurs chiraux et de traduction définissent la cellule élémentaire du CNT qui est un cylindre avec un diamètre d et longueur $|T|$. La cellule de la maille primitive nous aider à construire le réseau réciproque et la première zone de Brillouin qui est très importante de déterminer la structure de bande électronique et les sous-bandes minima du CNT.

Dans ce cas, la relation de dispersion du graphène [28] qui a été utilisée est la suivante :

$$E(k) = \pm \gamma \sqrt{1 + 4c_1 \left(\frac{a\sqrt{3}}{2} k_X \right) c_1 \left(\frac{a}{2} k_Y \right) + 4c_1^2 \left(\frac{a}{2} k_Y \right)^2} \quad (\text{II.3})$$

Où : $\gamma = 3.1eV$ et $a = 2.46\text{\AA}$.

Le nanotube de carbone peut être considéré comme une feuille de graphène cylindre, puis les valeurs du vecteur d'onde (K) sont déterminées par la périodicité du potentiel interne et par les conditions aux limites. Les valeurs du vecteur d'onde sont illustrées comme suit :

$$K = \frac{2\pi}{c_h} q, \quad q = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (\text{II.4})$$

Où : N est le nombre de paires de carbone dans la cellule unitaire.

Aussi le vecteur d'onde dans la zone de Brillouin d'un nanotube type semi-conducteur peut être obtenu à partir de la relation suivante :

$$K = \frac{2\pi\sqrt{3}j - n_1 k}{2an_1} \hat{X} + \frac{2\pi + \sqrt{3}n_1 k}{2an_1} \hat{Y} \quad (\text{II.5})$$

La substitution de (5) dans la relation de dispersion du graphène, nous pouvons obtenir la relation de dispersion pour un nanotube semi-conducteur comme suit :

$$E(k) = \pm t \sqrt{1 + 4c_1 \left(\frac{\sqrt{3}k}{2} \right) c_1 \left(\frac{j}{n_1} \right) + 4c_1^2 \left(\frac{j}{n_1} \right)^2} \quad (\text{II.6})$$

Où : J est le nombre de sous-bande, donnée par :

$$j = r_1 \left(\frac{2n_1}{3} \right), r_1 \left(\frac{2n_1}{3} \right) + 1, \dots, (2n_1 - 1) \quad (\text{II.7})$$

Ainsi, les minima du 1^{er}, 2^{ème} ..., j ^{ème} sous-bande, est le plus bas d'énergie de chaque sous-bande. Par conséquent, nous pouvons obtenir le nombre de sous-bandes efficaces par comparaison de la position de minima sous-bande avec le niveau de Fermi.

b) Calcul de la densité de charge :

La densité induite de charge (électrons ou trous) est importante pour déterminer les caractéristiques des dispositifs à base de nanotubes de carbone. La charge induite par la tension de grille V_{gs} dans le canal du CNTFET circule entre la source et le drain et crée le courant de drain I_d . La densité de charge par sous-bande peut être obtenue à partir de relation suivante [33] :

$$N_e(E) = \int_{-\infty}^{\infty} D_N(E) F(E - E_F) d \quad (\text{II.8})$$

Où : $F(E - E_F)$ est la fonction de Fermi d'équilibre et $D_N(E)$ est la densité d'états de au sommet de la barrière de la p^{th} sous-bande du nanotube, cette dernière est donnée par .

$$D_N (E) = g_0 \frac{E-E_0}{\sqrt{(E-E_0)^2 - \Delta_P^2}} \quad (\text{II.9})$$

Où Δ_P est la P^e sous-bande minima, E_0 est écart en milieu de bande, et g_0 est la densité d'état métallique.

Quand une polarisation est appliquée aux bornes de la grille et du drain, les états sont peuplés par deux différents niveaux de Fermi. En conséquence, le nombre total d'électrons (N_t) dans le canal en fonction de l'énergie peut être écrit comme suit :

$$N_t(E) = \int_{E_c}^{\infty} D_N (E - U_S) \frac{f_1(E) + f_2(E)}{2} d \quad (\text{II.10})$$

Où $f_1(E)$ et $f_2(E)$ sont la fonction de Fermi pour les niveaux de Fermi E_{F1} et E_{F2} , respectivement, et U_S est le potentiel de canal au sommet de la barrière, étant donné par l'équation suivante :

$$U_S = \left[U_L + \frac{q^2 N}{C_g} \right] \quad (\text{II.11})$$

Afin de calculer le nombre total d'électrons, il faut connaître le potentiel du canal (U_S), en même temps, le nombre total d'électrons est indispensable pour calculer le potentiel du canal, donc, nous utilisons la méthode auto-cohérente afin d'obtenir le nombre total d'électrons. Ainsi, nous pouvons calculer le nombre total induit dans le canal à la P^e sous-bande (ΔN) parremplacer par (II.7) et (II.9) à (II.8) .

$$\Delta N = g_0 \int_0^{\infty} \left[\frac{d}{1+e^{\left[\frac{Z^2 + \Delta_P^2 + (\Delta_n - \Delta_p)}{k_B T} \right]}} + \frac{d}{1+e^{\left[\frac{\Delta + \Delta_P^2 + (\Delta_n - \Delta_p)}{k_B T} \right]}} \right] \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Avec :} \quad Z = \sqrt{(E - E_c + \Delta_p)^2 + \Delta_p^2} \quad (\text{II.12})$$

Le calcul des caractéristiques courant-tension (I-V) du OG-CNTFET au régime balistique est lié au nombre de sous-bandes contribué. Le courant net par sous-bande dans le nanotube est donné par [63]:

$$I_D = \frac{4e}{h} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d}{2\pi} T(E) [f_1(E) - f_2(E)] \quad (\text{II.13})$$

Avec le coefficient de transmission $T(E)$ donnée par

$$T(E) = T [G_1(E)G(E)G_2G^+(E)] \quad (\text{II.14})$$

La modélisation de CNTFET exige une base de mécanique quantique rigoureuse .La méthode des fonctions de Green non-équilibrées ainsi que le formulaire de Landauer ont été utilisés pour calculer le courant de charge (électrons et trous) dans le nanotube.

La courbe des caractéristiques courant-tension peut être divisée en deux régions : linéaire et saturation selon les régimes de fonctionnement. Mr D. S. Hien, a été donné l'expression du courant de drain en régime linéaire directement comme suit :

$$I_d = \frac{W}{L} \mu C_{ox} \left[(V_g - V_T) V_d - \frac{V_d^2}{2} \right] \quad (\text{II.15})$$

$$I_d = K_n \left[2(V_g - V_T) V_d - V_d^2 \right] \quad (\text{II.16})$$

avec Cox est la capacité de la couche d'oxyde situe au-dessus de la grille, elle est donné dans le cas d'un CNTFET plan par la relation suivante :

$$C_D = \frac{2\pi}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r (2t_o / d)} \quad (\text{II.17})$$

Où : S est la surface de la couche d'oxyde et d son épaisseur, k : la permittivité relative de l'oxyde et ϵ_0 : la permittivité du vide.

K_n est la conductance de CNTFET, W est la largeur de CNTFET, L est la longueur de CNTFET, μ est la mobilité des porteurs et Cox est la capacité de l'oxyde de grille.

Nous pouvons également obtenir le courant en régime de saturation tous simplement par remplacer Vds (sat) par Vgs - VT. Ensuite l'expression du courant de saturation de CNTFET peut s'écrire directement comme suit [63] :

$$I_{d(sat)} = K_n (V_g - V_T)^2 \quad (\text{II.18})$$

II.4. Modulation du canal par l'illumination [44]

Pour calculer la modification sur le courant de drain dès à l'influence de la lumière nous avons basé sur les travaux de Si-Yu LIAO et all groupe de chercheur de l'université de Bordeaux 1, France [44], qui sont développé une étude analytique et simulatrice des caractéristiques optoélectroniques des transistors OG-CNTEFT, puis nous avons introduire les résultats de cette étude sur le modèle de base des caractéristiques I-V présenté précédemment.

II.4.1 Analyse de la modulation optique :

À température ambiante, la conductance de SWNT est très sensible à son environnement électrostatique. En utilisant la sensibilité de charge électrique, des mémoires non-volatiles basées sur le CNTFET ont été développées avec des charges piégées dans l'oxyde de grille. Le principe du fonctionnement de l'OG-CNTFET est similaire. Quand un OG-CNTFET est sous l'illumination avec une longueur d'onde adéquate, des paires d'électron-trou sont générées dans le polymère. Une petite partie, moins de 5% des électrons photo-générés est ensuite piégée dans le matériau P3OT. Si le transistor est électriquement bloqué par la grille (V_{GS} positive), les électrons photo-générés sont attirés par le champ électrique créé par la grille et, piégés à l'interface P3OT-SiO₂ sur toute la zone éclairée. Les électrons piégés proches du nanotube contribuent à la modulation du potentiel du canal (figure II.2). En effet, la charge que représente ces électrons est localisée très proche de la grille. Ainsi, l'effet de la modulation de la grille est écranté par celui des électrons (voir figure. II.1). Ce phénomène est appelé "Optical Gating".

Quand l'illumination est éteinte, les électrons piégés ne se recombinent pas immédiatement. L'effet "Optical Gating" dure plus d'une journée. Ce comportement peut être reconnu comme une mémoire non-volatile pour les applications électroniques en fréquence à partir de l'ordre de kilo hertz. Le phénomène est régi par le mécanisme du piégeage électrochimique des électrons par le complexe OH sous forme de la réduction de SiOH qui charge l'interface P3OT-SiO₂ comme une couche d'ions négatives de charges fixes.

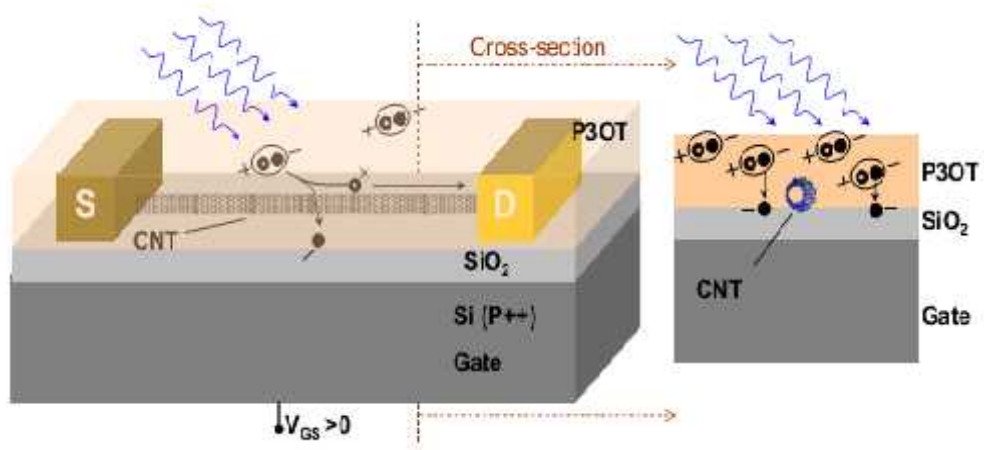


Figure II.2. Représentation schématique de la dynamique de l'effet "Optical Gating" dans un OG-CNTFET.

II.4.2 Modélisation de la modulation optique :

La modélisation de la commande optique de l'OG-CNTFET est introduite en tenant compte de l'influence du piégeage à l'interface P3OT-SiO₂ dans la modulation du potentiel du canal du transistor. La méthode débute par la recherche de la quantité d'électrons piégés.

II.4.2.a Modélisation de l'absorption optique de P3OT :

Pour déterminer la quantité d'électrons piégés, il faut d'abord trouver la quantité des électrons photo-générés dans le polymère. L'absorption de P3OT caractérise l'efficacité de la conversion de photons en paires électron-trou photo-générées. Elle a une sélectivité en longueur d'onde de la lumière incidente. Dans la littérature, les longueurs d'onde utilisées pour exciter les échantillons sont entre 450 et 700 nm lesquelles correspondent au rouge jusqu'au bleu dans le spectre du visible [60]. L'absorption de P3OT présente une forme gaussienne, dans cette gamme de longueur d'onde [60] [62] [65]. En cohérence avec ces expériences, nous avons modélisé l'absorption de P3OT par l'équation suivante en fonction de λ_{eff} :

$$\alpha_P = \alpha_0 \exp(-\gamma(\lambda_{\text{eff}} - \lambda_0)^2) \quad (\text{II.19})$$

) α_0 : est le maximum de la gaussienne égale à 0,0366

) λ_0 : est la longueur d'onde centrale égale à 442,8 nm

) Le coefficient γ fixe la largeur égale à $1,45 \times 10^{14} \text{ nm}^{-2}$

Ce modèle expérimental est comparé avec le modèle numérique [60] présenté dans la figure

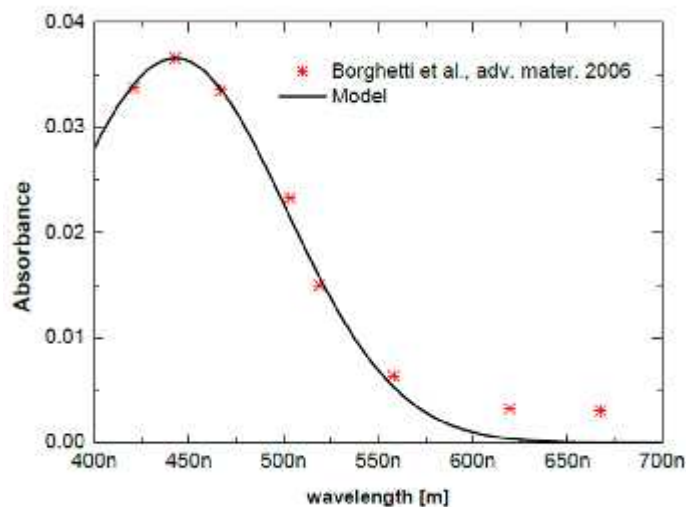


Figure II.3. Validation du modèle expérimental de l'absorption optique de P3OT.

II.4.2.b Modélisation des pièges d'électron à l'interface P3OT/SiO₂ :

Le piégeage des électrons photo-générés dans le P3OT à l'interface SiO₂ peut être vu comme la charge de pièges à l'interface P3OT-SiO₂, en première approximation, on peut considérer ces pièges comme une série de condensateurs entre l'interface P3OT-SiO₂ et la grille arrière présentée dans la figure II.2. L'épaisseur de la couche est évaluée à 1 nm dans l'oxyde. Les électrons piégés photo-générés se positionnent uniformément dans la région insolée. Seuls ceux qui sont proches du canal à nanotube peuvent moduler la conductance de transistor. C'est-à-dire une zone effective autour du nanotube à l'interface. On peut considérer que la distribution du champ électrique généré par les charges piégées dans la zone effective est équivalente à un champ homogène créé par une zone de charges à proximité du nanotube avec une largeur de 10 nm. Notons que les électrons piégés très proches du canal s'évacuent immédiatement par le nanotube.

À partir de cette approximation, on peut simplifier le réseau capacitif par deux condensateurs en série. L'un est entre le CNT et la zone de charge, l'autre entre la zone de charge et la grille. Ces éléments sont en parallèle avec le condensateur de l'oxyde de grille C_{OX}. De plus, ces éléments ajoutés ne doivent pas modifier le fonctionnement quand le transistor n'est pas excité par la lumière. C'est-à-dire que les condensateurs en série sont faibles devant C_{OX}. Cette conséquence est réaliste, parce que la capacité entre les pièges et la grille doit être très faible pour représenter un bon oxyde de grille.

II.4.2.c Modélisation de la source de courant dépendante de la puissance optique :

Pour lier la quantité d'électrons photo-générés dans le P3OT et les condensateurs équivalents aux pièges d'interface, une source de courant est nécessaire. Cette source de courant est modélisée en décrivant la puissance lumineuse en électrons photo-générés qui chargent les condensateurs équivalents. Le courant s'écrit :

$$I_0 = \frac{dn_{ti}}{d} = \frac{d}{d} \frac{p_{-g}}{d} \cdot \text{rate}_s \cdot \frac{A_e}{A_S} \quad (\text{II.20})$$

Où n_{ti} et $n_{p_{-g}}$ sont les densités des électrons photo-générés piégés et des paires d'électron-trou photo-générées dans le P3OT, respectivement. rate_s est le taux de séparation des paires d'électron-trou photo-générées. A_e et A_S sont les aires de la zone effective des pièges d'interface et la taille du spot lumineux, respectivement. Ce rapport donne le pourcentage de quantité de paires dans la zone effective.

La quantité totale $n_p - g$ dérivée par rapport au temps s'exprime :

$$\frac{dn_p}{dt} = \frac{\epsilon P_L}{h\nu_L} = \frac{\epsilon P_L \lambda_L}{hc} \quad (\text{II.21})$$

Où P_L , ν_L et λ_L sont la puissance lumineuse, la fréquence et la longueur d'onde du laser incident. Le rapport de la puissance P_L et l'énergie d'un photon $h\nu_L$ donne le nombre de photons incident par unité de temps. Ainsi, le courant dépendant de la puissance optique et paramétré par la longueur d'onde de la lumière incidente devient :

$$I_0 = \frac{\epsilon P_L \lambda_L}{hc} \cdot \alpha_{P3OT}(\lambda_L) \cdot \tau_{sp} \cdot \frac{4W_e L_G}{\pi d_s^2} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

W_e : est la largeur de la zone effective

d_s : est le diamètre du spot lumineux.

II.4.2.d Modélisation de la “commande optique” avec l’effet mémoire non-volatile :

Avant la modélisation de la commande optique, il faut évaluer l'influence propre du P3OT sur l'environnement électrostatique du nanotube et du transistor. Le dépôt de P3OT entraîne l'équivalent d'un dopage de type P du nanotube intrinsèque et induit une modification des capacités électrostatiques côté drain et côté source. Une comparaison des caractéristiques I_D - V_{GS} entre un transistor avant et après le dépôt de P3OT montre clairement cette influence. Mais en utilisant des s-SWNTs avec une pureté supérieure à 97% [66], ce dopage n'est pas remarquable dans des échantillons présentés par le CEA-LEM. Nous pouvons conclure que en associant des charges négatives due aux impuretés piégées à l'interface P3OT-SiO₂ à proximité des nanotubes [67], P3OT dope électro-statiquement ces s-SWNTs. Dans notre modèle compact, un paramètre dop_{P3OT} représente ce dopage en cm^{-1} .

La source de courant optique et les condensateurs équivalents des pièges d'interface sont modélisés. Nous les intégrons dans la modélisation compacte de CNTFET conventionnel pour reproduire l'effet de la commande optique. Le schéma équivalent du chargement des pièges est présenté figure II.4.

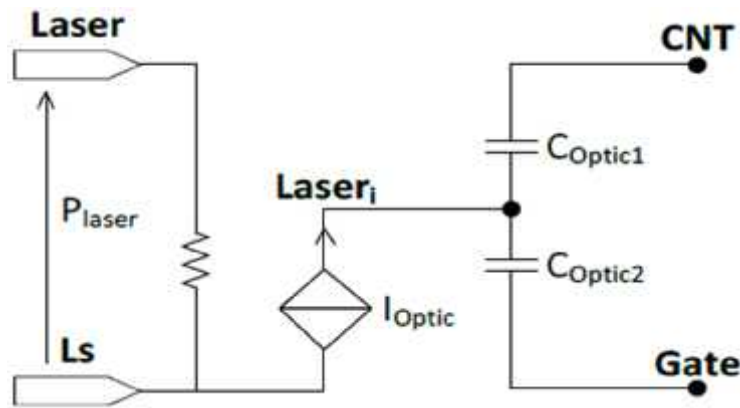


Figure II.4. Simplification du réseau de condensateurs dans la zone effective pour la modélisation optique.

Les nœuds Laser et Ls sont deux nœuds virtuels qui représentent la puissance lumineuse en entrée du circuit. La valeur de nœuds Laser et Ls sont forcées à P_{laser} et zéro, respectivement. Les nœuds CNT et Gate représentent le canal du nanotube et la grille, respectivement. I_0 est la source de courant modélisée. C_{\square} est le condensateur équivalent entre le nanotube et les pièges d'électrons d'interface. Dans cette étude, la valeur de C_{\square} est près de dix fois plus importante que celle de C_{\square} . C_{\square} est le condensateur équivalent entre les pièges d'interface et la grille. La valeur de C_{\square} est négligeable (1 à 5%) devant celle de C_{\square} pour correspondre à l'hypothèse réaliste de l'importance de C_{\square} vis-à-vis de la capacité des pièges d'interface. Par conséquent, la valeur du couple de C_{\square} et C_{\square} (en série) est négligeable devant celle de C_{\square} .

Quand le transistor n'est pas excité, cette partie n'influence pas sur le potentiel du canal. Si l'OG-CNTFET est illuminé, la source du courant I_0 convertit la puissance lumineuse selon la longueur d'onde incidente en électrons photo-générés séparés. Ces électrons chargent progressivement les condensateurs de pièges C_{\square} et C_{\square} . Les charges stockées produisent une variation des potentiels de canal du nanotube (nœud CNT) et de grille (nœud Gate), respectivement. Quand l'illumination s'arrête, les chargements s'arrêtent,

Une remarque sur la modélisation est la non-linéarité de l'effet de la commande optique. La modulation en fonction de la puissance optique n'est ni linéaire, ni exponentiel [60]. Cette relation reste indéterminée. Nous supposons une conversion de puissance lumineuse linéaire en charges dans le canal (eq. II.22).

La quantité de charges stockées dans les condensateurs reste inchangée. Ainsi, nous avons traduit l'effet mémoire non-volatile pour une durée infiniment longue, théoriquement.

L'étude du bilan des charges en présence explique le mécanisme de la modulation du potentiel du canal sous l'effet de la commande optique. Dans un CNTFET conventionnel, le potentiel du canal est modulé par l'effet de champ créé par la grille, par les charges issues du drain et par les charges issues de la source [68] [69]. Pour un OG-CNTFET, le potentiel V_C s'exprime selon le bilan de charges suivant (figure II.5) :

$$\Delta Q = C_G (V_G - V_C) + C_D (V_D - V_C) + C_S (V_S - V_C) + C_O (V_L - V_C) \quad (\text{II.23})$$

Avec V_G , V_D , V_S et V_L les potentiels de grille, de drain, de source et du noeud Laseri, respectivement. C_D et C_S sont les capacités électrostatiques du côté drain et du côté source. ΔQ est la densité de charge dans le canal à polarisation nulle. Dans eq (II.23), les quatre termes du produit représentent respectivement les charges issues de la grille, du drain, de la source et par la commande optique. Enfin, la valeur de V_C est déduite :

$$V_C = \frac{(C_G V_G) + (C_D V_D) + (C_S V_S) + (C_O V_L) - \Delta Q}{C_G + C_D + C_S + C_O} \quad (\text{II.24})$$

Une remarque sur la modélisation est la non-linéarité de l'effet de la commande optique. La modulation en fonction de la puissance optique n'est ni linéaire, ni exponentiel [60]. Cette relation reste indéterminée. Nous supposons une conversion de puissance lumineuse linéaire en charges dans le canal (eq. II.24).

II.5. Courant de drain total

Le courant de drain total I_{tot} est la somme des deux courant calculés précédent, le courant en obscurité I_d dû aux tensions de polarisation appliquées, la tension de drain V_{DS} et la tension de grille V_{GS} [équations II.15 et II.18] et le courant I_{optic} [équation II.22]. L'expression du courant total est illustrée dans la relation suivante :

$$I_{ti} = I_d(e^{-\alpha} + 1) + I_o \quad (\text{II.25})$$

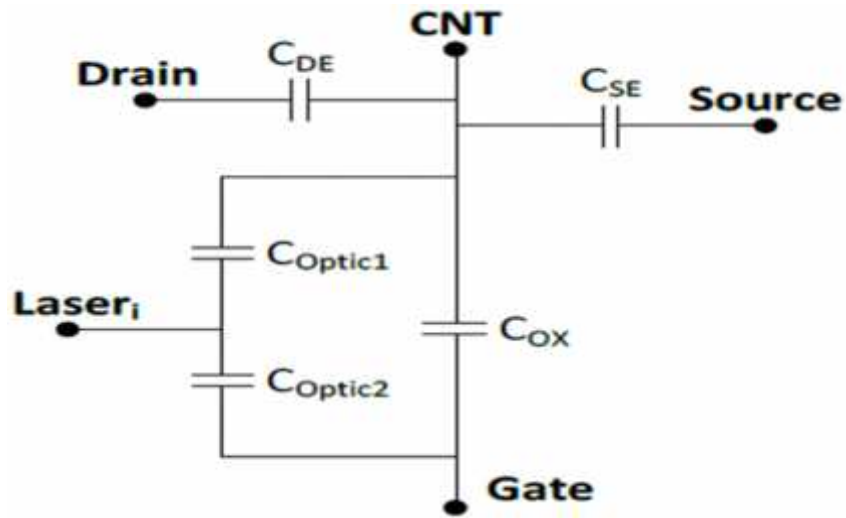


Figure II.5. Bilan schématique des charges qui modulent le potentiel du canal dans l'OG-CNTEFT.

Chapitre III :

Résultats et interprétations

III.1.Introduction :

Ce troisième chapitre est consacré aux résultats de la simulation et leurs interprétations. Nous exposons en premier lieu, le programme de simulation, l'organigramme de calcul ainsi que les paramètres utilisés dans cette étude. Puis nous présentons, les différentes séries de courbes avec leurs interprétations. Dans cette optique, nous apprenons le réseau des caractéristiques courant de drain- tensions de polarisation dans l'obscurité d'un transistor OG-CNTFET dont les paramètres sont énoncés, puis une étude simulatrice sur l'effet du courant optique sur ces caractéristiques ainsi que l'effet des quelques paramètres sur le courant optique lui-même et sur le courant total, ce dernier qui définit comme la somme du courant de drain dans l'obscurité et le courant optique .

III.2. Programme de simulation:

Pour valider le modèle mathématique établi dans le deuxième chapitre, un programme de simulation est établi en langage Fortran Power Station 90 version 4.0, ce programme base sur les différentes formules et équations exposés le deuxième chapitre permet de traduire l'ensemble de ces équations à des tableaux de chiffres, à partir de ces tableaux et à l'aide de logiciel Origine version 6.1, nous pouvons tracer et exposer les différentes séries de résultats et de courbes.



Figure III.1. Logiciel utilisés : a) Fortran Power Station version 4.0, b) Origine version

6.1

L'algorithme établi pour calculer les caractéristiques électroniques et optoélectroniques des composants étudiés est représenté sur la figure III.2.

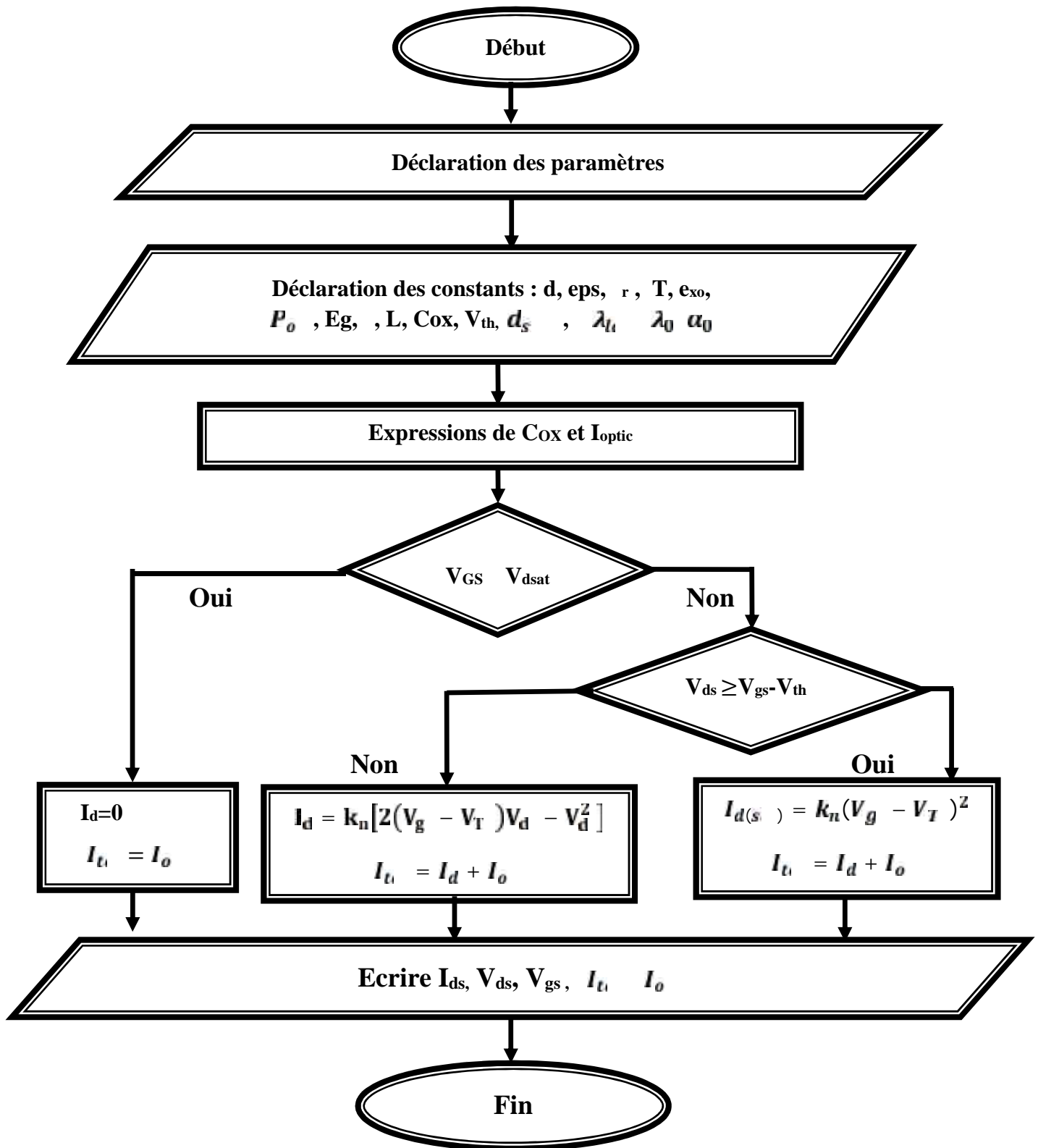


Figure III.2. Organigramme de calcul.

Avec ce programme nous pouvons déterminer :

- ❖ Les caractéristiques courant tension dans les différents régimes de fonctionnement du transistor dans l'obscurité.
- ❖ L'influence des paramètres suivants sur les caractéristique I-V du CNTEFT dans l'obscurité :
 - ✓ L'influence de la longueur de grille,
 - ✓ L'influence du diamètre de CNT,
 - ✓ L'influence de l'épaisseur de l'oxyde,
 - ✓ L'influence de la tension de seuil.
- ❖ L'effet des paramètres suivants sur le courant lumineux (courant optique) :
 - ✓ L'effet de la puissance optique,
 - ✓ L'effet de la longueur d'onde,
 - ✓ L'effet de la surface,
 - ✓ L'effet du diamètre du spot lumineux
 - ✓ L'effet de la gaussienne
- ❖ L'effet du courant optique sur le courant total pour plusieurs régimes de fonctionnement.
- ❖ L'effet de la puissance optique et de la longueur d'onde sur le courant total.

III-3. Caractéristiques courant tension I-V:

Pour présenter les résultats de notre travail, et à partir des expressions établies dans le deuxième chapitre notamment les expressions : (II-3), (II-12), (II-13), (II-14), (II-15), (II-16). On fait la simulation numérique du courant de drain I_D en fonction des tensions de polarisation de grille V_G et de drain V_D dans les différents régimes de fonctionnement du transistor.

Les paramètres géométriques et technologiques du transistor OG-CNTFET, avec les paramètres du spot lumineux (laser) que nous avons utilisé sont regroupés dans les tableaux suivants :

Diamètre du CNT	Longueur de grille	Tension de seuil	Permittivité relative de l'oxyde	Epaisseur de l'oxyde
d	L	V_{th}	ϵ_r	e_D
1.5 nm	100 nm	0.2 V	3.9	5 nm

Diamètre du spot lumineux	longueur d'onde centrale	longueur d'onde de laser
d_s	λ_0	λ_{li}
1 μm	0.4428 μm	450 nm

Gaussienne	Larguer de la zone effective	Puissance optique	Température
α_G	W_e	P_o	T
0.0366	100 nm	50 mW	300° K

Tableaux (III.1). Paramètres utilisés dans l'étude.

Sur les paragraphes et les figures suivants, nous allons représenter le réseau des caractéristiques I-V du transistor à nanotube OG-CNTFET. Ces caractéristiques décrivent la variation du courant de drain « I_d » en fonction de la tension de drain « V_d » pour différentes valeurs de la tension de grille « V_g ».

Sur La figure (III.3) nous avons présenté la caractéristique I_{ds} en fonction de V_{ds} pour différentes paramètres de V_g . Nous pouvons caractériser les trois zones qui représentent les différents régimes de fonctionnement du transistor.

- ✓ La zone linéaire (zone ohmique) : le courant de drain I_{ds} varie quasi linéairement en fonction de la tension de drain V_{ds} , elle correspond au régime de fonctionnement linéaire.
- ✓ La zone de pincement : le courant de drain I_{ds} augmente mais pas d'une manière linéaire jusqu'à sa valeur de saturation.
- ✓ La troisième zone appelée zone de fonctionnement saturé, cette zone correspond à la condition : $V_{ds} = V_{dsat}$ où le courant de drain ne dépend pas de la tension de drain.

Description des trois zones:

➤ La zone linéaire :

Lorsque la tension V_g dépasse la tension de seuil V_{th} une plus grande quantité d'électrons est attirée dans le canal. On peut se représenter l'influence de la tension V_g (au-dessus de V_{th}) comme une augmentation de la profondeur du canal. Il en résulte une augmentation de la conductance du canal c'est à dire une réduction de sa résistance. Le courant

Id circulant dans le canal est donc proportionnel à $(V_g - V_{t1})$ et à la tension Drain-Source appliquée figure (III.3). Et augment proportionnellement à V_d , et l'allure de la caractéristique est quasi linéaire.

➤ **La zone de pincement :**

Nous remarquons que la tension Drain-Source V_{ds} apparaît en fait comme une chute de tension tout au long du canal. Il en résulte que la tension entre la grille et les différents points le long du canal est variable, de V_g côté Source à $V_g - V_d$ côté Drain. Comme la profondeur du canal dépend de cette tension, il est clair que la profondeur du canal n'est pas uniforme. A mesure que la tension Drain-Source V_{ds} augmente, le canal prend une pente de plus en plus élevée et sa résistance augmente. Lorsque la tension drain-source V_{ds} atteint une valeur telle que la tension grille-canal côté Drain atteint la tension de seuil, c'est-à-dire : $V_g - V_d = V_{t1}$ d'où $V_d = V_g - V_{t1}$. La profondeur du canal à l'extrémité Drain devient voisine de 0 ; on dit qu'il y a pincement.

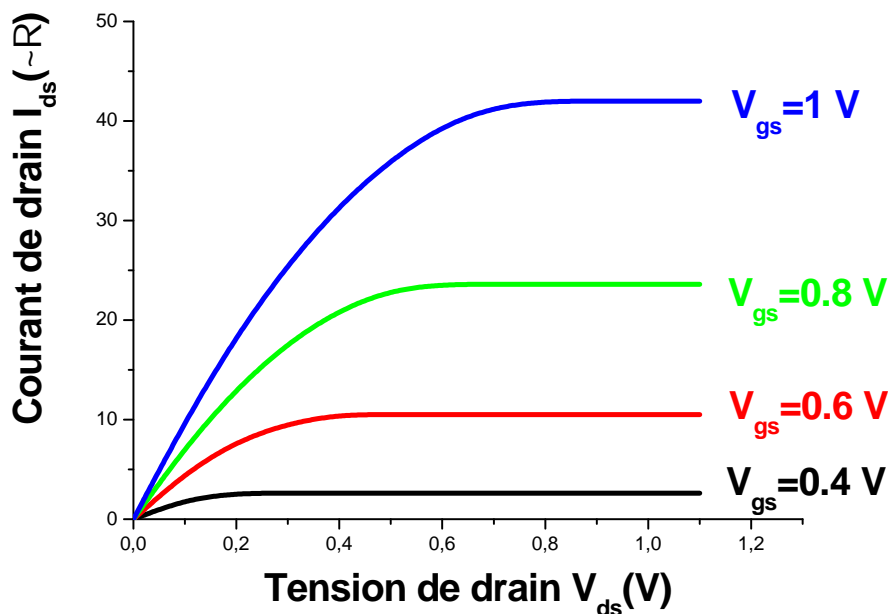


Figure III.3. Réseau des caractéristiques courantes tensions I_{ds} - V_{ds} du composant étudié.

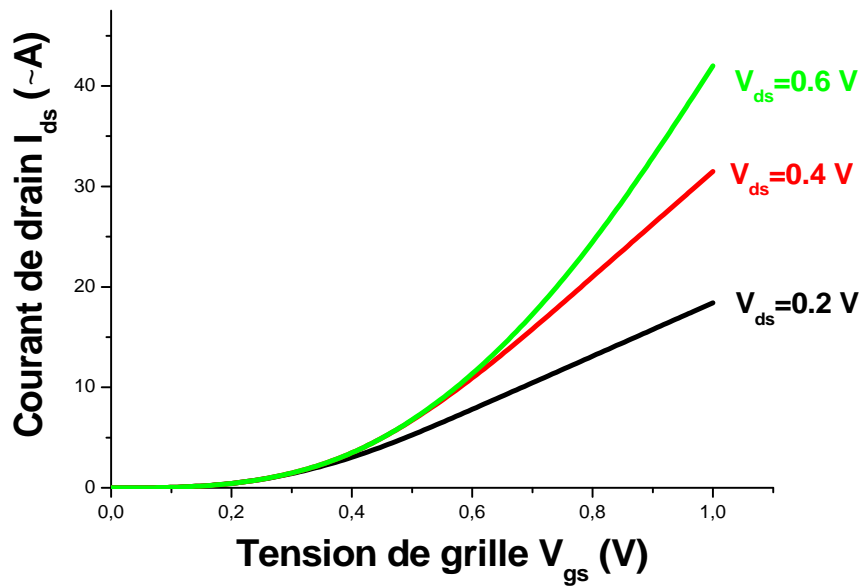


Figure III.4. Variation du courant de drain en fonction de la tension de grille pour plusieurs valeurs de la tension de drain.

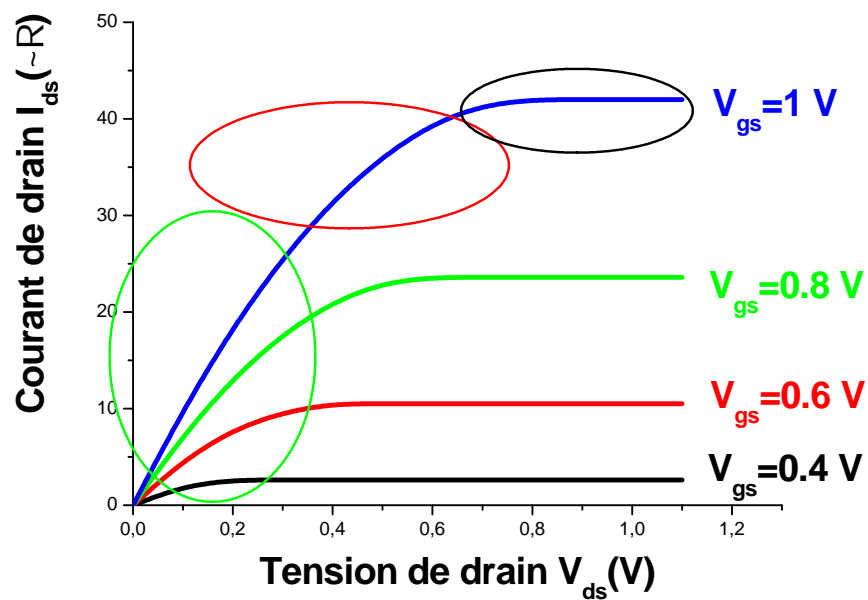


Figure III.5. Réseau des caractéristiques I_{ds} - V_{ds} « Description des trois zones de fonctionnement ».

➤ **La zone de saturation :**

Dans cette zone, toute augmentation de la tension de drain V_{ds} au-delà de la zone de pincement sera sans effet sur l'intensité du courant drain I_{ds} , dans ce cas on peut nommer le courant I_{ds} par I_{dsat} , ou tout simplement, le courant de saturation.

III-3.1. Effet des différents paramètres sur les caractéristiques I-V du OG-CNTEFT dans l'obscurité :

III-3. 1. a. L'influence de la longueur de grille :

Pour exposer l'influence de la longueur de grille « L » sur les caractéristiques courant tensions du composant étudié dans ce travail, nous avons présenté dans la figure suivante une comparaison des caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour trois valeurs différentes de la longueur de grille $L = 100$ nm, $L = 80$ nm et $L = 60$ nm. La figure (III-6) représente cette comparaison, où nous avons remarqué que le courant I_{ds} augmente lorsque de longueur de grille « L » diminue. Ce résultat confirme l'importance de choisir une longueur de grille « L » du CNTFET demandée.

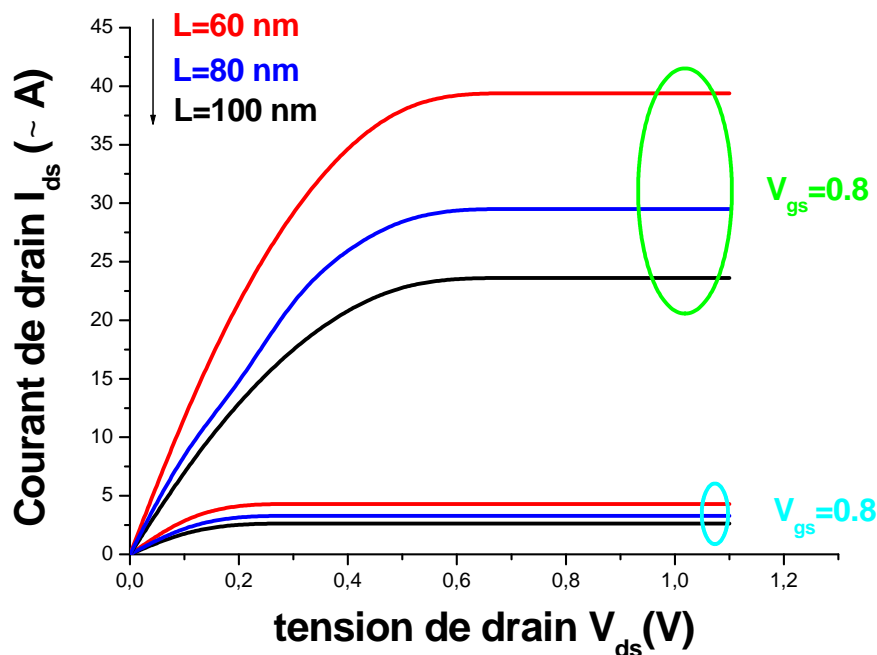


Figure III.6. Effet de longueur de grille sur le réseau des caractéristique I_{ds} - V_{ds} du CNTFET.

III.3.1.b. Effet de variation du diamètre de nanotube de carbone :

Afin d'examiner l'effet de la variation du diamètre de nanotube de carbone sur les caractéristiques I-V du transistor CNTFET. Nous avons choisi trois valeurs de diamètre de nanotube de carbone. Les résultats de la simulation sont présentés sur la figure (III.7). Elle montre bien l'effet du diamètre sur le courant de drain. On remarque aisément que le courant I_d augmente lorsque le diamètre du nanotube de carbone « d » augmente. Et sa s'explique comme suit : Quand le diamètre du nanotube augmente, le band-gap est diminué (comme le band-gap du nanotube est donné par la relation $E_g = 0,9/d$), [97]. Le courant traversant le nanotube augmente et le courant de fuite (I_{OFF}) augmente en même temps de manière encore plus importante.

Du point de vue de la consommation, comme du point de vue d'une utilisation en logique, une augmentation du diamètre n'est donc pas souhaitable. Et d'autre part la tension de seuil du CNTFET diminue lorsque le diamètre du nanotube augmente, car la structure de bande d'énergie du nanotube est dépendante du diamètre de celui-ci.

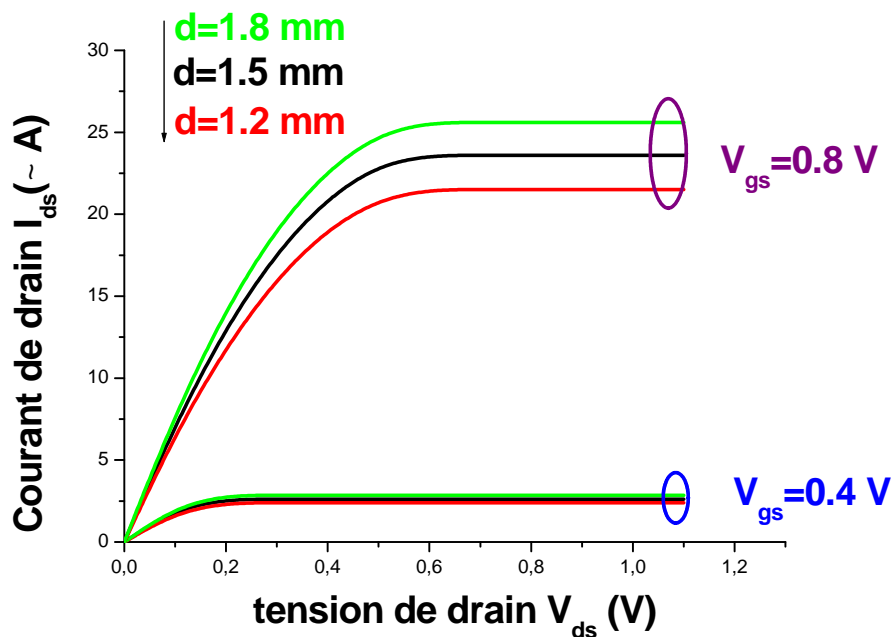


Figure III.7. Influence du diamètre de CNT sur les caractéristiques I_{ds} - V_{ds} du CNTFET.

III.3.1.c. Influence de l'épaisseur de l'oxyde sur les caractéristiques I-V:

La figure (III.8) représente l'influence de l'épaisseur de la couche d'oxyde e_{ox} sur la variation du courant de drain I_{ds} en fonction des tensions de polarisation de drain V_{ds} et de grille V_{gs} . Afin d'examiner l'effet de la variation de e_{ox} sur les caractéristiques I_{ds} - V_{ds} du transistor CNTFET étudié précédemment. Nous avons choisi trois valeurs de l'épaisseur de l'oxyde. Les résultats de la simulation sont présentés sur la figure (III.8). Cette figure montre que l'effet de l'épaisseur de l'oxyde sur les caractéristiques I-V du transistor CNTFET est juste comme l'effet de longueur de grille, c'est-à-dire si l'épaisseur de la couche d'oxyde e_{ox} diminue, le courant de drain I_d augmente.

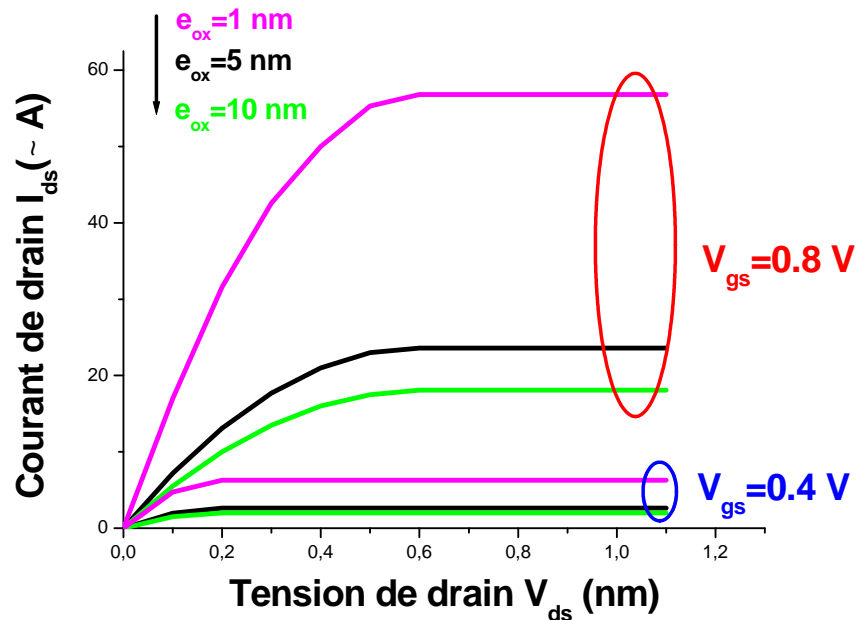


Figure III-8. Effet de l'épaisseur de l'oxyde sur les caractéristique I_{ds} - V_{ds} du CNTEFT.

III.3.1.d. Influence de la tension de seuil sur les caractéristiques I-V:

Sur la figure (III.9), nous avons présenté l'influence de la tension de seuil sur les caractéristiques I-V du CNTFET, cette tension de seuil est décrit en qualité le passage entre le régime passant et celui bloqué du transistor, à partir de cette tension on peut dire que le courant de drain est commencé d'apparaître, donc, quand cette tension est plus petite quand le courant

de drain est plus grand, et par contre quand cette tension est plus grande, le courant de drain est diminué exactement comme est illustre dans la figure.

En effet la tension de seuil augmente quand l'épaisseur de l'oxyde augmente. En observant la caractéristique $I_{ds}-V_{ds}$, On remarque aisément que le courant I_{ds} augmente lorsque e_{ox} diminue, et vice et versa. Ce qui revends à dire qu'une épaisseur de l'oxyde anormalement importante pour des structures à faibles géométries a pour conséquence l'isolation de la grille qui ne commande plus le canal. De ce fait l'épaisseur de l'oxyde doit être la plus mince possible mais tout en étant comprise dans des normes admissibles et non inférieure à une certaine valeur qui changerait la nature de la structure et ceci afin d'avoir un meilleur courant. Notons qu'une épaisseur de grille importante risquerait d'isoler la grille. La variation de la tension de seuil avec l'épaisseur de l'oxyde est représentée sur la figure qui suit.

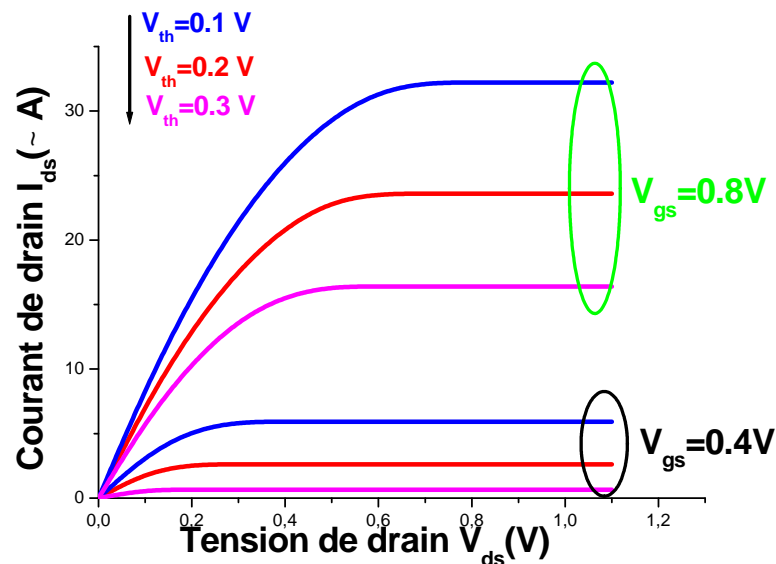


Figure III.9. Effet de la tension de seuil sur les caractéristique I-V du CNTEFT.

III-4. L'effet des différents paramètres sur le courant lumineux (courant optique) :

La stimulation optique a un effet important sur quelques composants à base de nanotubes de carbone notamment le transistor OG-CNTEFT, le courant électrique résulte sur cette influence est appelé courant lumineux ou courant optique (expression II-22). Dans les

paragraphes suivants, nous présentons l'effet de ce courant sur les caractéristiques I_{ds} - V_{ds} du composant OG-CNTFET étudié ainsi que l'effet de quelques paramètres sur le courant optique lui-même.

III-4. a. Effet de la puissance optique sur le courant lumineux :

Pour examiner l'effet de la puissance optique (puissance produite par une diode Laser) sur courant lumineux du transistor CNTFET. Nous avons étudié la variation du courant lumineux en fonction de quelques valeurs de la puissance optique (de 10 mW jusqu' à 100 mW). Les résultats de la simulation sont présentés sur la figure (III.10), cette figure montre que la relation entre les deux quantités est une fonction linéaire, ou le courant lumineux dans cette gamme augmente linéairement avec la puissance optique produite par le Laser.

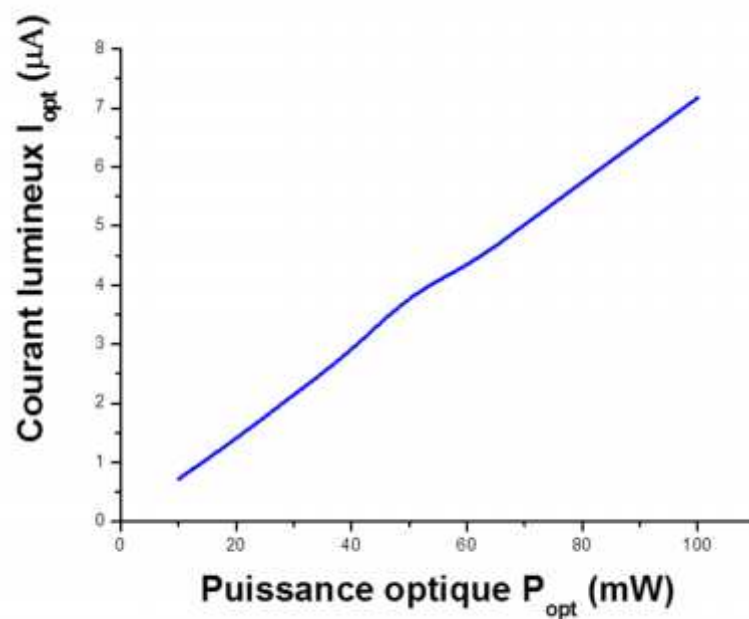


Figure III.10. Relation puissance optique- courant lumineux produit dans l'OG-CNTEFT.

III-4. b. Effet de la longueur d'onde sur le courant lumineux :

La Figure (III.11) représente l'influence de la longueur d'onde du laser utilisé λ_{li} sur la variation du courant optique I_o . Sur cette figure, nous pouvons caractériser trois zones différentes de fonctionnement à desquelles le courant optique a un comportement particulier : La première zone ($\lambda_{li} = 0.4 \mu m$ à $0.44 \mu m$) : On remarque le courant I_o augmente lorsque λ_{li} augmente. La deuxième zone ($\lambda_{li} = 0.44 \mu m$) : le courant I_o prendra la

maximum valeur pour $I_{opt} = 5.3 \mu A$. La troisième zone ($\lambda_{laser} = 0.44 \mu m$ à $0.5 \mu m$) : On remarque le courant I_{opt} diminue malgré la longueur d'onde « λ_{laser} » augmente. A partir de cette figure, nous constatons que le courant lumineux dans le composant OG-CNTFET étudié ne peut pas être existé sauf dans une bande étroite d'une lumière caractérisée.

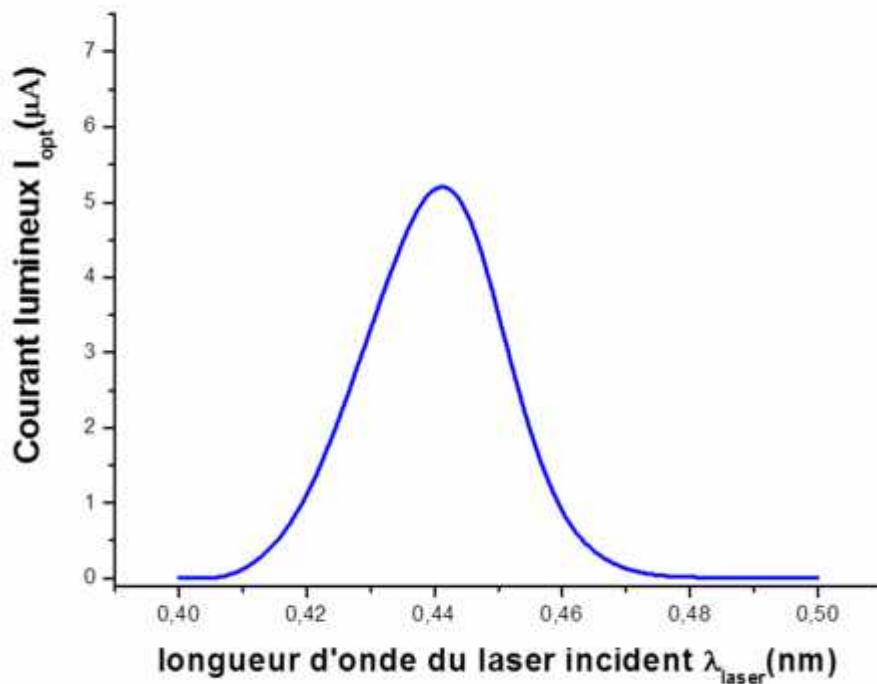


Figure III.11. Effet de la longueur d'onde du Laser sur le courant lumineux dans l'OG-CNTEFT étudié.

III-4. c. Effet de la surface sur le courant lumineux :

La surface effective est celle sous la grille qui est exposé à la lumière $S_{eff} = W_{eff} \cdot L$, avec W_{eff} est la largeur effective de la surface supérieure du composant et L est la longueur de la grille. Afin d'examiner l'effet de cette surface sur le courant lumineux, nous avons présenté dans la figure III.12 la variation du courant de drain en fonction de la largeur W_{eff} (W_{eff} varie du 50 à 200 nm) effective car la longueur de grille est fixé ($L = 100 \text{ nm}$). La figure montre que la relation entre la surface exposée à la lumière et le courant lumineux produit est une relation similaire, si la surface augmente le courant augmente aussi et vice-versa.

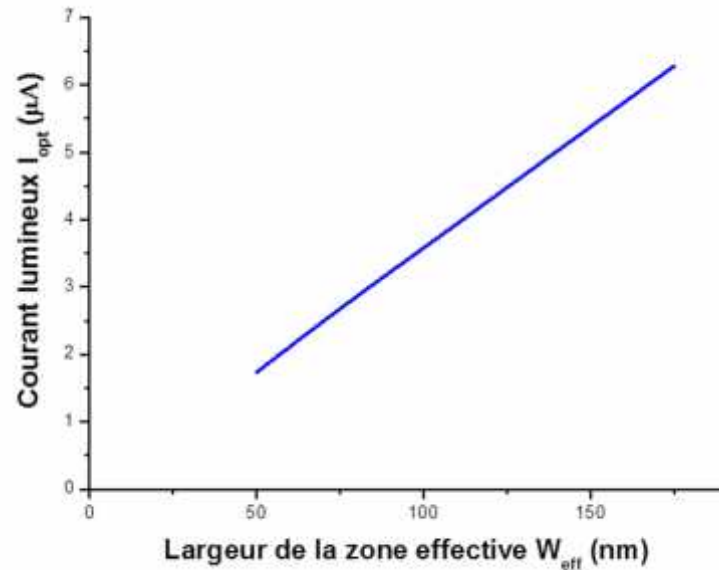


Figure III.12. Effet de largeur de la zone effective sur le courant lumineux du CNTFET.

III-4. d. Effet du diamètre du spot lumineux et de la constante gaussienne sur le courant lumineux:

Les figures (III-12), (III-13), présentent par ordre l'effet du diamètre du spot lumineux (d_s) et de la gaussienne (σ) sur le courant optique, ou nous remarquons sur la première figure que le courant optique diminue avec l'augmentation du d_{spot} mais augmente avec l'augmentation de la gaussienne σ .

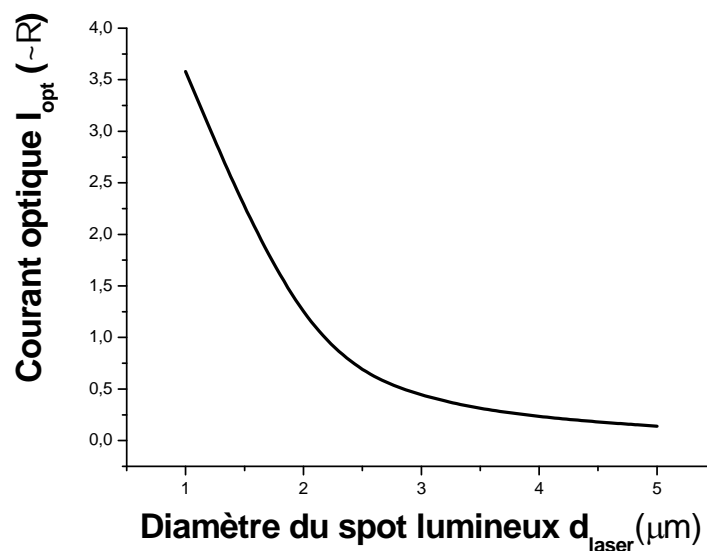


Figure III.13. Effet du diamètre du spot lumineux sur le courant lumineux du CNTFET.

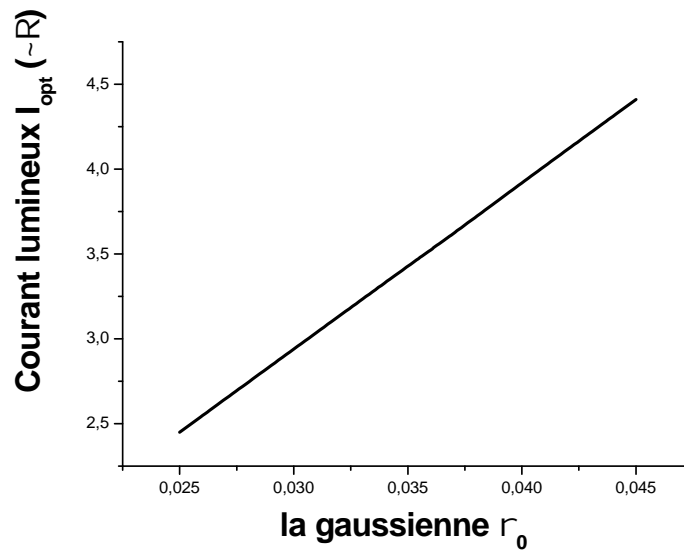
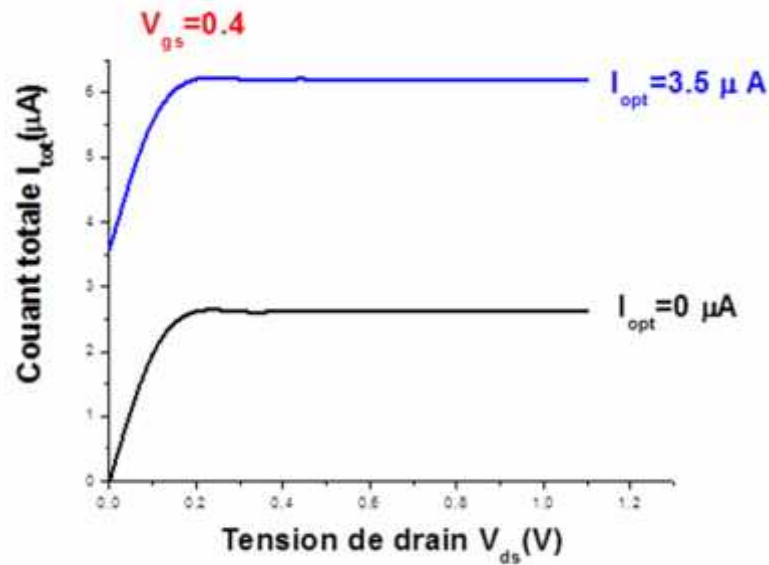


Figure III.14. Effet de la gaussienne r_0 sur le courant lumineux du CNTFET.

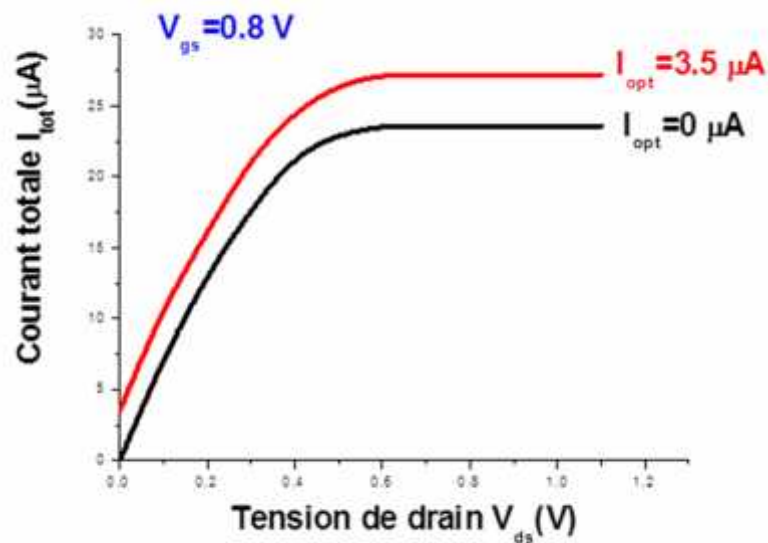
III-5. Courant total :

Le courant totale « I_{ti} » c'est le courant de drain sous l'influence de la lumière, donc il représente la somme du courant de drain dans l'obscurité et le courant optique résulte de l'excitation optique (expression II.26). Dans les paragraphes suivants, nous serons présentés ce courant optique et examinés l'influence de quelques paramètres tels que la tension de grille V_{gs} , la puissance d'excitation optique et la longueur d'onde du Laser sur la caractéristique $I_{tot}-V_{ds}$.

La figure (III.15) représente une comparaison de la caractéristique $I_{ds}-V_{ds}$ dans l'obscurité et sous l'excitation optique (courant total) pour deux valeurs de la tension de grille : (a) $V_{gs} = 0,4 V$ et (b) $V_{gs} = 0,8 V$, ces deux figure montre que la différence entre les deux courant en tous points de la tension de drain V_{ds} dans les deux cas est importante, car le courant optique dans ce cas est égale à $3,5 \mu A$, cette valeur est supérieure à celle du courant de saturation dans l'obscurité pour $V_{gs} = 0,4 V$ et représente une différence remarquable pour $V_{gs} = 0,8 V$. ce résultats montre le courant optique à une influence que ne peut pas négligé et qu'il faut prendre en considération dans toutes applications des transistors OG-CNTFET dans les différents domaines de la technologie.



(a)



(b)

Figure III.15. Comparaison entre le courant de drain total (au-dessus) et le courant de drain dans l'obscurité (au-dessous) : (a) pour $V_{gs} = 0,4$ V et (b) pour $V_{gs} = 0,8$ V.

La figure (III.16) représente une comparaison de la caractéristiques $I_{ds}-V_{gs}$ pour une tension de drain $V_{ds} = 0,4$ V pour les deux cas : sous l'excitation lumineuse (courant total) pour $I_{opt} = 3,5 \mu\text{A}$ et à l'obscurité pour $I_{opt} = 0$. On peut remarquer sur cette figure aussi la différence

entre les deux courants et par conséquent l'importance de l'excitation lumineuse dans les composants OG-CNTFET.

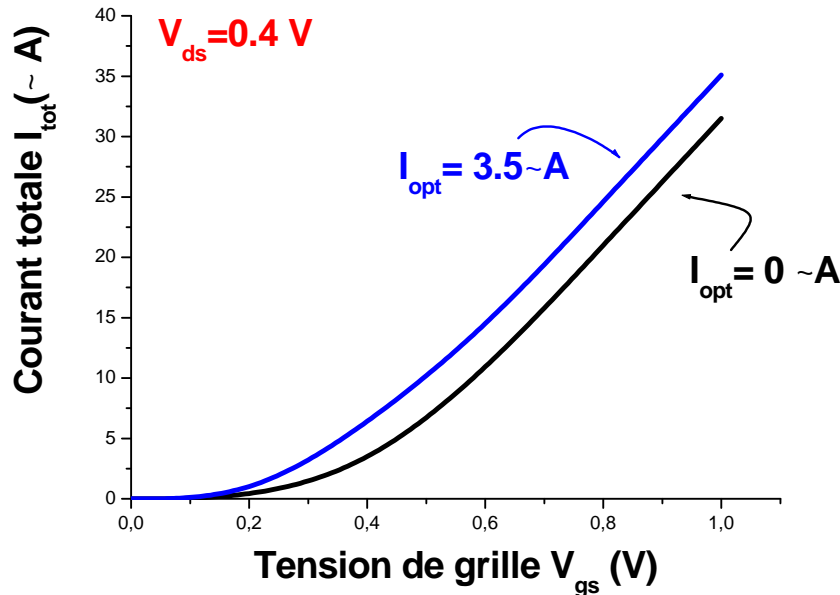


Figure III.16. Influence du courant optique sur la caractéristique I_{ds} - V_{gs} pour $V_{ds} = 0,4$ V

III-5. 1. Effet de la puissance optique sur le courant total :

Pour examiner l'effet de la puissance optique sur courant totale du transistor OG-CNTFET étudié, Nous avons présentés sur la figure (III.17) la caractéristique courant total tension de drain I_{tot} - V_{ds} pour $V_{gs} = 0,6$ V pour trois valeurs différentes de la puissance optique ($P_{opt} = 10, 50$ et 100 mW). Cette figure réaffirme la correspondance entre la puissance d'excitation optique et le courant optique produit dans le composant, et par conséquent la correspondance entre la puissance et le courant total de drain.

III-5. 2. L'effet de la longueur d'onde sur le courant total :

La figure (III.18) représente la caractéristique I_{tot} - V_{ds} à une tension de grille $V_g = 0,4$ V, pour trois valeurs différentes de la longueur d'onde ($\lambda = 43, 44, 45 \mu m$), cette figure réaffirme aussi que le courant optique est plus sensible aux certain longueurs d'onde qu'autres, dans le cas étudié dans cette figure nous remarquons que le courant correspondant de $\lambda = 44 \mu m$ est supérieur aux courants correspondants à $\lambda = 43 \mu m$ et à $\lambda = 45 \mu m$. Cette caractéristique

confirme que chaque composant optoélectronique est sensible à une longueur d'onde typique, ce qu'est très important surtout dans le domaine de la télécommunication.

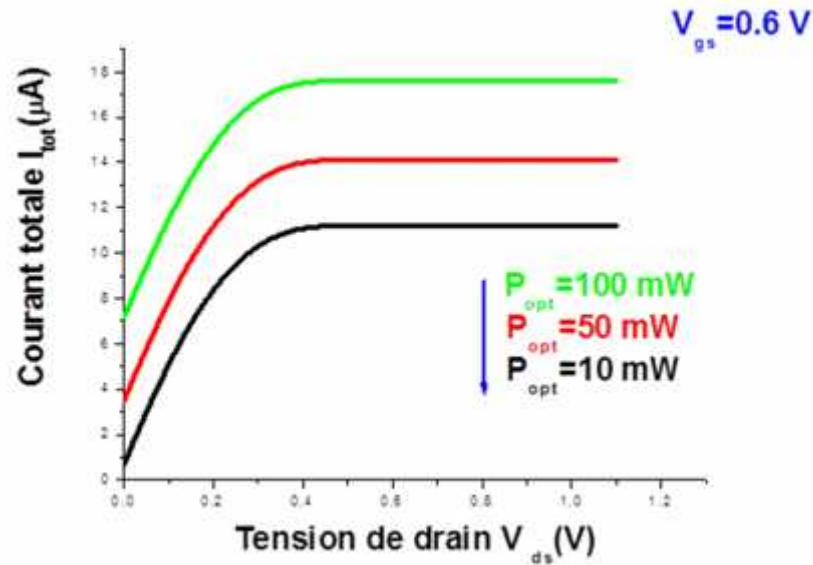


Figure III-17 : Caractéristique $I_{t_i} = f(V_{d_a})$ pour différentes valeurs de puissances optiques.

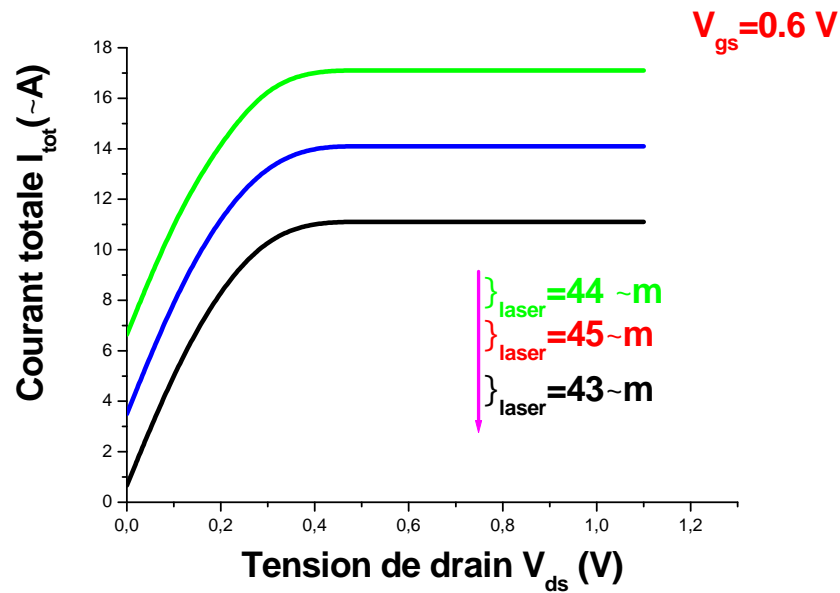


Figure III-18 : Caractéristique $I_{t_i} = f(V_{d_a})$ pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

III-6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous présentons une étude simulatrice des caractéristiques statiques et des caractéristiques optoélectroniques d'un transistor OG-CNTFET. Le chapitre est composé de trois parties : la première partie est consacrée aux caractéristiques courantes tensions du composant OG-CNTEFET à l'obscurité, où nous avons vu que l'OG-CNTEFT présente des caractéristiques similaires aux autres transistors à effet de champ comme le MOSFET et les autres CNTEFT. La deuxième partie du chapitre est réservée à l'étude des caractéristiques optoélectroniques du composant OG-CNTEFT, cette caractéristique qui est propre à ce composant et qui ouvre une grande possibilité d'utiliser ce type de composant surtout dans le domaine de l'optoélectronique et de la télécommunication dans les prochaines générations des appareils électroniques à large gamme. La troisième partie présente l'influence de l'excitation lumineuse sur les caractéristiques statiques du composant OG-CNTFET, où nous considérons que cette influence a une importance très remarquable et n'est pas négligeable.

Enfin, nous constatons que cette étude est importante pour la conception et l'utilisation des composants de type OG-CNTEFT dans les différents domaines technologiques.

Conclusion générale

Conclusion générale

La recherche des nouveaux matériaux semi-conducteurs et des nouveaux dispositifs (pour remplacer le silicium et le MOSFET) doit conduire à une nouvelle révolution au sein des industries électroniques. Les nanotechnologies sont un secteur innovant et prometteur qui présente des nombreuses perspectives d'applications. Afin que les attentes à leur égard deviennent des réalités, un important effort de recherche fondamentale et appliquée est au préalable nécessaire. Le nanotube de carbone (CNT) est à ce jour l'un des candidats les plus prometteurs pour faire passer le transistor à effet de champ (FET) à l'échelle nanométrique. Les transistors à effet de champ à base de nanotubes de carbone (Carbon NanoTube Field Effect Transistors, CNTFET) figurent aujourd'hui parmi les dispositifs susceptibles de remplacer la technologie MOSFET Si. Des recherches intensives sont en cours afin de déterminer les caractéristiques des transistors à nanotube de carbone (CNTFET).

C'est dans ce cadre que situe notre travail dans ce mémoire qui s'intéresse à présenter une simulation des caractéristiques optoélectroniques des transistors à effet de champ à base de nanotube de carbone OG-CNTFET. Le manuscrit que nous avons présenté se compose de trois chapitres.

On commence notre étude par une recherche bibliographique sur les nanotubes de carbone et ces différentes caractéristiques puis nous avons présenté la structure et le principe de fonctionnement des différents types des transistors à base de CNT, ainsi que un coup-d'œil sur les nouvelles applications de ces nano-objets dans le domaine de l'optoélectronique.

Ensuite, nous avons détaillé le traitement mathématique pour établir une modélisation des caractéristiques statiques et optoélectroniques des composants de types OGCNTEFT, cette étude permet de déterminer et de simplifier les expressions mathématiques nécessaires.

À la fin de ce mémoire nous avons présenté les résultats de l'étude simulatrice à l'aide d'un programme que nous avons établi en langage de Fortran, Les caractéristiques I-V ainsi que l'effet de quelques paramètres sur les caractéristique I-V de l'OG-CNTEFT dans l'obscurité sont présentés au cours de ce chapitre, et enfin les caractéristiques optoélectroniques et l'effet des différents paramètres sur le courant lumineux (courant optique) et sur le courant total sont aussi présentés dans ce chapitre.

L'étude présentée dans ce manuscrit, nous a donné une vision plus proche aux nanotubes de carbone et leurs applications au domaine de l'électronique. L'influence des différents

paramètres physiques et technologiques sur les caractéristiques statiques et optoélectroniques des CNTEFET de type grille optique (OG-CNTEFT), nous a permis aussi de conclure quelques informations importantes sur le comportement et la performance de ce type de composants.

Un certain nombre de perspectives est nécessaire pour compléter et poursuivre le travail réalisé au cours de ce mémoire.

- Des améliorations sur le modèle mathématique sont nécessaires pour résoudre les problèmes observés soit au côté mathématique ou au côté de la simulation.
- Faire le passage vers la simulation des circuits logiques et analogiques utilisant ces dispositifs.
- L'exploitation des OG-CNTFETs dans le domaine optoélectronique, Cet aspect - n'ont pas été abordés dans le cadre de ce mémoire - constituent donc autant de perspectives.

BIBLIOGRAPHIE:

- [1] Khemissi.Saadeddine , «Modelisation non Lineaire Des Composants A EFFET De Champ» thèse de doctorat , université Constantine.(2007)
- [2] W. Schokley « A unipolar field effect transistor », Proc IEEE, Vol 40, 1952.
- [3] A. Jorio, M. S. Dresselhaus et G.Dresselhaus, « Carbon nanotubes: advanced topics in the synthesis, structure, properties, and applications », Topics in Applied Physics, vol. 111, Springer, 2008.
- [4] Izard Nicolas, « Nanotubes de carbone : systèmes pour la limitation optique», Thèse de Doctorat, Université Montpellier II (2004)
- [5] Park B., Shim J.W., Choi H.J., Park Y.W. Synthetic Metals, 56 :3258 (1993)
- [6] Yin M.T , et Cohe M.L, « Physical Review Letter », 50 :2006 (1983)
- [7] A.Mouatsi . «Composants à hétérostructure application en nanoélectronique et nanophotonique »Thèse de doctorat.Université Constantine 1.(2003)
- [8] Sandra RIZK, «Elaboration Et Caractérisation De Nanotube De Carbone dans cvd Assisté par Plasma Microonde » ,Thèse doctorat.Université Henri Poincare,Nancy 1,(2009)
- [9] Michael, BOZLAR ,«Modification de surface des nanotube de carbone par un polymère conducteur électrogénère pour la réalisation de nanocomposites multifonctionnels»,Thèse doctorat ,école centrale paris ,(2007)
- [10] Peter J,F,Harris «Carbon nanotubes and related structures new materials for the twenty first century», Cambridge université Press,New York.(2004)
- [11] Mrak D ,Taczak «controlling the structure and properties of carbon Nanotube»,MITRE Nanosystems Grpup.(2007).
- [12] Jean ,Malo Chehab Guillaume Saint, pierre «T.P.E Les Nanotube de Carbon dans le Domaine Médical» ,(2007-2008)
- [13] P, Avouris, Z. Chen, et V. Perebeinos, « Carbon-based electronics, » *Nat Nano*, vol. 2, Oct. 2007, p, 605-615.
- [14] R, Saito, « *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, World Scientific Publishing Company» ,(1998).
- [15] Charlotte, BERNARD, « Propriétés mécaniques des nanotubes de carbone en tant que nanosondes et leur fonctionnalisation par bio-nanoparticules », (2007)
- [16] F.Dalmas, « composites à matrice polymère et nanorenforts flexibles : propriétés mécaniques et électriques »,thèse de doctorat INP Grenoble ,(2005)
- [17] E.Minoux, « Etude et développement de sources électronique à émission de champ à base de nanotube de carbone. Application aux hyperfréquences ». thèse de doctorat ,école polytechnique de paris ,(2006)

- [18] R.B.Sanudin , «Characteization of ballistic carbon nanotube field effect transistor»these de master ,université de Malaysia ,(2005)
- [19] Y.F.Chen, « semiconducting carbon nanotube transistors : electron and spin transport properties », these de PhD, Université de MARYLAND,(2006)
- [20] M.Daenen et R.D ,Fouw et B.Hamers « The wondrous world of carbon nanotubes» a review of current carbon nanotube technologies ,(2003)
- [21] Diana .Salem, «Synthese de nanotube de carbon monofeuillets individuels et composites moeles polymers- nanotube de carbon .application a l'effet photovoltaïque »,Thèse de doctorat , Université de Satrasbourag.(2012)
- [22] Aurélien GOHIRE, « CINETIQUE de croissance de nanotube de carbon mono-parois et multi -parois orientes par procede plasma » ,Thèse de doctorat, Université de Nantes (2007)
- [23] Y. L. Kim et al., «Highly Aligned Scalable Platinum-Decorated Single-Wall Carbon Nanotube Arrays for Nanoscale Electrical Interconnects, » ACS Nano, vol. 3, no. 9, pp. 2818-2826, (2009).
- [24] W. Fu, L. Liu, K. Jiang, Q. Li, and S. Fan, « Super-aligned carbon nanotube films as aligning layers and transparent electrodes for liquid crystal displays, » Carbon, vol. 48, no. 7, pp. 1876-1879, Jun.(2010).
- [25] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, and P. Avouris, Eds., « Carbon Nanotubes » , vol. 80.Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, (2001).
- [26] P. Avouris, J. Appenzeller, R. Martel et S. J. Wind, « Carbon nanotube electronics », Proceedings of the IEEE, vol. 91, no. 11, pp. 1772-1784, 2003.
- [27] S. Iijima and T. Ichihashi ,«Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. »,Nature, 363, 6430, 603-605, (1993)
- [28] Mahroug rabiaa « Modél isation et simulation des propriétés physiques et électronique des nanotubes de carbone : Application au CNTFET », thèse de doctorat, université de Hasiiba Benbouali Chlef, (2008-2009)
- [29] j.M. Chehab, «Les nanotubes de Carbone dans le domine medical » GUILLAUME SAINT –PIERRE , (2007/2008)
- [30] S . Decossas , « Nanotribologie par microscopie a force atomique (AFM) sur des nanotubes de carbone» thèse de doctorat , université de G Rrenoble I, (2001)
- [31] S.Grigorian, D.Tranchida, D.Ksenzov, F.Schäfers, H.Schönherr, U.Pietsch «Structural and morphological changes of P3HT films in the planar geometry of an OFET device under an applied electric field», European Polymer Journal, (2001), 47, p. 2189–2196.
- [32] Khemissi.Saadeddine , «Modelisation non Lineaire Des Composants A EFFET De Champ» thèse de doctorat , université Constantine,(2007)
- [33] P. Avouris, J. Chen, M. Freitag, V. Perebeinos et J. C. Tsang, « Carbon nanotube optoelectronics », Physica Status Solidi (B) Basic Research, vol. 243, no. 13, pp. 3197-3203, (2006).

- [34] BOUAZIZ.NASSIMA, «Modélisation analytique des composants à base nanotube carbone (CNTFET) », thèse mastre, université de
- [35] H. Cazin d'Honincthun, S. Galdin-Retailleau, A. Bournel, P. Dollfus, and J. Bourgoin, «Monte Carlo study of coaxially gated CNTFETs: capacitive effects and dynamic performance», *Comptes Rendus Physique*, vol. 9, no. 1, pp. 67-77, Jan. (2008).
- [36] H. Cazin d'Honincthun, H. Nguyen, S. Galdin-Retailleau, A. Bournel, P. Dollfus, and J. Bourgoin, «Influence of capacitive effects on the dynamic of a CNTFET by Monte Carlo method», *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 40, no. 7, pp. 2294-2298, May. (2008).
- [37] A. Bachtold, P. Hadley, T. Nakanishi, et C. Dekker, « Logic Circuits with Carbon Nanotube Transistors » *Science*, vol. 294, Nov. 2001, p. 1317-1320.
- [38] P. Avouris, Z. Chen, and V. Perebeinos, « Carbon-based electronics, » *Nature Nanotechnology*, vol. 2, no. 10, pp. 605-615, Oct. 2007.
- [39] Y. Lin, J. Appenzeller, J. Knoch, and P. Avouris, “High-Performance Carbon Nanotube Field-Effect Transistor With Tunable Polarities,” *IEEE Transactions On Nanotechnology*, vol. 4, no. 5, pp. 481-489, 2005
- [40] A. Javey, H. Kim, M. Brink, Q. Wang, A. Ural, J. Guo, P. McIntyre, P. McEuen, M. Lundstrom, et H. Dai, «High-[kappa] dielectrics for advanced carbon-nanotube transistors and logic gates, » *Nat Mater*, vol. 1, Déc.(2002), p. 241-246
- [41] Jia Chen, C. Klinke, A. Afzali, K. Chan, et P. Avouris, “Self-aligned carbon nanotube transistors with novel chemical doping,” *IEDM Technical Digest. IEEE International Electron Devices Meeting*,(2004)., San Francisco, CA, USA: , p. 695-698
- [42] J. Appenzeller, Y.-M. Lin, J. Knoch,Z. Chen et P. Avouris, « Comparing carbon nanotube transistors - the ideal choice: a novel tunneling device design », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 52, no. 12, pp. 2568-2576,(2005).
- [43] A. Javey, R. Tu, D. B. Farmer, J. Guo, R. G. Gordon et H. Dai, « High performance n-type carbon nanotube field-effect transistors with chemically doped contacts », *Nano Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 345-348, (2005).
- [44] Si-yu Liao, « caractérisation électrique et électro-optique de transistor a base de nanotube de carbone en Vue de leur modélisation compacte», thèse de doctorat; université de bordeaux 1, soutenue le 29 avril 2011
- [45] A. Javey, J. Guo, Q. Wang, M. Lundstrom, et H. Dai, «Ballistic carbon nanotube field-effect transistors », *Nature*, vol. 424, 2003, p. 654-657.
- [46] J. Appenzeller, Yu-Ming Lin, J.Knoch, Zhihong Chen, et P. Avouris, «Comparing carbon nanotube transistors - the ideal choice: a novel tunneling device design», *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 52,(2005), p. 2568-2576.
- [47] M. Freitag, J.C. Tsang, A. Bol, D. Yuan, J. Liu, et P. Avouris, , « Imaging of the Schottky Barriers and Charge Depletion in Carbon Nanotube Transistors», *Nano Letters*, vol. 7, Juillet. (2007), p. 2037-2042.
- [48] M. Freitag, Y. Martin, J.A. Misewich, R. Martel, et P. Avouris, , « Photoconductivity of Single Carbon Nanotubes», *Nano Letters*, vol. 3, (2003), p. 1067-1071.

- [49] K. Balasubramanian, Y. Fan, M. Burghard, K. Kern, M. Friedrich, U. Wannek, et A. Mews, «Photoelectronic transport imaging of individual semiconducting carbon nanotubes», *Applied Physics Letters*, vol. 84, (2004), p. 2400
- [50] J. Knochet J. Appenzeller, « Carbon Nanotube Field-effect Transistors-The Importance of Being Small», *AmIware Hardware Technology Drivers of Ambient Intelligence*, (2006), p. 371-402.
- [51] Z. Zhang et al., « Self-Aligned Ballistic n-Type Single-Walled Carbon Nanotube Field-Effect Transistors with Adjustable Threshold Voltage», *Nano Letters*, vol. 8, no. 11, pp. 3696-3701, Nov. (2008).
- [52] Changxin Chen, Dong Xu, Eric Siu-Wai Kong, and Yafei Zhang, « Multichannel Carbon-Nanotube FETs and Complementary Logic Gates With Nanowelded Contacts», *Electron Device Letters, IEEE*, vol. 27, no. 10, pp. 852-855,(2006).
- [53] V. Derycke, R. Martel, J. Appenzeller, and P. Avouris, « Carbon Nanotube Inter- and Intramolecular Logic Gates», *Nano Letters*, vol. 1, no. 9, pp. 453-456, 2001.
- [54] J. Borghetti et al., « Optoelectronic Switch and Memory Devices Based on Polymer-Functionalized Carbon Nanotube Transistors», *Advanced Materials*, vol. 18, no. 19, pp. 2535-2540, (2006).
- [55] T. Erb et al., «Structural and optical properties of both pure poly(3-octylthiophene) (P3OT) and P3OT/fullerene films» *Thin Solid Films*, vol. 450, no. 1, pp. 97-100, Feb. (2004).
- [56] H. Hu, S. Kung, L. Yang, M. Nicho, and R. M. Penner, «Photovoltaic devices based on electrochemical-chemical deposited CdS and poly3-octylthiophene thin films», *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, no. 1, pp. 51-54, Jan. (2009).
- [57] C. Dimitrakopoulos and P. Malenfant, «Organic Thin Film Transistors for Large Area Electronics, », *Advanced Materials*, vol. 14, no. 2, pp. 99-117, (2002)
- [58] H. Cazin d'Honincthun, S. Galdin-Retailleau, A. Bournel, P. Dollfus, and J. Bourgoïn, «Monte Carlo study of coaxially gated CNTFETs: capacitive effects and dynamic Performance, » *Comptes Rendus Physique*, vol. 9, no. 1, pp. 67-77, Jan. (2008)
- [59] N. Izard, E. Gaufrès, et L. Vivien, « Une nouvelle photonique à base de nanotubes de carbone », *Nanophysique*, pp 65, 71. article téléchargé en (2016).
- [60] J. Borghetti et al., «Optoelectronic Switch and Memory Devices Based on Polymer-Functionalized Carbon Nanotube Transistors », *Advanced Materials*, vol. 18, no. 19, pp. 2535-2540,(2006).
- [61] T. Erb et al., «Structural and optical properties of both pure poly(3-octylthiophene) (P3OT) and P3OT/fullerene films, » *Thin Solid Films*, vol. 450, no. 1, pp. 97-100, Feb. (2004)
- [62] H. Hu, S. Kung, L. Yang, M. Nicho, and R. M. Penner, « Photovoltaic devices based on electrochemical-chemical deposited CdS and poly3-octylthiophene thin films» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, no. 1, pp. 51-54, Jan. 2009.

- [63] Dinh Sy Hien¹, Nguyen Thi Luong, Thi Tran Anh Tuan and Dinh Viet Nga¹, «Modeling of planar carbon nanotube field effect transistor and three dimensional simulation of current-voltage... », Article in Journal of Physics Conference Series · September .(2009)
- [64] S. Datta, « Electronic transport in mesoscopic systems », Cambridge Studies in Semiconductor Physics and Microelectronic Engineering, vol. 3, Cambridge University Press, (1997).
- [65] S. Yang, C. Wu, C. Lee, and M. Liu, « Synthesis and luminescence of red MEH-PPV:P3OT polymer » .Displays, vol. 29, no. 3, pp. 214-218, Jul. 2008.
- [66] M. Engel et al., “Thin Film Nanotube Transistors Based on Self-Assembled, Aligned, Semiconducting Carbon Nanotube Arrays». ACS Nano, vol. 2, no. 12, pp. 2445-2452, Dec.(2008).
- [67] H. B. Peng, M. E. Hughes, and J. A. Golovchenko, «Room-temperature single charge sensitivity in carbon nanotube field-effect transistors, », Applied Physics Letters, vol. 89, no. 24, p. 243502, (2006).
- [68] S. Fregonese et al, « Computationally Efficient Physics-Based Compact CNTFET Model for Circuit Design». IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 55, no. 6, pp. 1317-1327, (2008).
- [69] C. Adessi et al., “Multiscale simulation of carbon nanotube devices,” Comptes Rendus Physique, vol. 10, no. 4, pp. 305-319, May.(2009).

Résumé :

Dans ce travail, nous avons simulé les Nanotubes de carbone CNT en termes de propriétés Optoélectroniques, cette étude est basée sur le changement des différents paramètres géométrique et physiques (diamètre, longueur de grille, tension de seuil, longueur d'onde, épaisseur de l'oxyde...) afin d'obtenir les effets de ces paramètres sur les caractéristiques spécifiques du dispositif conclurent le mémoire.

Et celle-ci inclut également les courbes et les résultats obtenus par des expressions mathématiques d'une part et d'autre part d'obtenir des résultats acceptables par rapport aux résultats expérimentaux.

Mots clés: Nanotube de carbone (CNT), , propriétés Optoélectroniques,

Abstract:

In this work, we simulated the CNT carbon nanotubes in terms of Optoelectronic properties, this study is based on the change of the different geometric and physical parameters (diameter, grid length, threshold voltage, wavelength, thickness of l Oxide, etc.) in order to obtain the effects of these parameters on the specific characteristics of the device conclude the memory.

And the latter also includes curves and results obtained by mathematical expressions on the one hand and the other hand to achieve acceptable results compared to the experimental results.

Keywords: CNT carbon nanotubes, , Optoelectronic properties

ملخص

في هذا العمل قمنا بمحاكاة الانابيب النانو كاربونية من حيث الخصائص الكهروضوئية وهذه الدراسة تركز على في العوامل الفيزيائية و الهندسية و في الاخير اسنتاج تاثير هذه العوامل على الخصائص الكهروضوئية للجهاز .
و هذا الاخير يتضمن نتائج المحصل عليها و بواسطة العبارات الرياضية من جهة ومن جهة اخرى تحقيق نتائج مقبولة و جيدة مقارنة بالنتائج التجريبية
لكلمات المفتاحية : الانابيب النانو الكاربونية. الخصائص الكهروضوئية