

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Faculté De Génie Électrique Et D'informatique
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Études
De MASTER ACADIMIQUE

Spécialité : Génie Microélectronique

Présenté par

HAMRANI Assia

Soutenu le : 24/09/2014

Thème

Transistor à Effet de Champ à Base de Nanotube de Carbone

JURY

Mr A.LAKHLEF	Maître de Conférences	UMMTO	Président
Mr A. BENFDILA	Professeur	UMMTO	Rapporteur
Mr M.BERD	Maître de Conférence	UMMTO	Examineur
Mme N.HATEM	Maître de conférences	UMMTO	Examinatrice

Première promotion 2014

Remerciement

Je tiens à remercier dieu, de nous avoir mis sur le droit chemin et de nous avoir éclairé la voie du savoir.

Un grand merci à mon encadreur monsieur Arezki BENFDILA pour son encadrement, sa compréhension et sa gentillesse durant tout le long de mon mémoire, ainsi pour ses qualités humaines remarquables.

J'exprime toute ma reconnaissance et gratitude à Mr Berd Mourad pour son aide précieuse.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury en acceptant d'examiner ce modeste travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, je tiens à remercier aussi toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tous et à toutes

Assia .H

Dédicaces

Je Dédie ce travail

*A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de sagesse et de
patience.*

*A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de
l'amour et la reconnaissance.*

A mes parents.

*A mes chères grands-mères, mon frère Salem et mes sœurs Djedjiga, Houria,
Cylia;*

A mon oncle Kamel;

Et à toute la famille HAMRANI.

*A mes meilleurs amies et amis surtout : Dalia, Fatiha, Aldjia, Kenza, Samira,
Salim, Hocine, et leurs familles.*

*A tous les proches, cousins et cousines, que j'ai mentionnés et les autres que j'ai
oubliés veuillez m'excuser.*

A mes collègues du groupe MGM.

Et à tous qui me connaît et compte sur moi...

Assia.H

NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS

\vec{Ch}	Vecteur chiral
\vec{T}	Vecteur de translation
\vec{a}_1, \vec{a}_2	Vecteurs de base du Graphène
(n, m)	Chiralité du nanotube
d	Diamètre du nanotube
θ	Angle chiral
N	Nombre d'hexagones
E_{GAP}	Énergie de la bande interdite du nanotube
I_{OFF}	Courant de drain à l'état bloqué (courant de fuite)
I_{ON}	Courant de drain en conduction
V_{GS}	Tension grille –source
V_{DS}	Tension drain –source
V_{CNT}	Potentiel de surface
I_D, I_{DS}	Courant de drain
g_m	Transconductance
g_d	Conductance
S	Pente sous le seuil
C_{INS}	Capacité de l'isolant
Q_{CNT}	Charges dans le nanotube
ϵ_{OX}	La permittivité diélectrique de l'oxyde
t_{OX}	Épaisseur de l'oxyde
ϕ_m	Travail de sortie du métal
Δ_p	Énergie de la $p^{ième}$ sous –bande
NTC	Nanotube de Carbone

SWNT	Single Wall Nanotube
MWNT	Multi Wall Nanotube
CVD	Chemical Vapor Deposition
PECVD	Plasma Enhanced CVD
AFM	Atomic Force Microscopy
ITRS	International Technology Roadmap for Semiconductors
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
SCE	Short Channel Effects
CNTFET, CNFET	Carbon Nanotube Field Effect Transistor
SBFET	Schottky Barrier Field Effect Transistor
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
PMMA	Poly Methyl Meth Acrylate
C-CNFET	Conventional Carbon Nanotube Field Effect Transistor
TEM	Transmission Electron Microscopy

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure I.1 : structure hexagonal de graphite.....	5
Figure I.2 : structure du diamant.	5
Figure I.3: le fullerène C60 possède 60 atomes de carbone et le C76 possède 16 atomes de carbone.	6
Figure I.4 : structure de graphène.....	7
Figure I.5 : structures de nanotube de carbone.....	8
Figure I.6 : Schématisation du vecteur chiral \mathbf{ch} du nanotube.	9
Figure I.7: Exemple de nanotube de différentes structures : (a) Nanotube chiral (10, 5), (b) nanotube Armchair (5, 5) et (c) un nanotube zigzag (9, 0).	11
Figure I.8 : (a) Réseau direct d'un feuillet de graphène $\mathbf{a1}$ et $\mathbf{a2}$ sont deux vecteurs de base du réseau. La partie grisée hexagonale représente une maille élémentaire, elle contient deux atomes de carbone C1 et C2. (b) Réseau réciproque associé dont $\mathbf{b1}$ et $\mathbf{b2}$ sont deux vecteurs de base. La partie grisée hexagonale représente une première zone de Brillouin (PZB). On définit les points de haute symétrie Γ et K. [2]	12
Figure I.9 : Structure de bandes du graphène.[7]	13
Figure I.10 : Structure de bandes des nanotubes de carbone déduite de celle du graphène.[8] 14	14
Figure I.11 : Densités d'états de nanotubes (5,5), (7,1) et (8,0).....	16
Figure I.12 : a) Vue en coupe transversale d'un CNTFET, b) caractéristique électrique d'un CNTFET.....	19
Figure II.1: représentation schématique d'un MOSFET	24
Figure II.2 : transistor à nanotube de carbone en configuration de grille arrière.	26
Figure II.3: Procédé de fabrication de CNTFET. (a) Marquage du substrat ; (b) Ouverture pour dépôt du catalyseur dans la photo-résine ;(c) Ajout du catalyseur et élimination de la photo-résine ;(d) Croissance des nanotubes par dépôt chimique en phase vapeur ; (e) Dépôt des électrodes.	26
Figure II.4 : dopage d'un CNTFET type P pour créer un CNTFET type N par le recuit.	27
Figure II.5: CNTFET type N par le dopage avec le potassium.....	28
Figure II.6: 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. $E_{F,S}$ et $E_{F,D}$ sont les niveaux de Fermi des métaux de source et drain respectivement.	30
Figure II.7: un DG-CNTFET avec l'effet du grille avant et arrière.	31
Figure II.8 : Diagramme de bande d'énergie $V_{DS} < 0$ et a) sans polarisation de grille, b) avec polarisation de grille négative et c) positive.....	32

Figure II.9 : Schéma d'un OG-CNTFET montrant une polarisation positive de la grille :a) état bloqué :b) état passante. [3].....	33
Figure III.1 : Schéma du transistor à nanotube à modulation de hauteur de barrière ou C-CNFET.	37
Figure III.2 : a) Représentation schématique simplifiée du bas de la bande de conduction selon l'axe source-drain pour $V_{DS} > 0$ V ; b) Niveau d'énergie des électrons dans la bande de conduction selon le vecteur d'onde dans la partie interne dont le bas de bande est modulé par le potentiel du canal VCNT . Les états +k sont remplis par le niveau de Fermi de la source et les états -k par le niveau de Fermi du drain ; c) schéma capacitif équivalent.	38
Figure III.3 : schéma de principe montrant les 3 premiers sous bandes.	40
Figure III.4 : la dispersion électronique d'énergie E(k) avec les sous bande de CNT.....	42
Figure III.5 : Densité d'état pour les premières sous bande.....	43
Figure III.6: Géométrie coaxial du CNTFET .le canal est de 200nm de long. Le diamètre du CNT est 0.55nm. L'oxyde de la grille est du SiO2 avec une épaisseur de 2nm.	44
Figure III.7 :Variation de courant de drain en fonction de VDS pour differente valeur de VGS.	44
Figure III.8 : Variation du courant de drain en fonction de VGS pour differents valeur de VDS.....	45
Figure III.9 : Variation de la densité de charge en fonction de VGS.....	46
Figure III.10 : a) Effet de sous bande sur la dispersion d'énergie E(k) pour un diamètre de 1.8nm.	47
Figure III.10 : b) effet de sous bande sur la dispersion d'énergie E(k) pour un diamètre de 3.9nm.....	47
Figure III.11 : Variation de IDS en fonction de VGS pour différentes diamètres du CNT (VDS=0.6).....	49
Figure III.12 : Variation de IDS en fonction de VDS pour différentes diamètres du CNT (VGS=0.4V).....	49
Figure III.13 : variation de I_{DS} en fonction de V_{DS} pour les trois premières sous bandes.....	50
Figure III.14 : variation de IDS en fonction de VGS pour les trois premières sous bande.....	51
Figure III.15 : Variation de IDS en fonction VDS pour les trois premiers sous bande(a) d=0.55nm et(b) d=1.8nm respectivement.	52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : les caractéristiques dimensionnelles des nanotubes de carbone.	16
Tableau I.2 : des applications électroniques réalisées avec des CNT s dans divers domaine..	18
Tableau III.1 : Oxydes considérés pour l'isolation de la grille avec différents constant diélectrique.	53

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR LES NANOTUBES DE CARBONE

I.FORME ALLOTROPIQUE DU CARBONE.....	4
I.1. Le carbone.....	4
I.2. Graphite.....	4
I.3. Diamant.....	5
II. LES NOUVELLES FORMES DE CARBONE.....	5
II.1. Fullerène.....	5
II.2. Le graphène.....	6
II.3. Nanotube de carbone.....	7
II.3.1. Structure électronique des NTCs.....	11
II.3.2. Structure de bande de nanotube de carbone.....	13
II.3.3. Densité d'états dans les nanotubes de carbone.....	15
II.3.4. Propriétés des Nanotubes de Carbone.....	16
II.3.5. Les Applications de nanotube de carbone.....	18

Chapitre II : Les transistors FET à base de nanotube de carbone : CNFET

I. procédés de fabrications des CNFETs.....	21
I.1. Évaporation par arcs électriques.....	21
I.2. Ablation laser.....	22
I.3. Dépôt chimique en phase vapeur.....	22
II. Transistor à nanotube de carbone.....	23
II.1. Généralité sur le transistor MOSFET.....	23
II.2. Transistor à nanotube de carbone.....	25
II.2.1. Effet de l'oxygène sur le CNFET.....	26
II.2.2. Dopage.....	27
II.2.3. Métal des contacts.....	28

II.2.4. Orientation des nanotubes	28
III. Différents type des CNFETs	29
III.1. Le transistor à modulation de hauteur de barrière (C-CNTFETs).....	30
III.2. Transistor à effet de champ double (DG-CNTFET)	31
III.3. Transistor à barrière schottky (SB-CNTFET).....	31
III.4. Transistor a grille commandée optiquement (OG-CNTFET)	32

Chapitre 3 : modélisation et simulation du transistor à nanotube de carbone à modulation de hauteur de barrière

PARTIE I : MODELISATION DU CNFET CONVENTIONNEL.....	35
I. PARAMETRES PHYSIQUES DU CNTFET	35
I.1. Capacité de grille	35
I.2. Énergie de la bande interdite (E_g)	35
I.3. Mobilité.....	35
I.4. Transport balistique	36
II. MODELISATION DU C-CNTFET BALISTIQUE	36
PARTIE II : SIMULATION DE C-CNTFET.....	41
I.1. Simulation de $E(k)$	41
I.2. Simulation de la densité d'état (DOS)	42
I.3. Simulation du courant de drain I-V.....	43
I.4. Simulation de la densité de charge.....	45
I.5. Effet du diamètre de carbone nanotube (CNT).....	46
I.5.1. Effet du diamètre sur la dispersion électronique $E(k)$	46
I.5.2. Effet de diamètre sur les courbes I-V et la tension de seuil.....	47
I.6.1. Effet des sous bande sur les courbes I-V.....	50
I.6.2. Effet des sous bande sur les courbes I-V pour des diamètres différents	51
I.7. Effet de qualité d'oxyde sur les courbes I-V	53

conclusion générale

Bibliographie

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

La recherche des nouveaux matériaux, semiconducteurs et des nouveaux dispositifs pour remplacer le silicium et le MOSFET au silicium va conduire à une nouvelle révolution, au sein des industries électronique.

Depuis la découverte des nanotubes de carbone (CNT) par Ijima en 1991[1], une intense activité de recherche s'est développée autour de ces nanotubes caractérisés par de multiples propriétés physiques et électriques remarquables. Ils constituent ainsi un élément moteur des nanotechnologies et des nanosciences en général.

En raison de leur faible taille et leurs propriétés électriques variables, les nanotubes de carbone apparaissent comme le matériau idéal pour remplacer les conducteurs et les semiconducteurs contenus dans les circuits intégrés actuels. Pour leur utilisation dans les circuits intégrés les nanotubes de carbone ont investis plusieurs domaines tels que transistor à haute fréquence, transistor de puissance, capteurs et microcapteurs,...

Selon leur structure, les nanotubes de carbone ont notamment la possibilité de pouvoir être semiconducteurs ou métalliques.

La première utilisation en configuration transistor remonte 1998 [2] et depuis, des améliorations effectuées ne cessent d'augmenter.

Dans ce sens ce mémoire, traite l'analyse de nanotube de carbone utilisé sous forme de transistor, nous intéressons à leur modélisation et leur simulation.

Ce mémoire se présente de trois. Le premier chapitre rappelle la structure et les différentes propriétés des nanotubes de carbone, ainsi que leurs applications potentielles en microélectronique. Le deuxième chapitre nous avons cité les procédés de fabrications des CNFETs, et leur impact sur les caractéristiques physique et électrique (effet de l'oxygène, des dopants et du type de métal utilisé pour prendre contact sur le nanotube, ainsi que l'orientation des CNTs). Nous avons présenté quelque paramètre important de MOSFET. Enfin, les différents types de transistors à base de nanotubes de carbone sont décrits. Le troisième chapitre traite la modélisation du transistor à nanotube de carbone à modulation de hauteur de barrière ou C-CNFET, l'équation du courant, en fonction du potentiel à travers le canal, est décrite. La deuxième partie présente les résultats de simulation de ce modèle ainsi que l'extraction de certains paramètres tels que la tension de seuil, le courant à l'état-ON et enfin le courant à l'état-OFF.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale et perspective.

Chapitre 1

Généralité sur les Nanotubes de Carbone

INTRODUCTION

Les nanosciences se réfèrent à l'étude des phénomènes observés dans des structures, dont la taille est de quelques nanomètres (un nanomètre est égal à 10^{-9} mètre) et dont les propriétés physiques, chimiques, découlent spécifiquement de cette taille nanométrique. Les nanotechnologies se réfèrent à la conception, la caractérisation, la production et l'application de structures, dispositifs et systèmes par le contrôle de la forme et de la taille à une échelle nanométrique.

Ceci a permis aux chercheurs à découvrir les nanotubes de carbone en 1991[1].

Ce chapitre s'attache à décrire les différentes structures des CNTs, les formes carbonées dont ils sont issus. Nous présenterons également les différentes propriétés, nous décrirons aussi les applications potentielles des CNTs en microélectronique.

I.FORME ALLOTROPIQUE DU CARBONE

I.1. Le carbone

C'est un élément chimique de symbole C, de la famille des cristallogènes, de numéro atomique 6, de masse volumique 2.2 g.cm^{-3} et de masse molaire de $12.0107 \text{ g.mol}^{-1}$. Le carbone comporte quatre électrons sur sa couche externe ($2s^2 2p^2$). Il peut former de multiples liaisons carbone-carbone par hybridation de ses orbitales : sp , sp^2 (graphite) ou sp^3 (diamant)[3].

I.2. Graphite

Le graphite est une forme cristalline du carbone, c'est la forme la plus stable du carbone pur à pression atmosphérique et à température ambiante, il possède une structure lamellaire, dont chacun des plans, espacés de 0,334nm, est constitué d'un réseau hexagonal (en nid d'abeille) d'atomes de carbone. Voir Fig. I.1 [3].

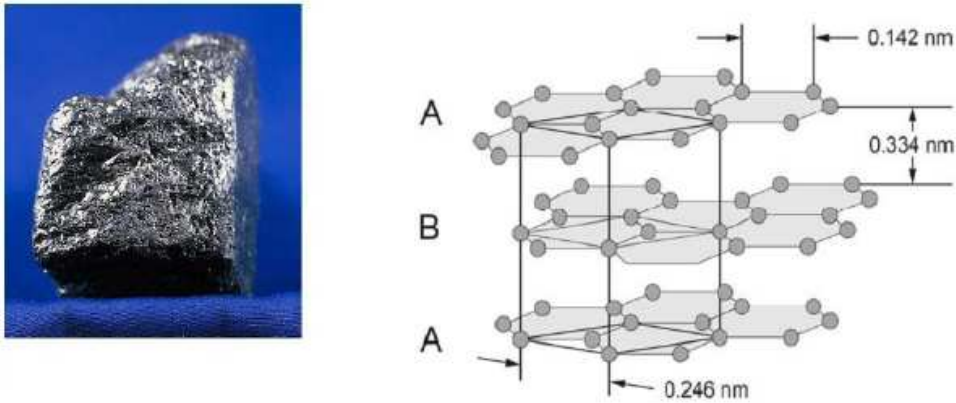


Figure I.1 : structure hexagonale de graphite.

I.3. Diamant

Le diamant est une forme cristalline métastable à la température ordinaire. Il est la forme la plus compacte du carbone. Voir Fig. I.2. Son domaine de stabilité correspond aux fortes pressions. Il possède une structure cubique à faces centrées avec un paramètre de maille de $a_0 = 0,357 \text{ nm}$, et une distance interatomique de $a_{c-c} = 0,154$ [3].

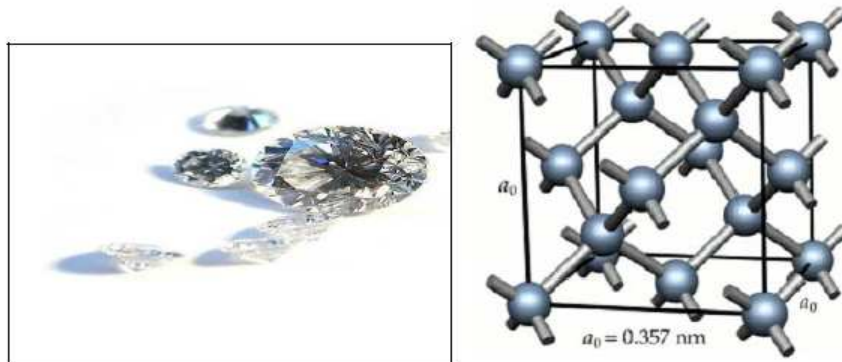


Figure I.2 : structure du diamant.

II. LES NOUVELLES FORMES DE CARBONE

II.1. Fullerène

Les fullerènes représentent une nouvelle famille de molécules constituées par des atomes de carbone. C'est la troisième forme du carbone, après le graphite et le diamant. Les

fullerènes se révèlent être d'excellents conducteurs à basse température. Leur synthèse est essentiellement fondée sur la sublimation (passage de l'état solide à l'état gazeux) de carbone pur provoquée par la chaleur d'un arc électrique, d'un faisceau laser ou du soleil (four solaire) [3].

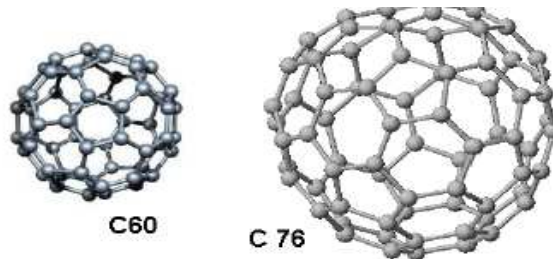


Figure I.3: le fullerène C60 possède 60 atomes de carbone et le C76 possède 16 atomes de carbone.

II.2. Le graphène

Un plan de graphène consiste un réseau bidimensionnel d'atomes de carbone qui forme une structure de type nid d'abeilles.

Le graphène est classé semi-métal mais, lorsqu' il est constitué seulement de quelque couche atomique et si sa dimension latérale est nanométrique ce matériau se comporte comme un semiconducteur.

Sa structure plane le rend compatible avec les technologies microélectronique existantes. Fig. I.4

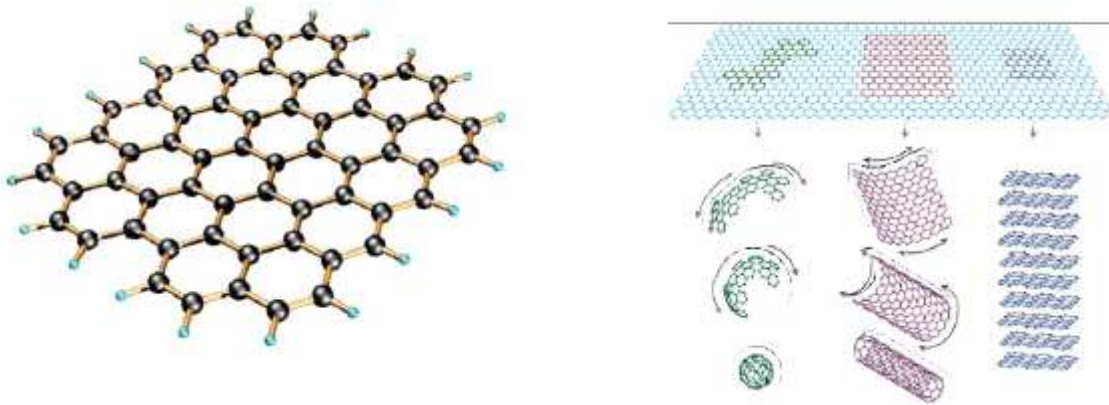


Figure I.4 : structure de graphène.

II.3. Nanotube de carbone

Les nanotubes de carbone forment un exemple de nanostructures à une dimension. Ce sont actuellement les composants qui font l'objet de la recherche la plus intense. Ils ont été découverts en 1991 par Sumio Iijima [1] dans une expérience dont le but était d'étudier les filaments de carbone. En effet les CNTs peuvent être considérés comme étant un enroulement d'une seule ou plusieurs feuilles de graphène avec des diamètres allant de 1 à 100nm et des longueurs pouvant atteindre plusieurs millimètres [4].

A partir de la structure 2D (bidimensionnel) du feuillet de graphène, on obtient un nanotube de carbone avec une structure cylindrique unidimensionnelle (1D). voir Fig. I.5 [3]

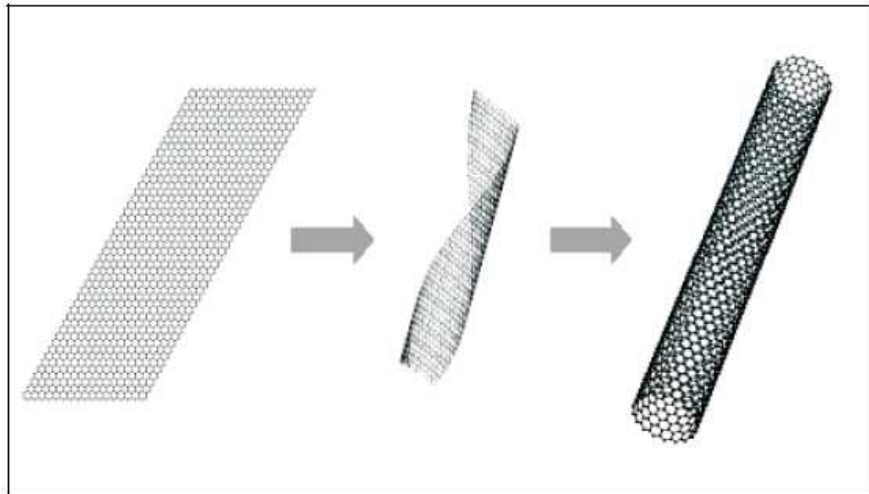


Figure I.5 : structures de nanotube de carbone.

Il existe plusieurs types de nanotubes de carbone :

- **Les nanotubes multifeuillets (MWCNT Multi-walled Carbon Nanotubes) :**
Sont constitués d'un arrangement concentrique de feuilles de graphène repliées sur elles-mêmes de manière à former un empilement de cylindres.
- **Les nanotubes monofeuillets (SWCNT Single-walled Carbon Nanotubes) :**
Sont obtenus par repliement d'une seule feuille de graphène sur elle-même de manière à former un cylindre unique.
- **Les nanotubes double-feuillets (DWNT Double-Walled Carbon Nanotubes) :**
Sont obtenus par repliement de deux feuilles de graphène sur elle-même de manière à former deux cylindre.

➤ **La chiralité**

La structure de nanotube est déterminée par le couple de nombre entiers (n, m) définissant un vecteur caractéristique de l'enroulement appelé vecteur de chiralité \vec{ch} [5].

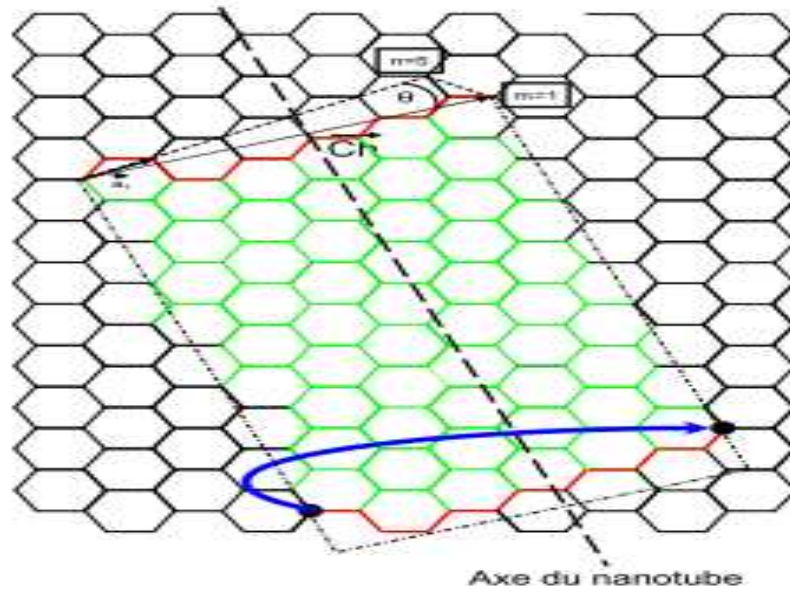


Figure I.6 : Schématisation du vecteur chiral \vec{ch} du nanotube.

Ce vecteur est une combinaison linéaire des vecteurs de base $\vec{a1}$ et $\vec{a2}$ du feuillet de graphène, et définit entièrement la structure du nanotube (en particulier son diamètre) tel que :

$$\vec{ch} = n\vec{a1} + m\vec{a2} \quad \text{I. 1}$$

Les vecteurs $\vec{a1}$ et $\vec{a2}$ sont les vecteurs de base dits unitaires du maillage hexagonal.

Sachant que la distance a_{C-C} entre 2 atomes de carbone voisin est $a_{C-C} \approx 0,142 \text{ nm}$, on a

$|\vec{a1}| = |\vec{a2}| = 0,246 \text{ nm}$. Ainsi, le diamètre du nanotube, en nm, s'écrit :

$$d_{CNT} = 0,246 * \sqrt{n^2 + n.m + m^2} / \pi \quad \text{I. 2}$$

Ainsi en connaissant l'amplitude de $\vec{a1}$ et $\vec{a2}$, on peut déduire la circonférence du tube puis son diamètre [5]. On peut aussi connaître l'angle d'hélicité θ caractérisant l'enroulement de la feuille de graphène. Cet angle est formé par le vecteur \vec{ch} et le vecteur de base $\vec{a1}$ et il est exprimé par :

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

Le vecteur de translation \vec{T} est donnée par :

$$\vec{T} = \frac{(2m+n)\vec{a}_1 - (2n+m)\vec{a}_2}{PGCD(2m+n, 2n+m)} \quad \text{I.4}$$

Où PGCD $(2m + n, 2n + m)$ est le plus grand commun diviseur de $2m + n$ et $2n + m$.

La longueur de cellule unité est donnée par le module du vecteur de translation, par :

$$T = \|\vec{T}\| = \frac{a\sqrt{3(n^2+m^2+nm)}}{PGCD(2m+n, 2n+m)} \quad \text{I.5}$$

Le nombre d'hexagones N est le rapport entre l'aire de la cellule unité et l'aire d'un hexagone, par :

$$N = \frac{TCh}{\text{aire d'un hexagone}} = \frac{2(n^2+m^2+nm)}{PGCD(2m+n, 2n+m)} \quad \text{I.6}$$

Le nombre d'atome de carbone par cellule est $2N$.

Selon leurs paramètres géométriques, les nanotubes de carbone peuvent être classés en trois familles, voire Fig. I.7.

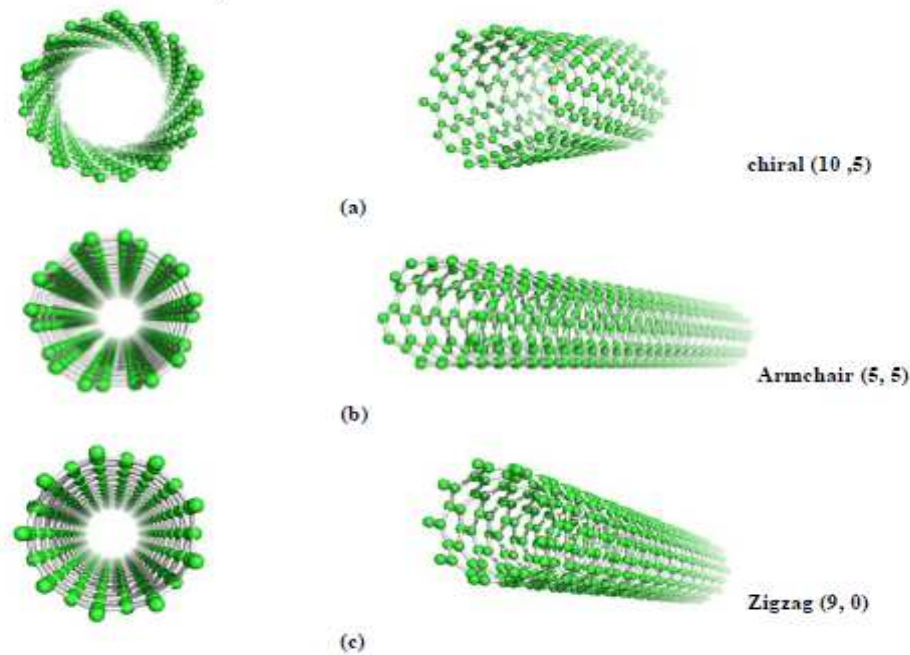


Figure 1.7 : Exemple de nanotube de différentes structures : (a) Nanotube chiral (10, 5), (b) nanotube Armchair (5, 5) et (c) un nanotube zigzag (9, 0) [5].

- a) $0^\circ < \theta < 30^\circ$, chiral.
- b) $\theta = 30^\circ$, Armchair (chaise) si $m=n$
- c) $\theta = 0^\circ$, zig zag si $m=0$.

II.3.1. Structure électronique des CNTs

Pour obtenir la structure électronique des nanotubes de carbone, il nous faut dans un premier temps connaître celle du graphène [5].

La condition que le graphène s'enroule sur lui-même pour former le nanotube de carbone est que les atomes qui se superposent à la jointure du tube soient équivalents dans le réseau de Bravais de telle sorte à ne pas détruire la périodicité du réseau.

La maille du réseau de Bravais, représentée dans la figure 8(a) est définie par les deux vecteurs de base \vec{a}_1 et \vec{a}_2 et contient deux atomes de carbone. La figure 8(b) décrit le réseau réciproque défini par les vecteurs \vec{b}_1 et \vec{b}_2 ainsi que sa première zone de Brillouin. En notant $a_{C-C} \approx 0,142$ nm la distance entre deux atomes de carbone, puis $a = a_{C-C}\sqrt{3} = 0,246$ nm, les vecteurs du réseau de Bravais et du réseau réciproque sont :

$$\vec{a}_1 = \left(\frac{a}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2} a \right), \vec{a}_2 = \left(-\frac{a}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2} a \right) \quad \text{I.7}$$

$$\vec{b}_1 = \left(\frac{2\pi}{2}, \frac{2\pi}{\sqrt{3}a} \right), \vec{b}_2 = \left(\frac{2\pi}{2}, \frac{2\pi}{\sqrt{3}a} \right) \quad \text{I.8}$$

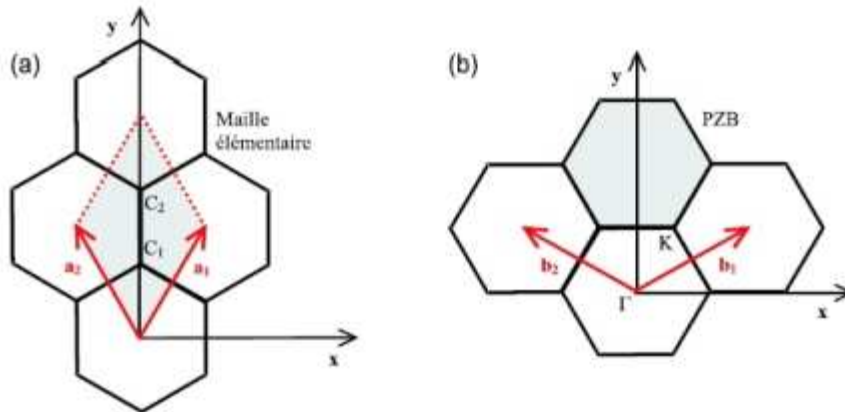


Figure I.8 : (a) Réseau direct d'un feuillet de graphène \vec{a}_1 et \vec{a}_2 sont deux vecteurs de base du réseau. La partie grisée hexagonale représente une maille élémentaire, elle contient deux atomes de carbone C1 et C2. (b) Réseau réciproque associé, \vec{b}_1 et \vec{b}_2 sont deux vecteurs de base. La partie grisée hexagonale représente une première zone de Brillouin (PZB). On définit les points de haute symétrie Γ et K [3].

Les atomes de carbone dans le graphène sont constitués de trois orbitales hybridées sp^2 dans le plan. Comme il y a deux atomes par maille, ces orbitales vont donner naissance à six bandes d'énergie. Trois seulement sont totalement remplies et les trois autres sont trop éloignées du niveau de Fermi et ne participent donc pas aux propriétés de conduction. Pour le calcul de la structure de bandes, on ne considère que les électrons provenant des orbitales p_z en se basant sur le modèle des liaisons fortes, la relation de dispersion s'écrit [7] :

$$E(\vec{k}) = \pm \gamma_0 \sqrt{1 + 4 \cos\left(\frac{\sqrt{3}k_x a}{2}\right) + \cos\left(\frac{k_y a}{2}\right) + \cos^2\left(\frac{k_y a}{2}\right)} \quad \text{I.9}$$

Où γ_0 est l'énergie de recouvrement des orbitales qui vaut environ 2,9eV.

La **figure I.9** représente les surfaces de dispersion, la surface d'énergie négative est appelée bande π totalement remplie du fait qu'il y a 2 électrons par cellule unité. La surface positive

est appelée bande π^* . La densité d'états au niveau de fermi du graphène est nulle, ce qu'il lui confère un comportement semi conducteur avec un gap nul, appelée aussi semi métal[8].

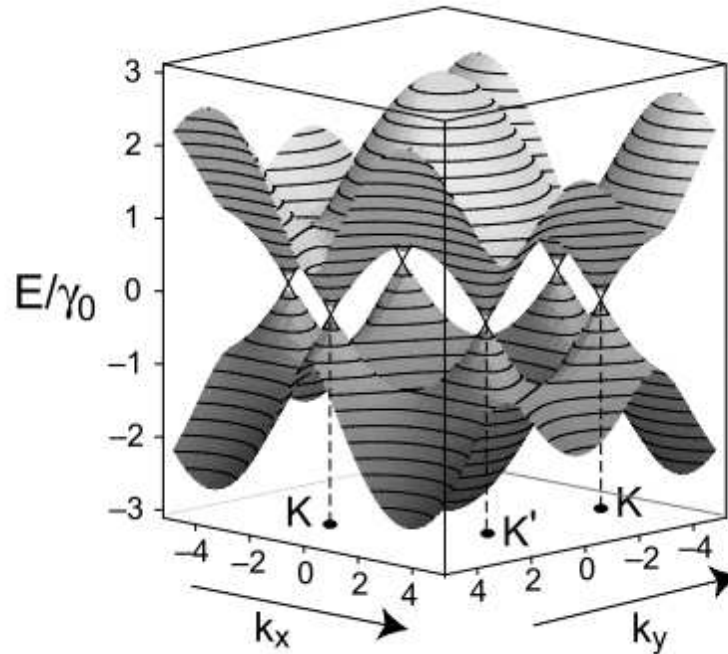


Figure 1.9 : Structure de bandes du graphène.

Si on replie la feuille de graphène, la structure de bande passera à une dimension, ce qui nous laisse la possibilité d'avoir des nanotubes de carbone métallique et d'autres semiconducteurs, caractéristiques que nous allons développer ci-dessous.

II.3.2. Structure de bande de nanotube de carbone

Comme les propriétés géométriques et les propriétés électroniques des CNTs peuvent être déduites de celles du graphène avec une très bonne approximation, en se basant sur le modèle de liaisons fortes et en supposant que la courbure du graphène influe peu sur la structure électronique. Dans cette approximation, les états propres du nanotube sont simplement ceux de la bande de graphène correspondante avec des conditions aux limites périodiques d'un bord à l'autre. En référence aux états de Bloch du plan de graphène infini, on a donc une quantification de la composante du vecteur d'onde suivant la direction orthogonal à la bande donnée par :

$$k_{\perp} = p \frac{2\pi}{|\epsilon\hbar|} \quad \text{I. 10}$$

Où p est un entier tel que $0 \leq p \leq N-1$.

Et N est le nombre d'hexagone par cellule unité.

On fait varier la composante parallèle du vecteur d'onde dans la première zone de Brillouin du nanotube comme :

$$-\frac{\pi}{T} \leq k_{||} \leq \frac{\pi}{T} \quad \text{I. 11}$$

Donc le nanotube est métallique si et seulement si les points k de PZB du graphène satisfont la condition donnée par l'Eq .I.10.

On a supposé que le niveau de fermi est situé au point de neutralité de charge ($E=0$). Or la position d' E_F peut fortement changer par un dopage chimique ou par influence électrostatique (potentiel de grille). Kruger et al, ont obtenu des variations de E_F de l'ordre de $\pm 1\text{eV}$. Ce qui laisserait une possibilité pour un nanotube semiconducteur de devenir métallique si E_F sort de la bande interdite.

L'énergie de gap des nanotubes de carbone semiconducteurs est inversement proportionnelle au diamètre et elle est donnée par [9] :

$$E_{gap} = \frac{2\gamma_0 a_c - \epsilon}{d_t} \quad \text{I. 12}$$

Il ya certaines condition exprimées en fonction de (n, m) pour un nanotube métallique ou semi-conducteur voir Fig. I.10.

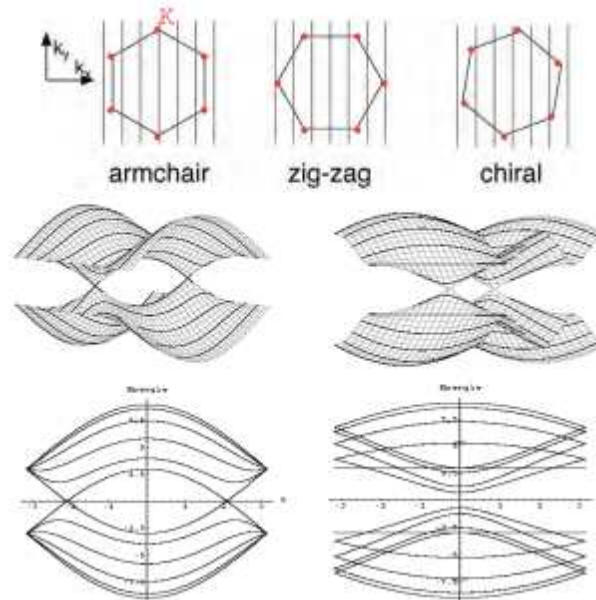


Figure I.10 : Structure de bandes des nanotubes de carbone déduite de celle du graphène.

En haut : superposition des premières zones de Brillouin du graphène et d'un nanotube pour trois hélicité différentes. Du fait de la discrétisation du vecteur d'onde dans les

nanotubes, leur réseau réciproque se réduit à des droites parallèles orientées différemment par rapport à celui du graphène selon l'hélicité. Ainsi, certains nanotubes auront un vecteur d'onde accessible passant par K (c'est le cas pour tous les Armchair) et d'autres non.

En bas : diagrammes de bandes de deux nanotubes différents, tracés en trois dimensions (l'énergie étant reportée sur l'axe z). Les diagrammes de gauche correspondent à un nanotube métallique : les bandes de valence et de conduction se croisent en deux points au niveau de Fermi. Le nanotube de droite est semiconducteur, les bandes de valence et de conduction sont disjointes.

Par conséquent, les nanotubes d'Armchair (n, n) sont toujours métalliques. Et les nanotubes de zigzag (n, 0) sont métalliques lorsque n est un multiple de 3, si non c'est un semiconducteur [3].

II.3.3. Densité d'état dans les nanotubes de carbone

Dans les systèmes 1D, la densité d'état aux démarrages des sous-bandes est proportionnelle à $1/\sqrt{E}$. Ainsi, ces divergences apparaissent sous formes de pics, ce sont les singularités de Van Hove. Le tube (5,5) est métallique avec une densité d'état non-nulle autour du niveau de Fermi. En regardant au niveau de Fermi du nanotube (7,1), on peut apercevoir un gap très fin. A 300K, ce tube est considéré comme métallique. Et enfin, Le tube (8,0) est un semiconducteur à "grand gap", car on peut voir que la densité d'état est nulle autour du niveau de Fermi. Voir Fig. I.11.

Les singularités de Van Hove de la densité d'état de nanotube sont observables expérimentalement par microscopie à effet tunnel en mesurant le courant tunnel entre la pointe STM et la surface et en traçant la caractéristique (dI/dV) en fonction de V [3].

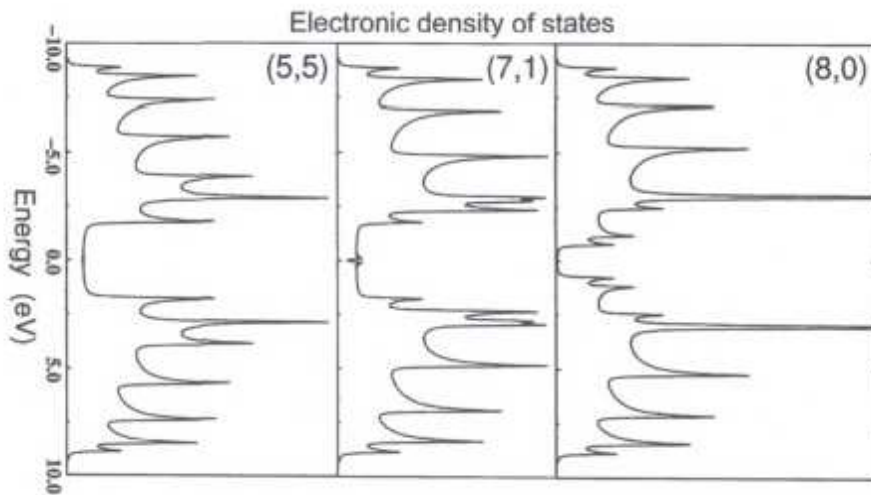


Figure 1.11 : Densités d'états de nanotubes (5,5), (7,1) et (8,0).

II.3.4. Propriétés des Nanotubes de Carbone

Les propriétés uniques des nanotubes de carbone résultent directement de leur filiation structurale avec le graphène, de leur forme tubulaire et de leur diamètre nanométrique.

a. Propriétés physiques

Le diamètre des nanotubes de carbone dépend naturellement du nombre de feuillets de graphène comme indiqué dans le tableau 1.

Nanotube de carbone	Mono parois	Multi parois
Diamètre externe	0,4 à 3 nm	2 à 25 nm
Longueur	100nm à plusieurs μm	1 μm à 1cm

Tableau 1.1 : les caractéristiques dimensionnelles des nanotubes de carbone.

b. Propriétés électriques

Les propriétés électriques des CNT dépendent principalement de leur chiralité, de nombreuses études théoriques ont démontré que ces derniers possèdent une conductivité électrique élevée.

La conductivité électrique d'un CNT métallique peut atteindre 10^5S.cm^{-1} et celle d'un CNT semiconducteur est comprise entre 0,1 et 100S.cm^{-1} .

La mobilité électronique mesurée sur un nanotube est jusqu'à 3 ordres de grandeur plus importantes que celle du cuivre ($100\,000\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) à 300K.

La résistivité électrique des nanotubes de carbone est de :

- 10^{-3} à $10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$ pour les nanotubes monofeuillets métalliques ;
- $10\Omega\cdot\text{cm}$ pour les nanotubes monofeuillets semiconducteur ;
- $10^4\Omega\cdot\text{cm}$ pour les nanotubes multifeuillets ;

Les nanotubes de carbone monofeuillets possèdent de meilleures caractéristiques électriques que les multifeuillets en raison notamment des interactions électriques, de types Van der Waals, qui surviennent entre les différents feuillets de graphène [3].

c. Propriétés mécaniques

La présence de fortes liaisons chimiques C-C dans le graphite rend les propriétés des nanotubes de carbone exceptionnelles. En effet une importante énergie, équivalente à $348\text{KJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ est nécessaire pour dissocier une telle liaison. Grâce à ces liaisons fortes entre les atomes, les nanotubes de carbone présentent un module d'Young équivalent à celui du diamant.

De plus, le nanotube de carbone est 100 à 200 fois plus résistant que l'acier. Ainsi, malgré sa rigidité élevée, le nanotube de carbone a une facilité à se courber jusqu'à des angles très importants, à se déformer et à se tordre selon son axe. La courbure semble entièrement réversible jusqu'à un angle critique.

Les nanotubes exhibent donc des propriétés mécaniques uniques. Leur grande flexibilité associée à un module d'Young élevé leur confèrent un comportement que certains n'hésitent pas à décrire comme étant un comportement super élastique. Ce sont donc vraiment des candidats idéaux pour ce type de fonction électromécaniques [3].

d. Propriétés thermiques

Selon leur nombre de parois et le degré de perfection de leur structure, les nanotubes de carbone peuvent présenter une conductivité thermique très élevée pouvant atteindre $6000\text{W}/\text{mK}$ (par comparaison, la conductivité thermique du diamant varie entre 1000 et $2600\text{W}/\text{mK}$) ce qui les place parmi les meilleurs conducteurs thermiques connus [3].

e. Propriété optique :

Grâce à leur structure électronique les nanotubes possèdent des propriétés optiques remarquables. Les propriétés électro-optiques uniques des films de SWCNT rendent ce matériau particulièrement intéressant pour la conception de dispositifs optoélectroniques [3].

f. Propriété chimique

Les nanotubes de carbone possèdent des propriétés chimiques très attrayantes, il est en effet possible :

- De fonctionnaliser leur surface par greffage moléculaire afin, par exemple, de procéder au tri des nanotubes selon leurs caractéristiques électronique.
- D’intercaler des atomes ou des molécules (dopage) entre les nanotubes mono feuillet d’un faisceau, ainsi qu’entre les différentes parois d’un nanotube multifeuillets afin par exemple de contrôler les propriétés électronique des nanotubes semiconducteurs. [3].

II.3.5. Les Applications de nanotube de carbone

Du fait de leurs propriétés exceptionnelles, les CNTs sont adaptés pour des applications multifonctionnelles couvrant une gamme variée de matériaux pour des usages biologiques ou électroniques. par exemple, s’agissant de la conductivité voir tableau. I.2, les SWCNTs (surtout les métalliques) sont en passe d’être efficacement utilisé comme interconnexion entre les niveaux métalliques dans la fabrication des circuits intégrés. En comparaison avec du cuivre, les nanotubes permettent une meilleure conductivité électrique et thermique. Par ailleurs, les nanotubes réagissent avec beaucoup de produits chimiques [3].

Propriétés	Type de CNT	Réalisation
conductivité	M_SWNT	Interconnexions entre les niveaux métalliques dans les circuits intégrés
conductivité	M_SWNT	Détecteurs chimique et biochimique
conductivité	SWNT, MWNT	Détecteurs du gaz NH3

Tableau I.2 : des applications électroniques réalisées avec des CNTs dans divers domaine.

⇒ **Transistor à effet de champ**

Les nanotubes semi-conducteurs mono paroi peuvent servir de transistors, le nanotube est le candidat le plus prometteur en raison de leurs propriétés uniques et la taille nanométrique.

Les transistors sont les blocs de construction de base de tous les circuits intégrés. Un transistor possède trois bornes, l'une d'entre elles grille commandant la circulation du courant entre les deux autres source et drain séparées par un canal en matériau semiconducteur [3].

Dans les dispositifs classiques le canal est réalisé en silicium et dans les CNFETs le canal est formé par un seul semiconducteur CNT, Fig. I.12. Ce dernier est détaillé dans le deuxième chapitre.

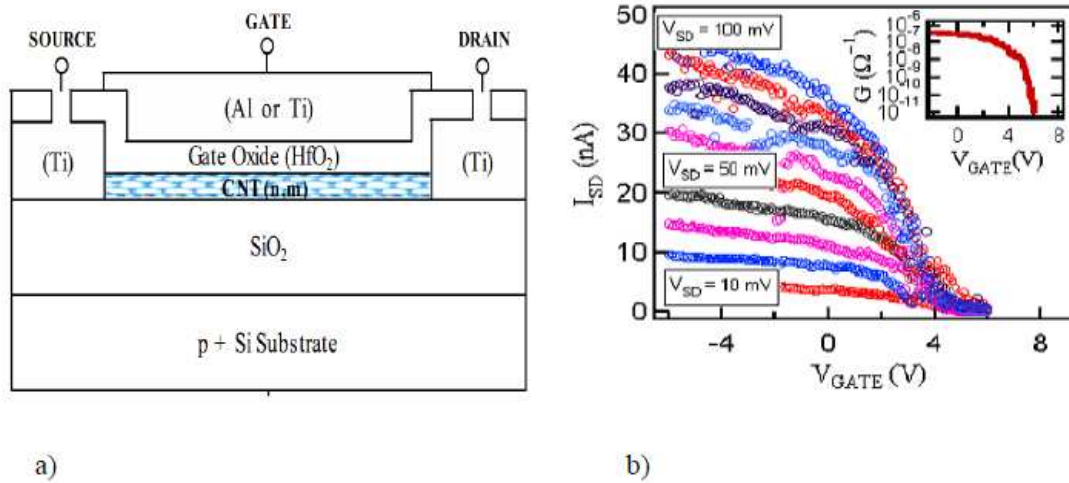


Figure I.12 : a) Vue en coupe transversale d'un CNFET ,b) caractéristique électrique d'un CNFET.

⇒ Source d'émission par effet de champ

Les dispositifs hyperfréquences à vide pour les systèmes de télécommunication installés dans les satellites et les engins spatiaux qui fonctionnent à des bandes de fréquences supérieures à celles actuellement disponibles requièrent des densités élevées de courant transportées par des électrons comprise entre 5 et 20 A /cm². Les cathodes à émission de champ fabriquées à partir de nanomatériaux dont la structure est riche en carbone présentent une alternative intéressante au remplacement à faible coût des cathodes thermoélectroniques [3].

CONCLUSION

Ce chapitre, constitue une revue bibliographique sur les nanotubes de carbone avec leur propriété physique, électrique, chimique,... remarquable qui présentent des spécificités pour différentes applications envisageables.

Chapitre 2

Les Transistors FET à Base de Nanotube de Carbone CNFET

INTRODUCTION

La croissance de l'industrie des semiconducteurs est conditionnée par la possibilité de miniaturiser les transistors. La réduction des dimensions de ces derniers permet de fabriquer des circuits intégrés plus petits.

A partir de leur découverte, grâce à leurs dimensions nanométriques et leurs caractéristiques électrique de type semi-conducteur, en particulier, ces objets représentent un intérêt potentiel pour l'industrie microélectronique, des nombreuses équipes scientifiques sont intéressées à la réalisation des dispositifs de types transistors à effet de champ en utilisant les nanotubes de carbone, qui continue sa course à la miniaturisation conformément aux exigences de l'ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) et la loi de Moore [10].

I. PROCEDE DE FABRICATION DES CNFETs

Les nanotubes de carbone peuvent être synthétisés par divers méthodes avant d'être intégrés dans des configurations de transistors MOS pour former les CNFETs. Parmi les méthodes de synthèse de nanotube de carbone les plus utilisées, on peut citer : l'évaporation par arcs électriques (en anglais : arc-discharge), l'ablation laser (en anglais : laser-ablation) et le dépôt chimique en phase vapeur (en anglais : Chemical Vapor Diposition CVD) [5].

I.1. Évaporation par arcs électriques

La production de nanotube de carbone par évaporation par arc électrique (arc discharge evaporation) consiste à créer un plasma via un arc électrique entre 2 électrodes en graphite. C'est la méthode historiquement utilisé par Sumio Ijima.

L'anode est généralement enrichie en catalyseur (Fe, Ni, Co, Y, Gd) afin d'obtenir des nanotubes monoparois (l'absence de catalyseur induit la synthèse du nanotube multiparois sous forme de fagots). Cette électrode se consume alors que la cathode se recouvre de composés carbonés parmi lesquels on retrouve du carbone amorphe, des particules de carbone et des nanotubes (30 à 70 %). Une étape de purification, de sélection de ces résultats de combustion est donc nécessaire pour extraire les nanotubes.

Cette méthode est économique, relativement simple à mettre en œuvre et permet d'obtenir différents types de tubes mais la complexité des processus de synthèse rend délicat l'obtention d'un type unique de nanotube [11].

I.2. Ablation laser

Ce procédé consiste à ablater avec un laser pulsé ou continu une cible en graphite généralement enrichi de catalyseurs métalliques pour obtenir des nanotubes monoparois. Dans le cas du laser pulsé, le graphite est expulsé en petits fragments qui ne se recombinaient qu'en présence d'une température d'au moins 800 °C (laser et cible placés dans un four).

Pour le laser continu, la température du plasma (3000 K) généré par l'impact du laser sur la cible est suffisamment élevée pour vaporiser le graphite (pas besoin de four). Comme pour la méthode par évaporation par arcs électriques, une étape de sélection chimique est nécessaire pour séparer les différents produits de synthèse.

Cette méthode est plus coûteuse que celle par arcs électriques mais utilise un nombre restreint de paramètres de contrôle ce qui rend possible l'étude des conditions de synthèse [11].

I.3. Dépôt chimique en phase vapeur

La fabrication de nanotubes de carbone par dépôt chimique en phase vapeur (CVD pour Chemical Vapor Deposition) peut se faire avec ou sans catalyseur et, dans le cas de la CVD avec catalyseur, peut être assisté par plasma (PECVD). Le principe est de faire circuler et décomposer un gaz carboné dans une enceinte chauffée. Les atomes de carbone se recombinaient pour former des nanotubes à la surface du wafer.

La méthode CVD avec catalyseur nécessite des températures nettement (de 450 à 1100°C selon le gaz utilisé), ce qui lui offre la possibilité d'être compatible avec les procédés de fabrication standards de la technologie silicium. Les larges gammes de gaz et de catalyseurs utilisables pour obtenir des nanotubes permettent d'obtenir des concentrations, des types (mono ou multiparois) et des dimensions (diamètre, longueur) variables. La géométrie des catalyseurs, le flux des gaz et la vitesse de variation de température influent également sur la géométrie et l'orientation des tubes. Cette méthode est moins coûteuse et permet une production en grande quantité mais les tubes produits ont plus de défauts : les propriétés électroniques s'en trouvent détériorées.

Cette méthode peut être assistée par plasma (plus coûteux), ce qui permet d'orienter tous les tubes produits dans le sens du champ électrique appliqué. Les nanotubes verticaux obtenus par cette méthode permettent notamment de réaliser des dispositifs à émission de champ.

Par ce procédé, on peut espérer que seront maîtrisés le diamètre (par la taille des îlots de catalyseur), la position (par la localisation des catalyseurs) et l'orientation (par l'assistance par plasma) des nanotubes : il ne reste plus que la chiralité à contrôler pour garantir notamment l'obtention de nanotubes semiconducteurs [11].

II. TRANSISTOR A NANOTUBE DE CARBONE

II.1. Généralité sur le transistor MOSFET

Les transistors classiques de la microélectronique sont les transistors métal-oxyde-semiconducteur à effet de champ MOSFET (Metal Oxide Semiconductors Field Effect Transistor) sur silicium. Le principe de fonctionnement repose sur la modulation par effet électrostatique la densité de charges mobiles dans un semiconducteur. Cette modulation est la conséquence de l'application d'un champ électrique entre deux électrodes séparées par un diélectrique. Dans cette structure, la tension de grille (V_{GS}) contrôle la quantité de charges et la tension drain-source les met en mouvement voir Fig. II.1, le transistor est à l'état passant ou "ON" [12].

Le transistor est donc en quelque sorte un interrupteur, dont les utilisations principales sont l'amplification du courant, la modulation de signaux, la stabilisation de tensions ou encore la réalisation de fonctions logiques.

Maintenant nous présentons les paramètres importants de MOSFET :

- **La pente sous le seuil S** : elle définit la pente d'évolution du courant en régime sous le seuil. Elle correspond à la tension V_{GS} à appliquer pour augmenter I_D d'une décade elle est définie par :

$$S = \frac{dV_{GS}}{d(\log I_D)} \quad \text{II.1}$$

La pente sous le seuil S est égale à la valeur limite théorique bien connue de 60mV/décade. Le but est d'atteindre cette limite afin d'augmenter la rapidité de commutation entre l'état bloqué et l'état passant du transistor sur une faible plage de

tension, ce qui peut s'avérer particulièrement intéressant et nécessaire pour des circuits basse consommation [12].

- **La tension de seuil V_{Th}** : c'est la tension de grille minimale appliquée nécessaire pour la formation de la première couche du canal de conduction entre le drain et la source.
- **Le courant I_{ON}** : il est défini comme le courant débité par le transistor lorsque $V_{GS} = V_{DS} = V_{DD}$ où V_{DD} correspond à la tension d'alimentation. Il doit être le plus élevé possible.
- **Le courant de drain I_{OFF}** : il est défini comme le courant à l'état bloqué du transistor lorsque $V_{DS} = V_{DD}$ et $V_{GS} = 0$. Il doit être le plus faible.
- **La transconductance g_m** : c'est la réponse en courant du transistor à l'augmentation de la charge du canal induite par V_{GS} . Elle est définie par :

$$g_m = \left(\frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right)_{V_{DS}=cte} \quad \text{II.2}$$

Le transistor est d'autant « meilleur » que la transconductance g_m est élevée.

- **La conductance g_d** : c'est la réponse en courant du transistor à la variation de V_{DS} telle que :

$$g_d = \left(\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right)_{V_{GS}=cte} \quad \text{II.3}$$

En réduisant les dimensions de transistor, plusieurs effets indésirables apparaissent compromettant ainsi l'équilibre entre performance et fiabilité. La performance nécessite l'élimination des effets de canaux courts (SCE). Ces derniers résultent du chevauchement des zones de charges d'espaces des régions dopées. Les effets de canaux courts se traduisent tout d'abord par la réduction de la tension de seuil lorsque la longueur de grille décroît.

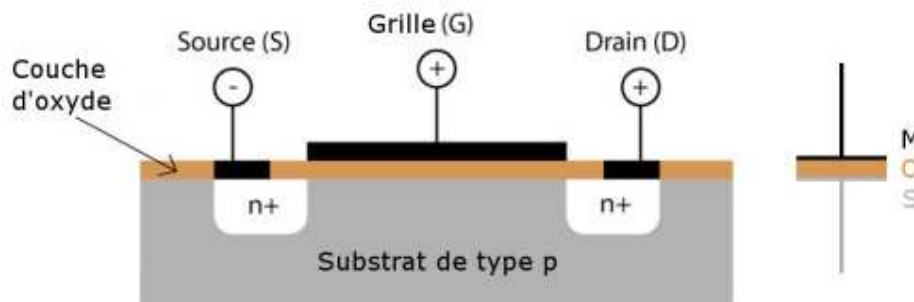


Figure II.1: représentation schématique d'un MOSFET

Ce sont pour ces raisons entre autres que les nanotubes de carbone deviennent des candidats intéressants, utilisés en tant que canaux de conduction [13].

pourquoi choisir le nanotube de carbone ?:

Les propriétés remarquables de nanotubes de carbone sont les suivantes:

- ⇒ Les nanotubes de carbone peuvent être métalliques ou semiconducteurs selon leur diamètre, leur longueur et leur hélicité d'enroulement, et ne nécessitant pas de dopage.
- ⇒ La bande interdite de semiconducteur de nanotube de carbone peut être modifiée en faisant varier son diamètre. (La bande interdite de nanotubes semiconducteurs diminue avec l'augmentation du diamètre).
- ⇒ Les nanotubes de carbone individuels sont capables de transporter le courant électrique à des densités nettement plus élevés que la plupart des métaux et des semiconducteurs.
- ⇒ Les nanotubes ont une conductivité thermique élevés (2000 W /m /K, alors que celle du cuivre est de 400W/m/K).
- ⇒ Les nanotubes sont également inertes et n'ont pas d'états de surface , ce qui les rend tout à fait compatible avec d'autre matériaux tels que les oxydes.
- ⇒ Les dispositifs à nanotube consomment moins d'électricité qu'un appareil équivalent de Si.

Ces propriétés font du nanotube de carbone un meilleur dispositif que les autre dispositifs moléculaires. La recherche de pointe se concentre sur le développement de différents dispositifs à base de nanotubes de carbone et sur l'utilisation de leurs propriétés uniques basées sur la technologie semiconducteur pour la taille minimale possibles [3].

II.2. Transistor à nanotube de carbone

La première utilisation des CNTs dans une configuration MOSFET remonte à 1998[2]. Quand Dekker et al [2] ont réalisé un CNFET, en utilisant un SWCNT pour connecter deux électrodes en métal noble, préfabriquées par lithographie sur un substrat en silicium oxydé. Le SWNT jouit un rôle de canal tandis que les deux électrodes métallique fonctionnent comme drain et source. Un substrat en silicium fortement dopé était utilisé comme grille-arrière (back-gate) comme schématisé dans la figure suivante :

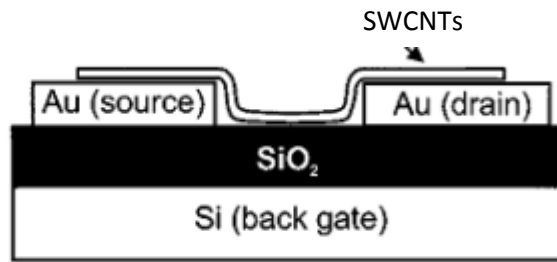


Figure II.2 : transistor à nanotube de carbone en configuration de grille arrière.

Depuis ce premier transistor, les procédés de fabrication ont nettement été améliorés pour mieux aligner les nanotubes de carbone et bien contrôler leur contact avec le métal des accès.

Ainsi, la méthode de synthèse de nanotube par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) à été adoptée pour faire croître directement les nanotubes sur les électrodes source et drain du transistor. Ce procédé de fabrication fait appel à trois étapes de lithographie par faisceau d'électrons focalisé (ou en anglais : EBL pour Electron Beam Lithography) et de photolithographie comme le schématise la Fig. II.3 [12].

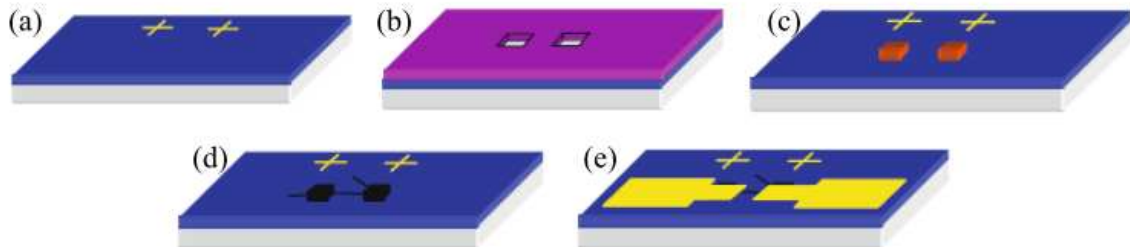


Figure II.3: Procédé de fabrication de CNTFET. (a) Marquage du substrat ; (b) Ouverture pour dépôt du catalyseur dans la photo-résine ;(c) Ajout du catalyseur et élimination de la photo-résine ;(d) Croissance des nanotubes par dépôt chimique en phase vapeur ; (e) Dépôt des électrodes.

II.2.1. Effet de l'oxygène sur le CNFET

L'oxygène, bloqué entre une électrode (source ou drain dans une configuration de transistor à effet de champ) et le nanotube (canal des porteurs de charge) lors de la fabrication ou de l'exposition à l'air, modifie la valeur du travail d'extraction du métal [11].

L'alignement du niveau de Fermi du métal avec celui du nanotube est donc modifié, ce dernier se retrouve proche du haut de la bande de valence, facilitant le passage

des trous : ces transistors sont de type P. Un recuit sous vide permet de dégazer l'oxygène et d'obtenir un transistor de type N. Cette opération est réversible : une réexposition à l'air ou à l'oxygène retransforme le transistor en type P. Pour éviter cette « recontamination », une passivation au SiO_2 et/ou au polyméthacrylate de méthyle, PMMA, est nécessaire voir fig. II.4.

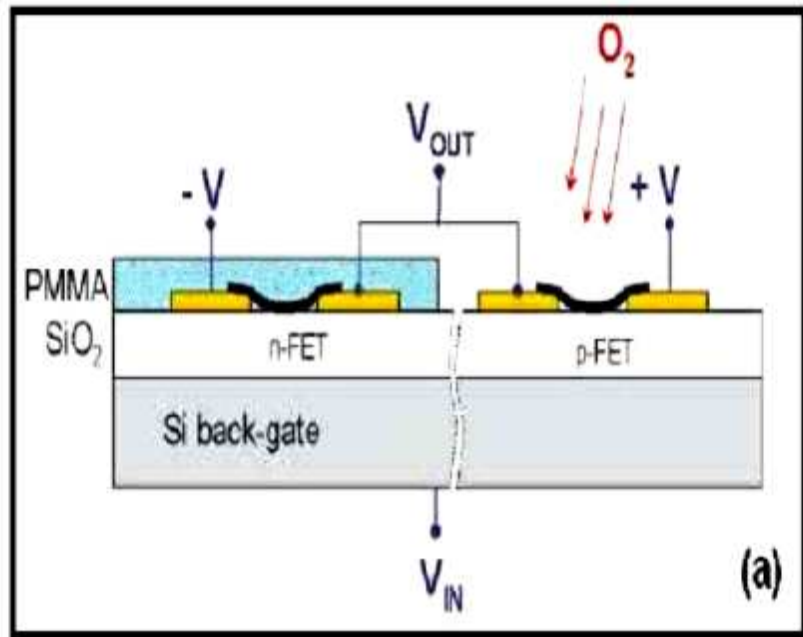


Figure II.4 : dopage d'un CNFET type P pour créer un CNFET type N par le recuit.

II.2.2. Dopage

Pour des nanotubes monoparois, le dopage par substitution des atomes de carbone par des atomes de bore donne un dopage de type P, celui par des atomes d'azote donne un dopage de type N. Il est également possible de doper par substitution avec des atomes de silicium et de phosphore. L'incorporation des dopants dans le tube monoparoi se fait lors de la fabrication des tubes (obtenus par arc électrique, ablation laser ou CVD). La substitution des atomes de carbone par bombardement ionique endommage les nanotubes et modifie leurs propriétés électriques.

Les nanotubes du type P peuvent être sur un composé qui donne des électrons, par exemple des métaux alcalins (tels que le lithium, le sodium, le potassium, le rubidium, le césium, le chlorure de potassium ou l'iodure de césium, respectivement) pour former des nanotubes de carbone de type N, le dopage s'opère par transfert de charge du dopant vers les nanotubes, comme la montre la Fig. II.5 [11].

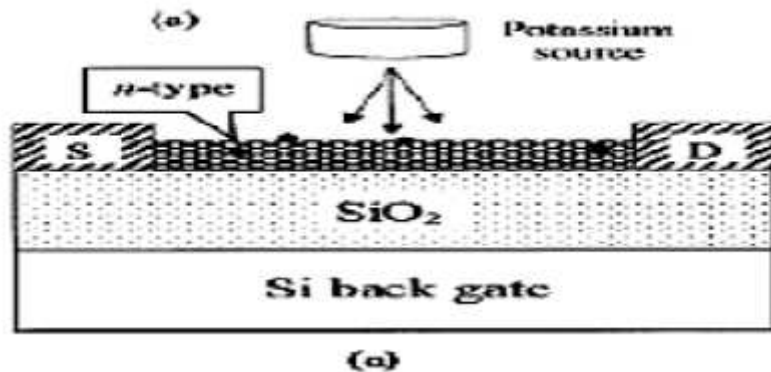


Figure II.5: CNFET type N par le dopage avec le potassium.

II.2.3. Métal des contacts

La présence des barrières Schottky au niveau des jonctions métal de la source/nanotube semiconducteur et métal du drain/nanotube semiconducteur et affecte la transconductance et ainsi les performances du transistor CNFET.

Pour parvenir à surmonter cette limitation intrinsèque et limiter la présence de ces barrières parasites, le choix des paramètres technologiques notamment le choix du type du métal, les propriétés de l'oxyde de la grille (épaisseur, permittivité diélectrique) ou bien le dopage du nanotube à été largement discuté dans la communauté scientifique. Mais malgré les efforts considérables, la présence des barrières Schottky est toujours observée. Ainsi, pour les meilleurs métaux trouvés sont le palladium, le rhodium, le nickel. Il faut noter que la barrière Schottky est quasi-nulle pour les grands diamètres de tube ($>1,6$ nm) alors qu'elle est toujours présente et non-négligeable pour de plus petits diamètres (la bande interdite est plus grande). Le palladium a en plus l'avantage de présenter une bonne mouillabilité avec les nanotubes. Des contacts en aluminium ou en magnésium permettent d'obtenir une hauteur de barrière Schottky faible pour les électrons [11].

II.2.4. Orientation des nanotubes

Bien contrôler l'orientation des nanotubes en les mettant en parallèle revient à améliorer la transconductance dans le canal des transistors CNFET et permet le passage d'un courant plus important en comparaison avec le cas dont ou les nanotubes ont des directions aléatoires [12].

En parallèles, les nanotubes de carbone ne se recouvrent pas et ne perturbent donc pas la conduction du courant de leurs voisins. Trois différentes approches ont été adoptées par les chercheurs pour aboutir à une méthode de croissance de nanotubes auto-alignés entre les contacts de la source et du drain. La première approche consiste à appliquer un champ électrique de l'ordre de $0.5-2V/\mu m$ pendant la procédure de synthèse des nanotubes par CVD. Ce champ électrique a pour effet l'atténuation de l'agitation thermique des nanotubes provoquée par la haute température de synthèse. Ainsi les nanotubes sont alignés selon la direction de ce champ électrique. Le seul inconvénient de cette méthode est le besoin d'avoir des contacts source et drain assez larges et assez éloignés ($\sim 100\mu m$). La deuxième approche se résume, quant à elle, à aligner les nanotubes en contrôlant le flux de gaz pendant la synthèse. En effet, il a été constaté que, pendant leur synthèse, les nanotubes de carbone "survolent" la surface du substrat à cause du déplacement du flux de gaz (mécanisme de Kite). Avec cette approche, la densité des nanotubes de carbones obtenue est faible ($\sim 20\mu m$ entre deux nanotubes voisins) mais elle semble être la plus simple à mettre en œuvre et la plus adaptée aux différents types de substrat.

Finalement, la troisième et la dernière approche tend plutôt à contrôler la disposition cristalline du substrat que la procédure de synthèse des nanotubes. Depuis peu, plusieurs groupes de chercheurs ont pu aligner des nanotubes de carbone sur des substrats en quartz et en saphir ayant une orientation cristalline bien particulière. Cette méthode s'avère très intéressante de point de vue de la densité ainsi obtenue des nanotubes [12].

III. DIFFERENTS TYPES DE CNFET

Les différents types de CNFET qui ont été signalés dans la littérature actuellement, il y en a quatre structures possible pour le CNFET : le transistor à modulation de hauteur de barrière (C-CNFET), à barrière Schottky ((SB) CNFET) , à grille optique (OG-CNFET) et CNTFET à double grille ((DG)-CNFET).

D'une manière général, ces transistors fonctionnent à partir du même principe : il s'agit de faire circuler un courant entre les électrodes de source et de drain à travers le nanotube semi-conducteur (qui joue le rôle de canal) selon la polarisation de l'électrode de grille, isolée du canal par un diélectrique. La différence principal entre les transistors décrits ci-après, réside dans la nature du contact entre la nanotube semi-conducteur et les électrodes métalliques de source et de drain [3].

III.1. LE TRANSISTOR A MODULATION DE HAUTEUR DE BARRIÈRE (C-CNFETs)

De part son mode de fonctionnement et son mode de fabrication, ce transistor est aussi appelé CNFET de type MOS (MOS-like CNFET) ou C-CNFET pour CNFET Conventionnel.

En effet, le contact entre le métal de source ou de drain et le nanotube est supposé ohmique ou avec une hauteur de barrière faible, 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 (les électrons dans le cas de la Fig. II.6).

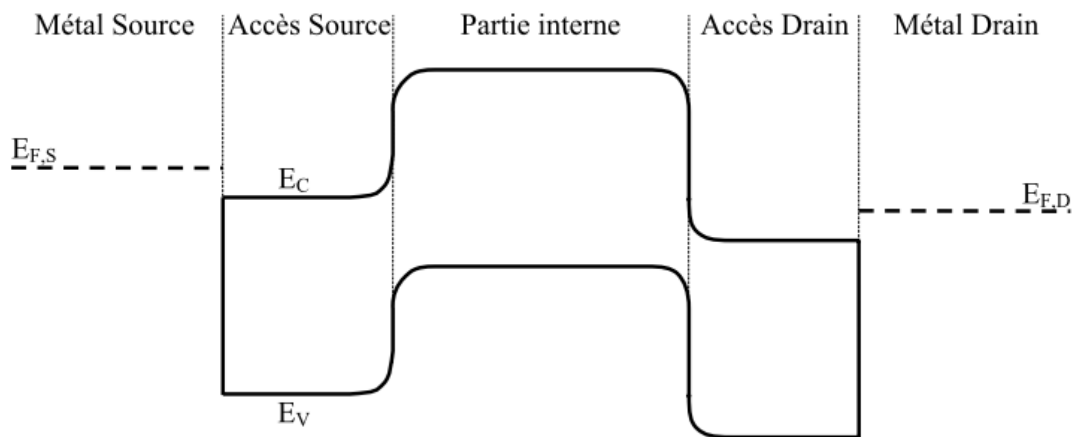


Figure II.6: Représentation schématique des bandes d'énergie du transistor C-CNFET selon l'axe source-drain pour $V_{GS} = 0$ V et $V_{DS} > 0$ V. E_{FS} et E_{FD} sont les niveaux de Fermi des métaux de source et drain respectivement.

De tels transistors peuvent être obtenus par dopage des accès source et drain ou en utilisant un métal approprié.

L'utilisation de palladium ou de rhodium pour des nanotubes de grand diamètre ($> 1,6$ nm) ou d'or permet d'obtenir un contact Schottky avec une hauteur de barrière proche de zéro pour les trous (alignement du niveau de Fermi du métal avec la bande de valence du nanotube). Pour les électrons, le métal qui rapproche le plus niveau de Fermi du métal et bande de conduction est, pour le moment, l'aluminium : la hauteur de barrière obtenue est quasi-nulle [11].

III.2. TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP DOUBLE GRILLE (DG-CNFET)

Les CNFETs double grille (DG-CNFET pour Dual-Gate CNFET ou Double-Gate CNFET) sont particulièrement intéressants pour les concepteurs d'architecteur innovante notamment pour les circuits numériques. Grâce au libre parcours moyen élevé dans le nanotube, il est parfaitement possible de concevoir des circuits logiques avec des CNFETs double grille. Décrit une amélioration de transistor à modulation de hauteur de barrière : au lieu d'avoir un dopant chimique et/ou un choix de métal spécifiques pour obtenir des zones d'accès source et drain de type *N* ou *P*, ces zones d'accès sont dopées électrostatiquement en polarisant une grille supplémentaire (aussi appelée grille arrière ou Back Gate –BG-) comme indiqué sur la figure II.7, la grille avant, située entre le nanotube et la grille arrière, écran l'effet de la grille arrière. L'évolution de la quantité de charge dans le canal du nanotube de carbone selon la modulation des deux grilles. Le principe du fonctionnement du DG-CNFET est d'utiliser la grille arrière comme une pré-polarisation du transistor. Ensuite, la grille avant permet de bloquer ou laisser passer les porteurs désignés. Dans les CNFETs à double grille, le substrat en silicium joue un rôle important (Celui de la grille arrière en déterminant le type de porteur majoritaire ainsi que le courant I_{on} du dispositif [3] :

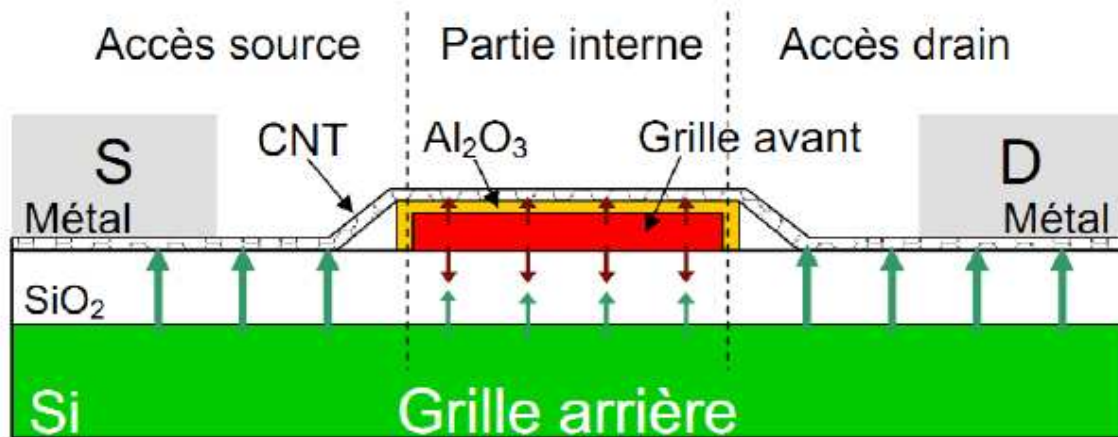


Figure II.7: un DG-CNFET avec l'effet du grille avant et arrière.

III.3. TRANSISTOR A BARRIERE SCHOTTKY (SB-CNFET)

Le CNFET à barrière Schottky (SB-CNFET pour Schottky-Barrier CNFET) est un transistor particulier, il présente une caractéristique fortement ambipolaire par rapport au CNFET conventionnel unipolaire ou faible ambipolaire. Ils peuvent avoir des caractéristiques de type *N* ou de type *P* selon la tension de grille. Ceci limite l'utilisation de ce

type de transistor dans les circuits logiques conventionnels. De plus, le rapport I_{on}/I_{off} est plutôt faible. Ces barrières sont rendues plus ou moins passantes aux porteurs selon la polarisation de grille.

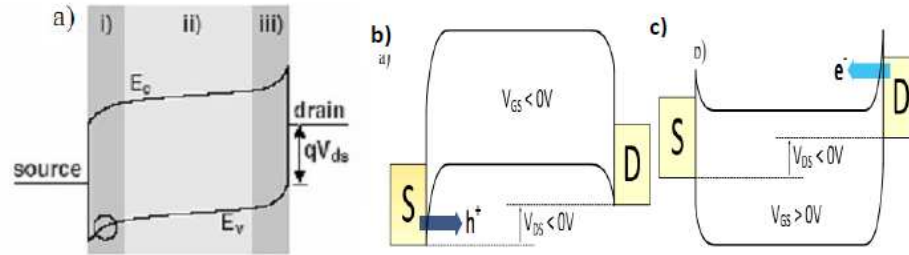


Figure II.8 : Diagramme de bande d'énergie $V_{DS} < 0$ et a) sans polarisation de grille, b) avec polarisation de grille négative et c) positive.

La figure II.8 montre le principe de fonctionnement du SB-CNFET est donc lorsque la grille n'est pas polarisée ($V_{GS} = 0$ V) les électrons ou les trous doivent franchir une barrière de potentiel pour passer, bien que les bandes d'énergie soient courbées par la présence d'une tension de drain V_{DS} non nulle.

Lorsque $V_{GS} < 0$ V, les bandes de conduction et de valence du corps du nanotube (partie ii de la Fig. II.8.a) sont alors suffisamment remontées, les trous peuvent alors passer à travers la barrière Schottky affinée : un courant par effet tunnel apparaît voir fig. II.8.b. De la même manière avec $V_{GS} > 0$ V, le schéma de bandes d'énergie de la partie interne du canal est abaissé et affine les barrières Schottky qui laissent alors passer les électrons par effet tunnel [3].

III.4. TRANSISTOR A GRILLE COMMANDEE OPTIQUEMENT (OG-CNFET)

Un transistor de nanotube à commande optique (OG-CNFET pour Optically-Gated CNFET) est basée sur le CNFET conventionnel de type P avec un oxyde de grille en SiO_2 et une grille arrière. Il est couvert par un film mince de polymère photosensible P_3OT . Sous illumination, le polymère photosensible induit un état modifié de la conductance du canal en nanotube de carbone voir fig. II.9 Le principe de fonctionnement de ce transistor est proche de celui des précédents : faire passer un courant entre les électrodes de source et de drain à travers un nanotube selon la quantité de lumière éclairant le nanotube et y générant des paires électrons-trous. Il est possible de choisir la longueur d'onde à laquelle le dispositif sera

sensible en choisissant le polymère photosensible. Sur ce type de transistors, des caractérisations électriques et optoélectronique ont été proposé pour plusieurs applications en nanoélectroniques et nano photonique [3].

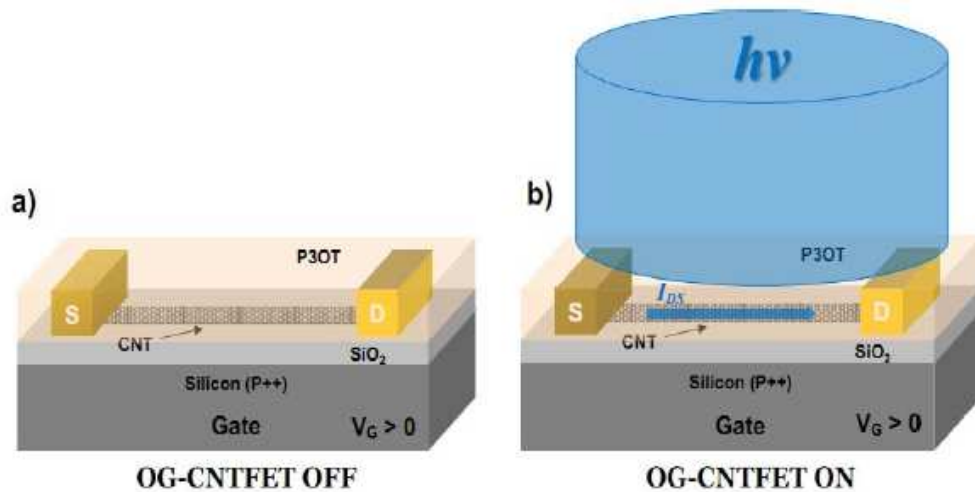


Figure II.9 : Schéma d'un OG-CNFET montrant une polarisation positive de la grille :a) état bloqué :b) état passante.

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons décrit les différents procédés de fabrication de CNFET. Ainsi on a retracé une petite description sur les raisons entre autres que les nanotubes de carbone deviennent des candidats intéressants, utilisés en tant que canaux de conduction à partir de transistor MOSFET.

Nous avons cité quelque type de transistor CNFETs tel que SB_CNFET et C_CNFET avec un résumé sur le principe de fonctionnement de chaque composant.

Pour le troisième chapitre nous allons parler de transport balistique, en particulier on va modéliser le C_CNFET balistique.

Chapitre III

Modélisation et Simulation de Transistor à Effet de Champ à Base de Nanotube de Carbone à Modulation de la Hauteur du Barrière.

INTRODUCTION

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons décrit la modélisation compacte physique et électrique du transistor à nanotube de carbone à modulation de hauteur de barrière appelé aussi CNFET de type MOS (MOS-like CNFET) ou c-CNFET pour CNFET Conventionnel. Afin de pouvoir s'adapter aux diverses technologies de ce transistor, la modélisation faite est basée sur la modélisation physique. Lorsque les dimensions géométriques du dispositif diminuent, l'ensemble des propriétés physiques de système se discrétisent.

Dans la deuxième partie de ce chapitre on décrit la simulation de dispositif c-CNFETs.

PARTIE I : MODELISATION DU CNFET CONVENTIONNEL

I. PARAMETRES PHYSIQUES DU CNFET

Pour un transistor CNFET les paramètres physiques principaux sont ceux du canal du transistor. En fait, ce sont les dimensions du nanotube (diamètre, longueur) et la capacité de la grille qui est déterminée aussi par l'épaisseur d'oxyde [3].

I.1. Capacité de grille

Les nanotubes de carbone étant similaire dans des dispositifs, la valeur de la capacité de grille dépend essentiellement de l'épaisseur de l'oxyde, de la longueur de la grille et de type d'oxyde utilisé.

I.2. Énergie de la bande interdite (E_g)

Pour les CNFETs, il est possible de contrôler le gap énergétique par la variation du diamètre du nanotube. En effet, pour les nanotubes semi-conducteurs, plus le diamètre est faible, plus les niveaux d'énergie autorisés sont éloignés des points K. Ce qui engendre une bande interdite E_g plus large.

I.3. Mobilité

La mobilité est la conductance par la charge élémentaire, elle détermine la vitesse de déplacement des porteurs dans le semiconducteur. Pour atteindre de meilleures performances (essentiellement en termes de vitesse de transport et de communication), un canal court et une grande mobilité sont nécessaires. Les nanotubes de carbone présentent de très faibles diamètres (permettent un excellent contrôle électrostatique du canal) sans subir de dégradation

de la mobilité. Ceci fait des CNFETs des candidats très prometteurs pour contourner les limites des dispositifs conventionnels à l'échelle nanométrique. Les nanotubes de carbone semiconducteur ont une longueur de dizaines de micromètres, des contacts électriques ohmiques pour assurer que la correspondance de résistance mesurée à la résistance du nanotube. Dans ces longs transistors, le transport des porteurs s'effectue par diffusion, ce qui permet de mesurer la mobilité intrinsèque du nanotube semiconducteur. La mobilité intrinsèque à température ambiante a été mesurée à $79000\text{cm}^2/\text{Vs}$. Cette valeur dépasse toutes les valeurs de mobilité des semiconducteurs connues et ouvre une voie prometteuse pour l'utilisation des nanotubes dans les transistors à haute fréquence (grâce à leur fréquence élevées) et dans les capteurs chimiques ou biologiques (ils agissent alors comme des canaux de détection des différentes molécules) [3].

I.4. Transport balistique

Le diamètre du nanotube est de l'ordre de quelques centaines de nanomètres et quelques dizaines de micromètres de longueur. D'après le rapport de ses dimensions, le nanotube est considéré comme un élément unidimensionnel (1D). Ce confinement unidimensionnel n'autorise le déplacement des électrons que dans deux directions opposées. Pour des nanotubes dont la longueur du canal ne dépasse pas 300nm, il y'a pas de dispersion des porteurs : la distance entre deux électrodes étant plus courte que la distance moyenne parcourue par l'électron entre deux collisions, le transport est balistique [3].

II. MODELISATION DU C-CNFET BALISTIQUE

Nous décrivons ici le cas du transistor C-CNFET de type N, i.e. les accès source et drain du nanotube sont dopés N voir Fig. III.1. Les calculs de simulation pour le transistor de type P sont similaires [3].

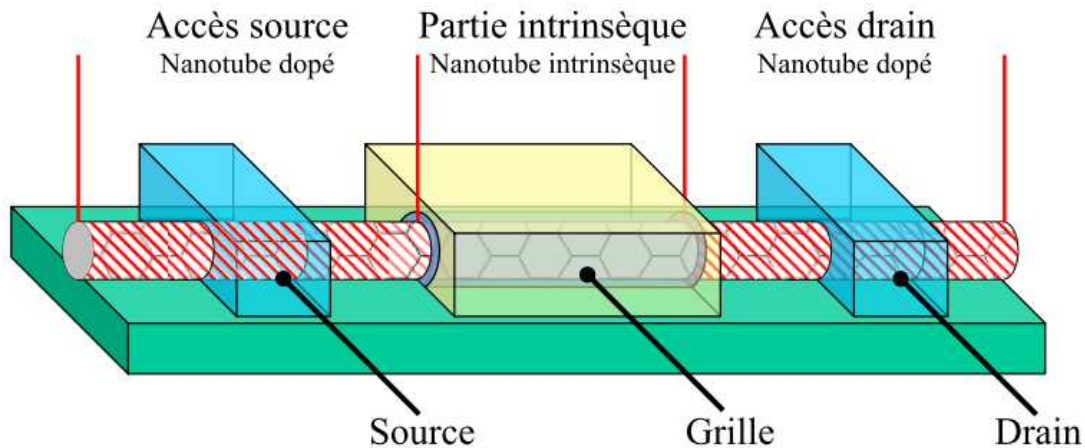


Figure III.1 : Schéma du transistor à nanotube à modulation de hauteur de barrière ou C-CNFET.

Pour assurer le fonctionnement du CNFET en régime balistique (pas de dispersion de porteurs), il faut satisfaire les hypothèses suivantes:

- ⇒ Les dispersions des porteurs sont éliminées dans le nanotube intrinsèque jouant le rôle du canal du transistor. Les porteurs qui traversent le canal du drain à la source ne reviennent donc pas en arrière vers la source (cela signifie que la réflexion des porteurs au drain est négligée).
- ⇒ Le courant du drain devant rester constant le long du canal est calculé au début du canal avec le potentiel V_{CNT} (potentiel de surface de nanotube de carbone). Au début du canal, les électrons venant de la source remplissent des états $+k$ et les électrons venant du drain remplissent des états $-k$ voir Fig. III.2.b.

Ces hypothèses nous permettent de calculer la charge de manière simplifiée, i.e. sans se préoccuper de la réflexion des porteurs aux interfaces, et d'utiliser le formalisme de Landauer dans le calcul du courant. Un modèle simple est illustré dans Fig.III.2.

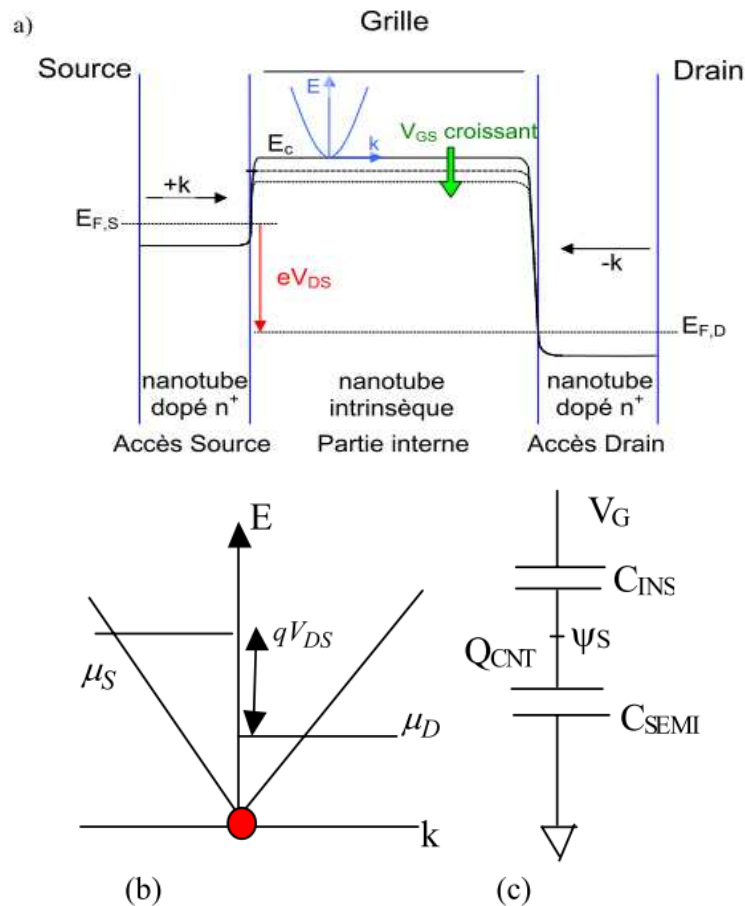


Figure III.2 : a) Représentation schématique simplifiée du bas de la bande de conduction selon l'axe source-drain pour $V_{DS} > 0$ V ; b) Niveau d'énergie des électrons dans la bande de conduction selon le vecteur d'onde dans la partie interne dont le bas de bande est modulé par le potentiel du canal VCNT . Les états $+k$ sont remplis par le niveau de Fermi de la source et les états $-k$ par le niveau de Fermi du drain ; c) schéma capacitif équivalent [14].

La tension de grille V_{GS} induit une charge dans le canal du CNFET. Elle module aussi le haut de la bande d'énergie entre la source et le drain. Une augmentation de V_{GS} implique également une augmentation du nombre d'électrons dans la bande de conduction de la partie interne. Cette charge provoque une différence de potentiel entre V_{GS} et V_{CNT} à travers la capacité d'oxyde de grille C_{INS} (lorsque V_{GS} augmente, V_{CNT} n'est pas augmenté de la même quantité) [11,14].

Dans la littérature, deux manières de prendre en compte la charge accumulée dans le canal du transistor à nanotube sont décrites : 1) cette charge est calculée de manière numérique (par résolution de l'équation de Boltzmann) : Le régime 'classique' correspond au

cas du transistor MOS au Silicium où C_Q est très grande à C_{INS} , capacité de l'oxyde de grille. Dans ce cas, V_{GS} est supérieur à V_{CNT} , le régime de fonctionnement dépend de la charge accumulée dans le canal. A l'inverse, le régime quantique correspond à $C_Q \ll C_{INS}$ on a alors $V_{GS} \sim V_{CNT}$. 2) La capacité grille-source C_{GS} est, selon le régime, plus ou moins dépendante de la capacité d'oxyde ou de la capacité quantique, la capacité grille-source est défini par :

$$C_{GS} = \frac{dQ_{CNT}}{dV_{GS}} \quad \text{III.1}$$

Avec Q_{CNT} est la charge stocké dans le canal.

Le potentiel du canal est défini comme:

$$V_{CNT} = V_{GS} + \frac{Q_{CNT}}{C_{INS}} \quad \text{III.2}$$

Selon Eq.III.2, il est nécessaire de connaître la charge Q_{CNT} pour évaluer le potentiel de canal.

$$Q_{CNT} = q\rho_{CNT}L \quad \text{III.3}$$

L : la longueur de grille, ρ_{CNT} densité totale de charge dans le nanotube donné par la relation suivante(III.4)

$$\rho \cong \frac{2q}{h}mv_F \quad \text{III.4}$$

Avec v_F vitesse de fermi.

Le courant drain-source dans la structure CNFET est calculé par l'expression de 'Landauer-Buttiker' qui suppose un canal unidimensionnel avec un transport balistique. Il est donné par [15] :

$$I = \frac{2q}{h} \int_{E_c}^{\infty} M(E) [f(E - \mu_S) + f(E - \mu_D)].dE \quad \text{III.5}$$

M est le nombre de canal pour les électrons se propageant d'électrode source vers drain.

$$f(E - \mu_i) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - \mu_i}{k_B T}\right)} \quad \text{III.6}$$

La distribution de Fermi des deux niveaux μ_S et μ_D , est dans notre cas la source et le drain respectivement. En développant la fonction de Fermi en le remplace dans Eq.III.5 pour développer l'équation de courant, on aboutit à l'expression suivante :

$$I_D = \frac{4qk_B T}{h} \sum_p [1 \ln(1 + \exp(\xi_S)) - 1 \ln(1 + \exp(\xi_D))] \quad \text{III.7}$$

$$\text{Avec } \xi_i = \left(\frac{V_{CNT} - \Delta_p - \mu_i}{k_B T} \right) \quad \text{III.8}$$

$i=(s,d)$

La principale différence entre le schéma de bande d'énergie de graphène et du nanotube est la discrétisation des bandes de valence et de conduction due au confinement axial des électrons, il en résulte que la bande de conduction est constituée de multiples sous bandes comme il est montré sur la Fig. III.3 [3].

Dans cette résolution, le diamètre de nanotube d est utilisé dans le calcul d'énergie de la première sous-bande de conduction Δ_1 , dans la détermination du nombre de sous-bande (p) nécessaire pour le calcul de courant.

$$\Delta_1 = \frac{E_{gap}}{2} \text{ Avec } \Delta_p = \Delta_1 \frac{(6p-3-(-1)^p)}{4} \quad \text{III.9}$$

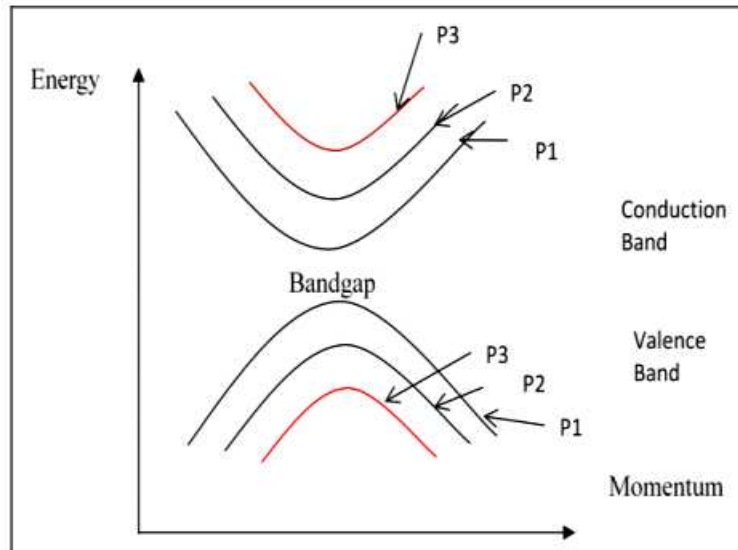


Figure III.3 : schéma de principe montrant les 3 premiers sous bandes.

Si le nanotube est posé sur un plan d'oxyde de hauteur t_{ox} , de permittivité ϵ_{ox} , la capacité est :

$$C_{INS} = \frac{2\pi\epsilon_{ox}\epsilon_0}{\ln\left[\frac{t_{ox}}{d}\right]} \quad \text{III.10}$$

Si le nanotube intrinsèque est entouré de grille coaxiale, toute deux séparées par un oxyde d'épaisseur t_{ox} , l'influence de la grille est plus importante et on a :

$$C_{INS} = \frac{2\pi\epsilon_{ox}\epsilon_0}{\ln\left[2(t_{ox}+d)/d\right]} \quad \text{III.11}$$

La description du fonctionnement de transistor CNFET à accès source et drain dopés met en évidence la nécessité de calculer la charge et le potentiel de canal pour évaluer finalement le courant de drain. Ce calcul est basé sur la physique de l'énergie de sous bande il est obtenue à partir d'une méthode dite zone folding pour la simulation de la dispersion d'énergie $E(k)$.

PARTIE II : SIMULATION DE C-CNFET

I.1. Simulation de $E(k)$

La méthode de 'Zone Folding' nous à permis de mettre en avant l'influence de la chiralité (n, m) sur les structures des bandes obtenues et donc sur le caractère métallique ou semi-conducteurs des nanotubes étudiés. Nous nous sommes intéressés particulièrement aux nanotubes semiconducteurs [3].

L'équation de dispersion d'énergie est nécessaire pour la simulation de la structure de bande. Toutefois, l'équation de dispersion d'énergie $E(k)$ doit être liée à la première, la deuxième et la troisième sous-bande afin de déterminer la position de ces sous-bandes.

A partir de cette équation on obtient la simulation de $E(k)$:

$$E_q^{\pm} = \pm \frac{\sqrt{3}\alpha\gamma_0}{2} \sqrt{\left(\frac{2}{a}\right)^2 * \left(q \pm \frac{\alpha}{3}\right)^2 + k^2} \quad \text{III.12}$$

Ou d est le diamètre de nanotube CNT,

γ_0 est l'énergie de liaison entre deux atomes de carbone ($\gamma_0 = 2.9\text{eV}$),

a correspond à la distance entre deux atome de carbone ($a=0.142\text{nm}$),

$q=0, \dots, N-1$ compte les bandes disponibles,

N est le nombre des cellules graphitiques unitaire dans une circulation de graphène enroulé en nanotube ;

k est la partie du vecteur d'onde qui décrit continuellement les états dans une sous-bande donnée (associé à la direction parallèle à l'axe de nanotube de carbone) ;

α est le reste de la division de $(n-m)$ par 3. $\alpha = 0$ Si le nanotube est métallique et $\alpha = \pm 1$ s'il est semiconducteur.

La figure III.4 montre les courbes de simulation de la dispersion d'énergie $E(k)$, ces courbes sont tracées pour les trois premiers sous bandes.

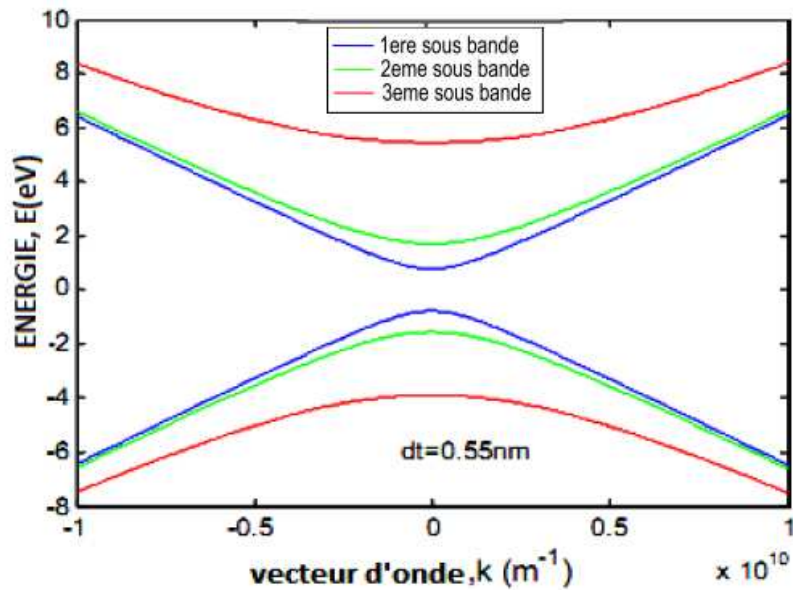


Figure III.4 : la dispersion électronique d'énergie $E(k)$ avec les sous bande de CNT.

La simulation montre que la première sous bande a un écart de bande court par rapport à la deuxième et la troisième sous bande qui est la plus grande. Ceci indique que les porteurs se déplacent facilement de la bande de valence à la bande de conduction dans la première sous bande en raison de sa petite bande interdite par rapport aux autres sous bandes.

I.2. Simulation de la densité d'état (DOS)

Comme la structure de bande est unidimensionnelle (1D) présente des pics appelées singularité de Van Hove (SvH) en bas (et haut) de chaque bande. L'équation de DOS est donnée par la formule suivante :

$$DOS = \frac{dN}{dE L_{ch}} = \frac{\beta}{2\pi \sqrt{E_g}} \left(E - \frac{E_{gap}}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{III.13}$$

Le terme β se compose de l'équation de sous bande. Cela signifie que chaque sous bande aura sa propre valeur β , ce qui permet la simulation de DOS à différentes sous bandes.

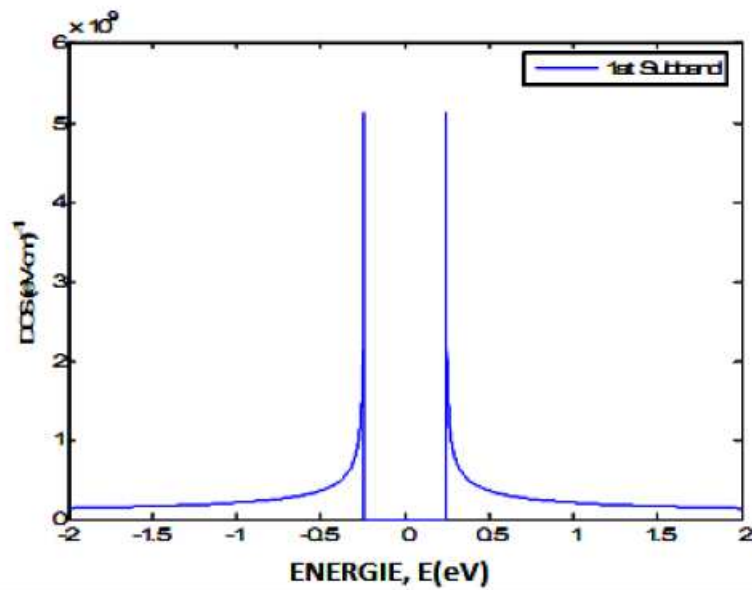


Figure III.5 : Densité d'état pour les premières sous bande.

I.3. Simulation du courant de drain I-V

Comme on le savait déjà à propos du silicium semi-conducteur, la caractéristique I(V) se compose de deux régions, linéaires et de saturation. Toutefois, cette recherche décrit sur la modélisation du courant de drain I(V).

La simulation établie par MATLAB 7 utilisant les différentes équations montrées précédentes, sur un nanotube de carbone de géométrie coaxial avec un diamètre de 0.55nm et une longueur de 200nm a été simulée avec une couche de SiO₂ comme couche d'oxyde voire Fig.III.6. L'épaisseur de la couche d'oxyde a été considérée égale à $t_{ox}=2\text{nm}$.

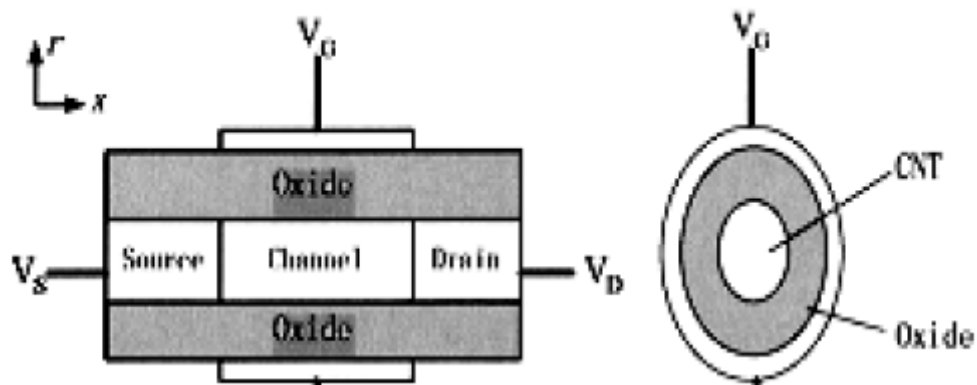


Figure III.6: Géométrie coaxial du CNFET .le canal est de 200nm de long. Le diamètre du CNT est 0.55nm. L'oxyde de la grille est du SiO2 avec une épaisseur de 2nm.

Les figure III.7 et III.8 montrent respectivement deux caractéristique $I_{DS}=f(V_{DS})$ et $I_{DS}=f(V_{GS})$ du modèle.

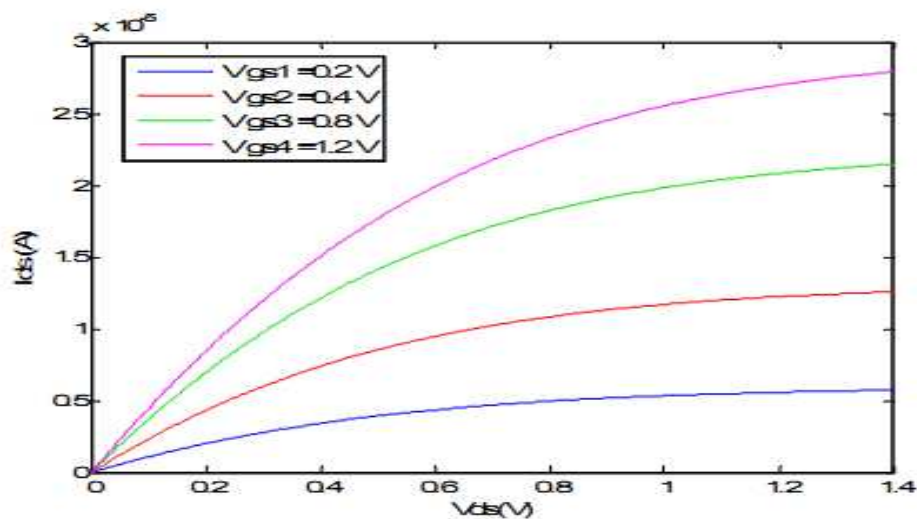


Figure III.7 :Variation de courant de drain en fonction de V_{DS} pour différente valeur de V_{GS} .

Sur la figure III.7 on a présenté la caractéristique I_{DS} en fonction de V_{DS} paramétrées par V_{GS} . Nous remarquons que le courant de drain varie linéairement avec V_{DS} jusqu'à une valeur dite tension de saturation V_{DSat} ou la variation de I_{DS} devient faible (presque constant). Il se crée Donc, deux régions correspondant aux deux régimes de fonctionnement (l'une linéaire, l'autre saturée). Le courant de saturation I_{DSat} atteint sa valeur maximale pour une tension V_{DS} maximale.

Il est intéressant de noter que le courant de drain diminue avec V_{GS} jusqu'à son annulation.

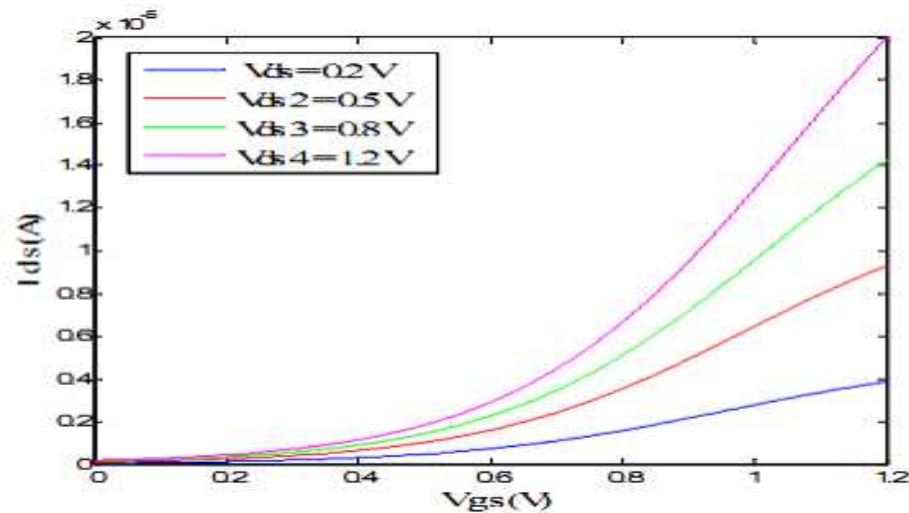


Figure III.8 : Variation du courant de drain en fonction de V_{GS} pour différentes valeurs de V_{DS} .

Sur la figure III.8 on remarque que pour un fort potentiel de drain, un courant de porteur est important, plus V_{GS} augmente, plus le niveau d'énergie de l'ensemble des sous bandes est diminué. Il y a alors plus de porteurs dans la bande de conduction donc le courant augmente.

I.4. Simulation de la densité de charge

La figure III.9 représente la variation de la densité de charge en fonction de V_{GS} . On remarque une diminution exponentielle de la densité de charge en fonction de V_{GS} cette diminution peut être due à la diminution de niveau d'énergie de l'ensemble des sous bandes qui implique une augmentation des porteurs qui diminue la collision entre eux (passage des porteurs sans collision).

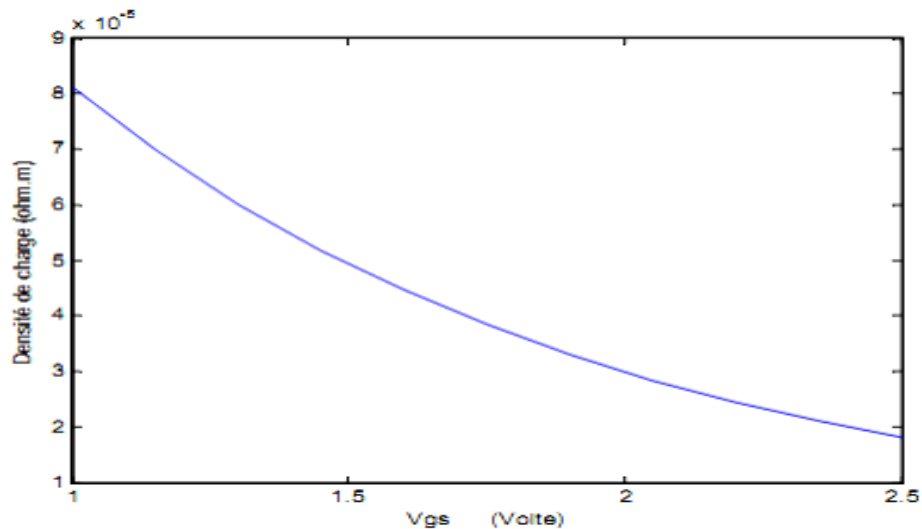


Figure III.9 : Variation de la densité de charge en fonction de V_{GS} .

I.5. Effet du diamètre de carbone nanotube (CNT)

I.5.1. Effet du diamètre sur la dispersion électronique $E(k)$

On sait que l'énergie est inversement proportionnelle au diamètre du tube du canal de transistors CNT. Plus le diamètre du canal est grand, plus l'énergie de gap devenu plus petite, presque nul et tendance à ce comporter comme métallique. Si le diamètre de tube plus petit, l'énergie de gap devenue grand et le CNT se comporte alors comme isolant.

Si on prend un exemple de CNT avec le diamètre de 1.8nm, l'écart de bande pour chaque sous-bande diffère clairement l'un de l'autre. Cependant, quand le diamètre augmente a $d=3.91\text{nm}$, l'écart de bande pour la première, deuxième et troisième sous-bande devient trop étroite voire Fig.III.10.

Les deux premières sous-bandes se croisent en raison d'une courbure plus importante de la première sous bande et plus faible de la seconde pour $d=1.8\text{nm}$, mais pour $d=3.9\text{nm}$ les deux premières sous-bandes ont une courbure quasi identique contrairement à celle obtenues pour $d=1.8\text{nm}$. ces résultats sont donc dépendants de la position des lignes de la Zone de Brillouin (ZB) du nanotube coupent celle du graphène à proximité des points K. Ce phénomène n'est pas limité aux deux cas étudiés et peut être observé pour l'ensemble des tubes zigzag semiconducteurs.

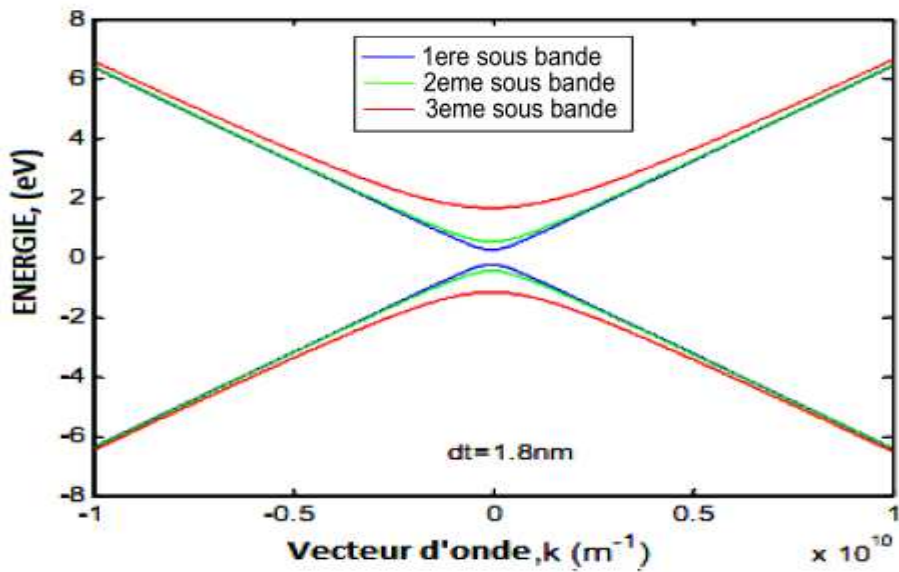


Figure III.10 : a) Effet de sous bande sur la dispersion d'énergie $E(k)$ pour un diamètre de 1.8nm.

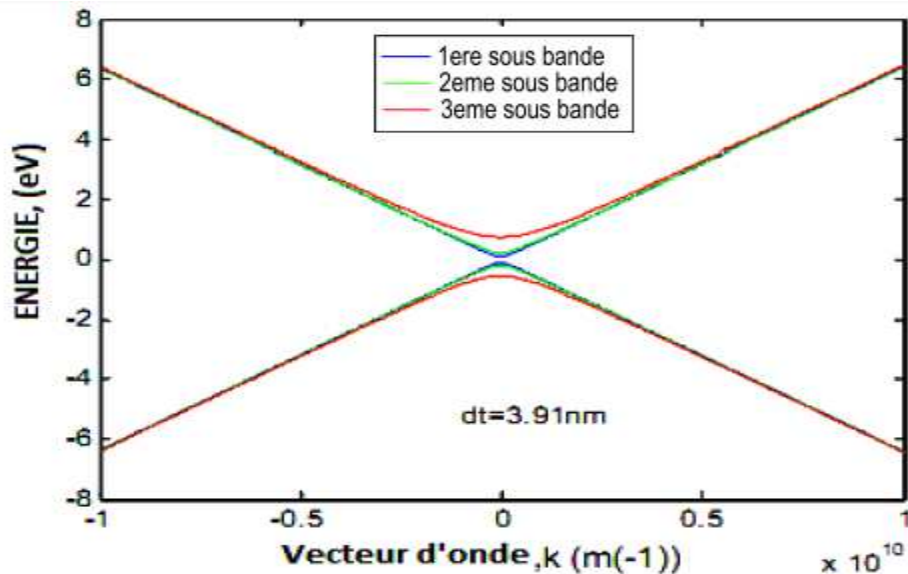


Figure III.10 : b) effet de sous bande sur la dispersion d'énergie $E(k)$ pour un diamètre de 3.9nm.

I.5.2. Effet de diamètre sur les courbes I-V et la tension de seuil

Les caractéristiques de transfert pour différentes valeurs du diamètre du CNT sont indiquées sur les Figs.III.11 et III.12, elles montrent bien l'effet significatif du diamètre. On remarque en effet que le courant augmente avec l'augmentation du diamètre.

Dans cette courbe, on peut extraire les tensions de seuil pour les diamètres de 0.55 et 1.8nm qui sont respectivement de 0.2V et 0.1 V. on constate que la tension de seuil augmente avec la diminution de diamètre, ceci revient au fait que le GAP est inversement proportionnel au diamètre du nanotube de carbone.

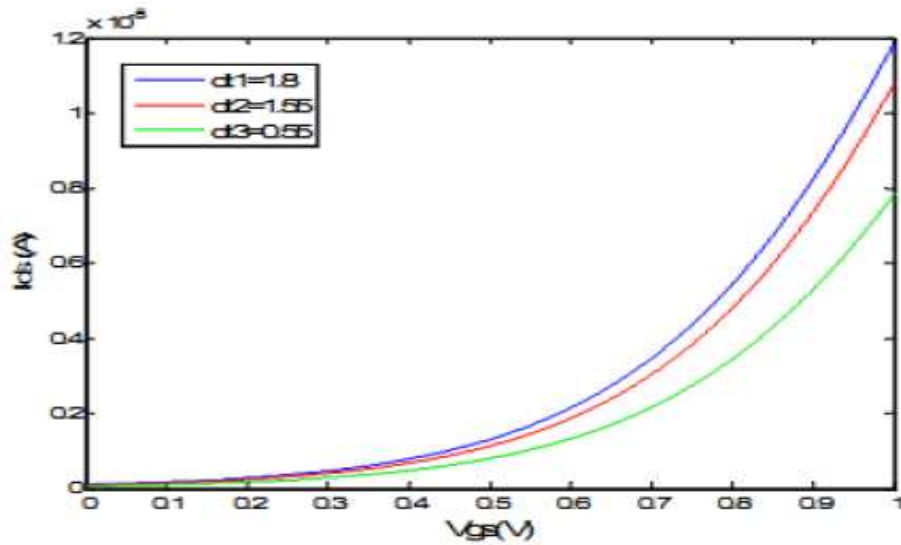


Figure III.11 : Variation de I_{DS} en fonction de V_{GS} pour différentes diamètres du CNT ($V_{DS}=0.6$).

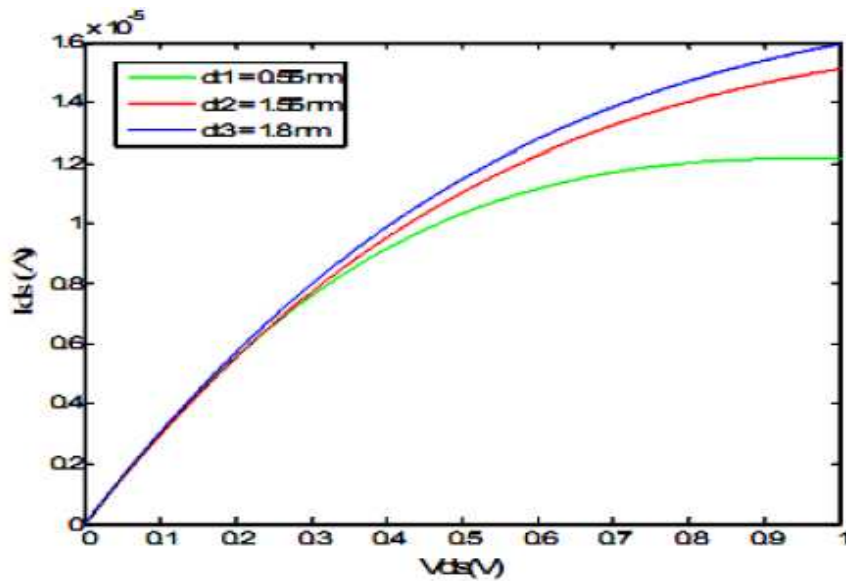


Figure III.12 : Variation de I_{DS} en fonction de V_{DS} pour différentes diamètres du CNT ($V_{GS}=0.4V$).

Le courant I_{DS} augmente avec l'augmentation de diamètre du nanotube de carbone due au passage des quantités important d'électrons, car la structure de bande est dépendante du diamètre du nanotube comme montré sur la figure III.10.

I.6.1. Effet des sous bande sur les courbes I-V

La figure III.13 présente la variation du courant de drain I_{DS} en fonction de la tension de drain appliquée V_{DS} , pour la contribution de la 1ere, 2eme, 3eme sous bande en prenant une tension de grille $V_{GS}=0.4V$.

La figure III.13 montre que les courbes ne sont pas similaires, dans la région linéaire. Le courant du drain I_{DS} augmente lorsque la tension V_{DS} augmente. Cette augmentation est importante pour la 1^{ère} sous bande par rapport à la 3eme sous bande.

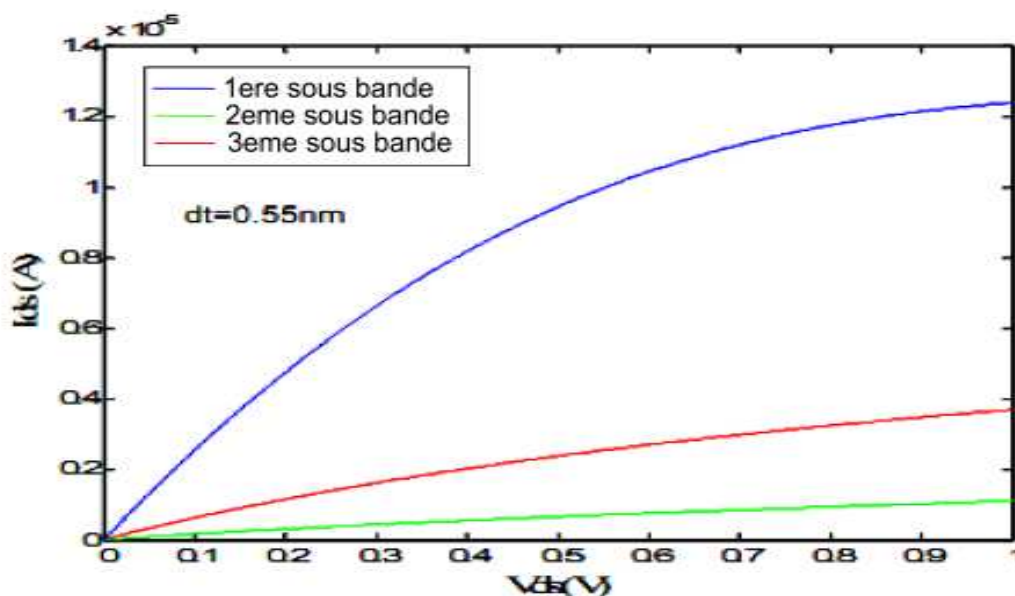


Figure III.13 : variation de I_{DS} en fonction de V_{DS} pour les trois premières sous bandes.

La figure III.14 montre le courant de drain I_{DS} en fonction de la polarisation de grille appliquée, V_{GS} pour la contribution des 1ere, 2eme, 3eme sous-bandes. Les courbes ne sont plus semblables, dénotant le remplissage plus de sous-bandes de 1ere par apport à 2eme et 3eme sous bande aide à l'augmentation de courant total.

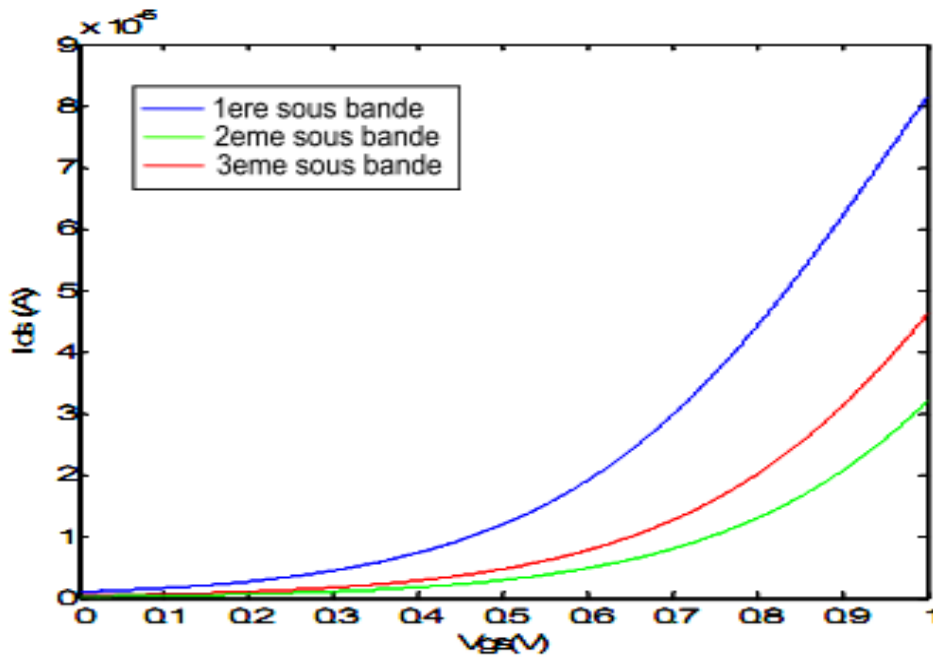
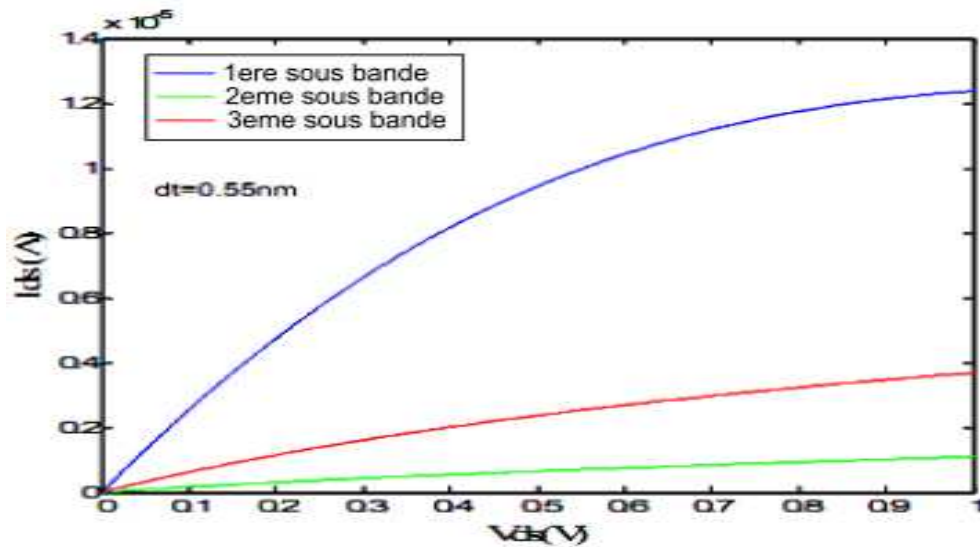


Figure III.14 : variation de I_{DS} en fonction de V_{GS} pour les trois premières sous bande.

Cette augmentation due au passage de grande quantité de porteur du au petit écart de bande gap de la première sous bande par apport au 2eme et 3eme sous bande.

I.6.2. Effet des sous bande sur les courbes I-V pour des diamètres différents

La figure III.15 présente la variation du courant de drain I_{DS} en fonction de la tension appliquée V_{DS} pour les trois premières sous bandes et 2 diamètres différents du canal CNT. On voit clairement que le courant de drain pour la première sous bande est plus grand que celui de la troisième sous bande, cette augmentation diminue lorsque le diamètre du nanotube augmente.



(a)

(b)

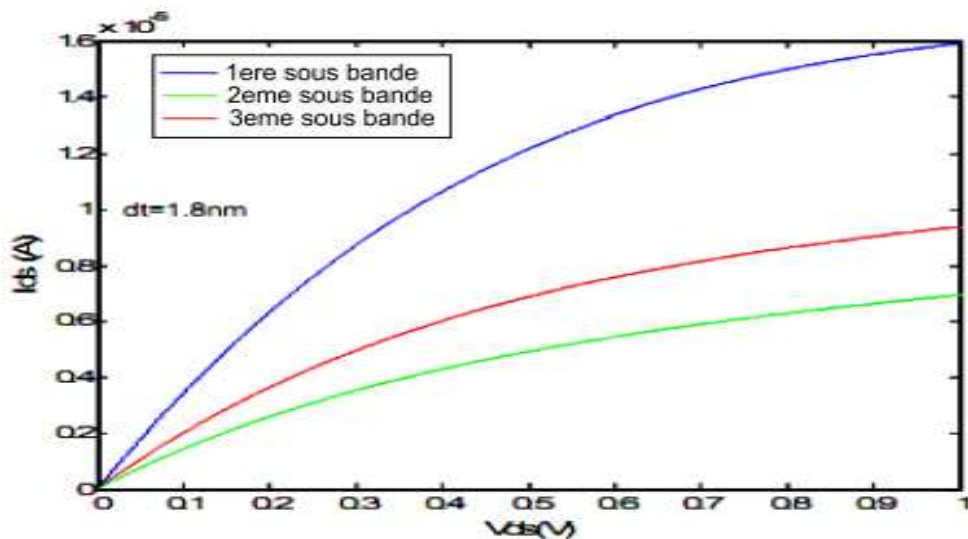


Figure III.15 : Variation de I_{DS} en fonction V_{DS} pour les trois premiers sous bande

(a) $d=0.55 \text{ nm}$ et (b) $d=1.8 \text{ nm}$ respectivement.

En conclusion, le courant de drain I_{DS} de la première sous bande est important par rapport aux autres sous bande, ce décalage de courbe est dû à la variation de l'énergie de gap E_g de la première aux 3eme sous bande. Ce qui indique que le remplissage de la seconde et troisième sous-bande sont remplis par un apport a la première sous-bande, cette variation est significative lorsque le diamètre augmente.

Pour conclure le courant I_{ON} est plus important dans le cas du diamètre est grand que dans le petit diamètre. Ceci est dû au fait que dans le cas des grands diamètres, on compte

deux de sous - bande qui contribuent à la conduction, par contre dans le nanotube de petit diamètre, une seule sous-bande seulement qui contribue à la conduction.

I.7. Effet de qualité d'oxyde sur les courbes I-V

En raison des faibles dimensions du CNFET, on rencontre de nombreuses limitations comme effet de canal court, tunnel....etc.

Pour surmonter ces limitations, plusieurs solutions ont été proposées. L'utilisation d'un matériau diélectrique de permittivité élevé comme isolant de grille est l'une des solutions proposées.

Les matériaux diélectriques considérés avec leurs constantes diélectrique (ϵ) sont présentés dans le tableau III.1.

Nom d'oxyde	La formule chimique	Constant diélectrique(ϵ)
Oxide d'aluminium	Al ₂ O ₃	10
Hafnium dioxyde	HfO ₂	15
Oxide de zirconium	ZrO ₂	18-40
Oxide de Titanium	TiO ₂	50

Tableau III.1 : Oxydes considérés pour l'isolation de la grille avec différents constant diélectrique.

Les couches minces des matériaux high-k, tels que le ZrO₂ et HfO₂ sont fortement envisagées pour l'intégration des isolants de grille dans les transistors à effet de champs car ils permettent des densités de courant élevées à l'état – ON et de faibles consommations en puissance. L'intégration de diélectrique high-k a été un défi dans les MOSFETs plans à cause de la dégradation de la mobilité dans les canaux à silicium. Un avantage privilégié des nanotubes de carbone est leur compatibilité avec les matériaux high-k et la faible interaction des liaisons non covalentes entre les deux matériaux, empêchant toute perturbation du transport électronique dans les nanotubes de carbone.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons décrit un modèle physique basé sur l'analyse des sous bande d'énergie. Ce calcul, obtenu à partir d'une méthode dite zone folding. L'analyse des simulations des caractéristiques $I_{DS}(V_{DS})$ qui est basé sur le modèle de calcul de la densité de charge et de la dispersion de l'énergie $E(K)$ pour les trois sous-bande ont montré que le diamètre du CNT avait un impact significatif sur le courant de drain et la largeur de bande interdite de la sous-bande.

Concernant la tension de seuil, les dispositifs utilisant des nanotubes de carbone de diamètre plus élevé montrent des tensions de seuil plus faibles en raison de la faible énergie du Gap. Ce qui se traduit par une tension de grille plus faible pour la mise en conduction de la première sous bande dont l'énergie est égal à la moitié de Gap. Cependant, les nanotubes qui possèdent le plus petit diamètre (0.55nm) ont un courant I_{OFF} plus faible et un rapport I_{ON}/I_{OFF} plus élevées ainsi qu'une pente sous le seuil avoisinant la pente idéale. ($\approx 60mV/dec$). Donc les nanotubes possédant le plus petit diamètre présentent de meilleures performances.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

La recherche des nouveaux matériaux semiconducteurs et des nouveaux dispositifs pour remplacer le silicium et le MOSFET au silicium va conduire à une nouvelle révolution au sein des industries électronique. Les nanotechnologies sont un secteur innovant et promoteur qui présente des nombreuses perspectives d'applications. Afin que ces perspectives deviennent des réalités, un 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 promoteurs pour les utilisé comme canal de conduction dans les transistors à effet de champ, à savoir, leur modélisation et leur simulation à fin de prévoir le comportement et la faisabilité d'un dispositif avant sa réalisation. La simulation et la modélisation des dispositifs amélioreront la compréhension physique des dispositifs de taille nanométrique.

Nous avons étudié les nanotubes de carbone et les dispositifs CNFETs, puis on a présenter quelque types de CNFETs avec un résumé sur le principe de fonctionnement de chaque composant(C-CNFET, SB-FET,...), en procédant à la modélisation compacte physique et électrique du transistor à nanotube de carbone à modulation de hauteur de barrière appelé aussi CNFET de type MOS (MOS-like CNFET) ou C-CNFET pour CNFET Conventionnel avec leur équation fondamentale. Afin de pouvoir s'adapter aux diverses technologies de ce transistor. En fin, une simulation mathématique est effectuée en se basant sur les expressions fournies précédemment. Cette simulation nous à permet à l'extraction de quelque de paramètre tel que la tension de seuil, le courant I_{ON} et le courant I_{OFF} . Le C-CNFET présente des caractéristiques similaires au transistor MOSFET au silicium avec une amélioration de rapport I_{ON}/I_{OFF} qui plus important ($\approx 10^6$), on utilise des diamètres plus petits, ainsi qu'une pente sous le seuil avoisinant la pente idéale, bien sur on profitant de transport balistique dans le nanotube de carbone. Les résultats obtenus sont satisfaisante. enfin, la simulation d'un circuit avec ce modèle permet d'estimer l'impact de la dispersion technologique sur ses caractéristiques électriques : le contrôle des paramètres technologiques est un élément clé pour améliorer les performances de transistors à base de nanotubes.

A l'air de l'électronique moléculaire, le transistor CNFET à le mérite d'avoir de très bonnes potentielles en raison de ses propriétés électriques et physiques.

Pour leur utilisation dans les circuits intégrés les nanotubes de carbone ont investi plusieurs domaines tels que transistor à haute fréquence, transistor de puissance, capteurs et microcapteurs,...

Ce travail étant un support théorique fondamental, pourra être complété par la réalisation d'expériences sur différents composants. Toutes les voies qui apparaissent sont prometteuses, elles restent pour l'instant du domaine de la recherche fondamentale.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : S.Iijima, « helical micritubules of graphic carbon », 1991.
- [2] J.T.Sander, A.R.M. Vershueren and C.Dekker, « Room- temperature transistor based on single carbon nanotube »,1998.
- [3] MOUATSI ABDELMALEK "composant a hétérostructure : Application en nanoélectronique et nano photonique", 2013, thèse de doctorat, Université CONSTANTINE.
- [4] wolfgang hoenlein, « carbon nanotube applications in microelectronics », IEEE transactions on components and packaging technologies, Vol. 27, No.4, 2004.
- [5] Montassar NAJARI, « Modélisation compacte des transistors à nanotube de carbone à contacts Schottky et application aux circuits numériques », 2010, thèse de doctorat, Université BORDEAUX 1.
- [6] Louis Gorintin, « Étude et réalisation de transistors à nanotubes de carbone pour la détection sélective de gaz », 2011, thèse de doctorat, de l'École Polytechnique.
- [7] François Triozon, « diffusion quantique et conductivité dans les systèmes a périodique »,2002 thèse de doctorat de l'université joseph Fourier –Grenoble.
- [8] Cosmin Ioan ROMAN, « Modélisation de dispositifs a base de nanotube de carbone pour la détection de biomolécules », 2006, thèse de doctorat de l'INPG.
- [9] :Nicolas IZARD, « Nanotube de carbone : systemes pour la limitation optique » ,2004 thèse de doctorat université de Montpellier II.
- [10] INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS: 2007 «EMERGING RESEARCH DEVICES», Technical report, ITRS.
- [11] Johnny GOGUET " Contribution à la modélisation physique et électrique compacte du transistor à nanotube ", 2009, L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1.

[12] Hugues CAZIN d'HONINCTHUN « Des propriétés de transport des nanotubes de carbone au transistor : étude par simulation MONTE CARLO », these de doctorat, 2008, Université du PARIS-SUD.

[13] Lionel FOURDRINIER, « Fabrication et étude physique de dispositifs électroniques du nanotube de carbone », thèse de doctorat, 2009, DE L'Institut Polytechnique de Grenoble.

[14] J.Guo, M.Lundstrom, and S.Datta, « Performance projections for ballistic carbone nanotube field-effect transistor », *phys.rev.lett.*, 2002.

[15] A.Raychowdhury, S.Mukhopadhyay, and K.Roy, « A circuit-compatible Model of Ballistic Carbon nanotube field-effect transistors », *IEEE, Trans. On computer aided design integrated circuits and systems*, 2004.