

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Génie Microélectronique

Présenté par

Kahina HESSAS

Thème

Etude du graphène et du GFET

Mémoire soutenu publiquement le 25/09/2017 devant le jury composé de :

M Takfarinas CHELLI

UMMTO, Président

M Arezki BENFDILA

Professeur, UMMTO, Encadreur

M Ahcen LAKHLEF

UMMTO, Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

Remerciements :

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur Mr A.BENFDILA pour sa confiance, ses remarques, ses orientations, ses précieux conseils, et sa bienveillance.

Que tous les enseignants que j'ai eus au cours de ma formation trouvent ici mes vifs remerciements et à leur tête Mr A.LAKHLEF, Mr A.MAIDI et Mr H. KANANE ainsi que Mr T.CHELLI

Je voudrai également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Que tous mes amis et connaissances soient eux aussi remerciés ; ainsi que mes camarades (Souaad, Chafia , Kaci , Azouaou, Moh ,Mustapha, Moh n'Amar, Djilali ainsi que Mohend et Katia) pour les bons moments qu'on a pu partager au cours de ces deux dernières années à la "salle 7"

Que toute ma famille aussi trouve ici le témoignage de toute ma reconnaissance.

Grand merci à tous

kahina

Dédicaces :

A la mémoire de ma nièce NOUNOU

A mes chers parents

A ma grand-mère

A mes frères et sœurs

A mes neveux et nièces

Kahina

Sommaire ²

Chapitre I : Généralités sur le graphène

Introduction	1
I.1. le carbone	1
1.2. Allotropies du carbone :	2
I.2.1. Le graphite :	3
I.2.2. Le diamant :	4
I.3. Nouvelles formes de carbones :	5
I.3.1. Les fullerènes :	5
I.3.2. Nanotube de carbone :	6
I.4. Le graphène :	9
I.4.1. Définition du graphène :	9
I.4.2. Structure atomique :	10
I.4.3. Structure électronique :	11
I.4.3.1. Hybridation SP^2 :	11
I.4.3.2. Structure de bandes d'énergies :	15
I.4.3.3 niveaux de landau et effet hall quantique :	17
II.1.1. Techniques de synthèse du graphène :	18
II.1.1.1. synthèse de graphène par exfoliation mécanique.....	19
I.1.2. Synthèse par dépôt chimique en vapeur	20
II.1.3 Synthèse par décomposition thermique du SIC	21
II.1.4. Ouverture de nanotubes de carbone	22
II.1.5. réduction d'oxyde du graphène.....	23
II.1.6. Nombres de couches obtenus.....	24
III. Propriétés du graphène	25
III.1. Sa haute mobilité	25

III.2. Propriétés de transparence optiques	25
III.3. Propriétés de résistance mécanique	25
III.4. Propriétés de conductivité thermique	25
IV. Applications possibles.....	26
Conclusion.....	27

Chapitre II : Etude du graphène et régimes de transport

Introduction	27
I. Ouverture d'une bande interdite dans le graphène.....	27
I.1. Nano ruban de graphène.....	27
I.2. Bicouche de graphène	28
I.3. graphène sur SiC	29
I.4. Dopage du graphène.....	30
II. Régimes de transport	31
II.1. longueurs caractéristiques	31
II.2. transport classique.....	32
II. 3. Transport balistique	34
II.4. Transport dans le graphène.....	34
II.4.1. Transport dans le graphène intrinsèque.....	34
II.4.2 transport dans le graphène désordonné	35
II.4.2.1 Transport à haute densité de porteurs	35
II.4.2.2 Transport à faible densité de porteurs.....	36
II.5. nano ruban balistique	37
II.5.1. Nano ruban désordonné :.....	39
II.5 .1 .1. Désordre courte portée.....	39
II.5.1.2. désordre longue porté	40
II .5.3. Désordre de bords.....	42

II.6. Effets de nano ruban de graphène sur les propriétés électrique.....	42
Conclusion.....	45
Chapitre III transistor à effet de champ à base de graphène	
Introduction :	46
I. transistors à effet de champ à base de graphène :	46
II. Types de transistors à base de graphène	50
II.1. Transistor avec grille supérieure TG (Top Gate) :	50
II.2. Transistor avec grille inférieure BG (Back Gate)	52
II.2. Transistor à double grilles au graphène DG-FET	55
III. Techniques de fabrication du transistor à effet de champ :	57
III.1. Lithographie optique.....	57
III.2. Technique du pochoir :	58
III.3. Lithographie électronique.....	59
IV. Etapes fabrication du GNR FET	60
Conclusion :	63
Chapitre IV: Modélisation des transistors FET à base de graphène	
Introduction	65
I. Modèles des transistors à effet de champ à base de graphène GFET	65
I. transistor GFET	66
I.1. La transconductance <i>gm</i>	66
I.2. Fréquence de transition	68
II. Caractéristiques de transfert et de sortie du GFET	69
II.1. Caractéristiques <i>Id(Vds)</i>	69
II.2. Caractéristique de transfert <i>Id(Vgs)</i>	70
III. Modèle du transistor FET double grille à base de graphène DG-GFET	72
III.1. Caractéristique de transfert <i>Id (Vds)</i> :	73

IV. Modèle du transistor FET à base nano-ruban	75
VI.1 caractéristique de transfère I_{ds} (V_{gs})	75
IV.2Influence des effets de bord sur le courant :	76
IV.3.caractéristique de sortie $I_{ds} = f(V_{ds})$ et $I_{gs} = f(V_{gs})$ du GNR FET	77
IV.4.Transconductance dans GNR FET	78
IV.5. Gain en courant	79
Conclusion :.....	80

Liste des figures :

Chapitre I : généralités sur le graphène

Figure (I -1) : le carbone dans le tableau periodique.....	3
Figure (I-2): famille des carbonés selon leur apparition chronologique	4
Figure (I-3) : le graphite dans la nature (à gauche) ; sa structure 3D (à droite).....	5
Figure (I-4) : structure du diamant (à gauche) ; Diamant dans la nature (à droite).....	6
Figure (I-5) : (à gauche) poudre de fullerène C60, (à droite) fullerène C60 comportant 20 hexagones et 12 pentagones	7
Figure (I-6) : Enroulement d'une feuille de graphène sur elle-même	8
Figure (I-7): représentation des trois types de tubes selon les différents fullerènes	8
Figure I(-8): Définition de la chiralité (n ,m) des nanotubes sur la base d'une feuille de graphène enroulée sur elle-même en reliant les deux extrémités du vecteur Ch , T est orienté le long de l'axe du tube, dont le module représente la plus petite maille	9
Figure I-9 :a) couche de graphène; b) empilement de trois couches de graphène (graphite)..	10
Figure (I-10): structure atomique d'un empilement de trois couches de graphène.....	11
Figure I-11: a)structure en nid d'abeille du graphène ;b) zone de Brillouin du graphène	11
Figure (I-12): vues en perspectives des orbitales selon les différentes valeurs de m.....	13
A est sous forme sphérique et B prend la forme de 8 .[5].....	13
Figure (I-13): illustration de différentes formes d'orbitale d'électrons pour n=2.....	13
Figure (I- 14) :(A) état de remplissage d'électron dans l'orbitale S, les flèches correspondent aux spins B) état de remplissage d'électrons de l'orbitale P, (C) illustration de l'hybridation de l'orbitale S avec les orbitales Px et Py.	14
Figure (I-15) : diagramme schématique des liaisons σ et des orbitales π	15
Figure I- 16 : illustration de la formation de liaison σ , l'orbitale d'un atome de carbone se recouvre de façon axiale avec celui de son voisin.....	15
Figure (I-17) : illustration de la formation de la liaison π (A),(B) ;et (C) entre deux atomes de carbone . (D) et (E) dans une structure hexagonale du graphène.....	16
Figure (I-18) : structure de bande d'énergie du graphène, agrandissement de la structure de bande d'énergie aux voisinages de K et K	18
Figure (I. 19): à gauche niveaux de landau du graphène apparaissant comme des pics, à droite sont représentés les orbitaux cyclotrons sur le cône de Dirac	19
Figure (I-20): les différentes étapes d'exfoliation mécanique du graphène à partir du graphite	20
Figure (I-21): graphène synthétisé par la méthode CVD sur Ni . (A) image optique du graphène sur Ni , les flèches marquent des zones couvertes par graphène (B) image TEM du graphène sur Ni	22

Figure (I-22): bicouche de carbure de silicium composé d'une couche d'atome de silicium et une autre couche d'atome de carbones intercalés	23
Figure (I-23): représentation de l'ouverture d'un nanotube de carbone mono-feuillet (à droite) mécanisme de l'ouverture d'un nanotube de carbone (à gauche).....	24
Figure (I-24): Modèle d'une feuille de graphène oxydé	25
Figure (I-25): modèle d'un feuillet de graphène réduit.....	25

Chapitre II: Etude du graphène.

Figure II.1: représentation de nano ruban armchair (en marron) et zigzag (en bleu).....	30
Figure II.2: application d'un champ électrique sur un biplan de graphène.....	31
Figure II.3: cliché ERPES pris près du point de Dirac K.....	32
Figure II.4 : la conductivité en fonction de la tension de grille V_g	38
Figure II.5 : (à gauche) densité locale de charge mettant en évidence les ilots des électrons (régions en rouge) et trous (régions en bleu) , (à droite) histogramme représentant la distribution de densité	39
Figure II.6 : (à gauche) structure de bande 1D pour un nano ruban de type arm chair (N=90) et (à droite) conductance théorique en fonction de l'énergie de Fermi.....	40
Figure II.7: structure de bande 1D pour un nano ruban zigzag et conductance théorique en fonction de l'énergie de Fermi	40
Figure II.8: Conductance (G) pour un ruban arm chair en fonction de l'énergie de fermi E_f .	41
Figure II.9: Conductance pour un nano ruban de type zigzag idéal (ligne bleue) et arm chair (ligne rouge pointillés) de largeur 20 nm	42
Figure II.10: (a) conductance ; (b) conductance moyenne pour GNR arm chair de largeur $W = 30\text{nm}$ et des longueurs $L \in [10\ 1000\text{nm}]$, (c) structure de bande pour un GNR arm chair (N=13), (d) la bande noire de la figure (c) déroulée pour paraître comme une seule bande	43
Figure II.11 : GNR arm chair de largeur $M_c = 12$	45
Figure II.12 : Diagramme de bandes et transmission du GNR arm chair $M_c = 12$	45
Figure II.13: GNR arm chair $M_c = 8$	45
Figure II.14 : Diagramme de bande et transmission du GNR arm chair $M_c = 8$	46
Figure II.15 : évolution de E_g en fonction de la largeur M_c du GNR	47

Chapitre III: le Transistor à effet de champ à base de graphène:

Figure III.1: structure schématique de base du transistor MOS	48
Figure III.2: caractéristiques de transit d'un transistor NMOS : courant de drain I_D en fonction de la tension de grille V_G	49
Figure III.4: les différents régimes du TMOS.....	51
Figure III.5: schéma en coupe d'un FET avec grille par le haut.....	52

Figure III.6 :(a) photographie SEM d'un transistor au graphène exfolié et grille supérieur (b) caractéristique $I_D(V_G)$ d'un transistor avec et sans grille supérieur. La grille impacte les performances du dispositif 53

Figure III.7 : schéma d'une structure pseudo-MOS 54

Figure III.8: transistor de type pseudo MOS avec canal en graphène CVD. 55

Figure III.9 : courbe $I_D(V_G)$ lorsque $V_d=100mV$ pour une longueur de grille $L_G=2\mu m$ 55

Figure III.10: structure d'un transistor (simple grille) SOI de type n 56

Figure III.11: (à gauche) structure du transistor à graphène, (à droite) configuration de transistor GFET double grille..... 57

Figure III.12: schéma résumant les étapes principales du processus de lithographie optique,(a)spin-coating de la résine, (b) alignement des masques et exposition de la résine aux UV ;(c) dépôt d'une couche d'accroche de 2nm de titane et une couche de 60nm d'or, (d)*lift-off* de la résine 59

Figure III.13: Schéma résumant les trois étapes essentielles du pochoir (a)alignement de la grille TEM,(b)dépôt d'une couche d'accroche d'une couche d'or, (c) retrait de la grille TEM ; en haut à droite image optique de la grille TEM..... 60

Figure III.14: comparaison de technique de lithographie optique en (a) et électronique en (b) 60

Figure III.15: illustration de la géométrie du GNR FET..... 61

Figure III.20: structure finale du GNRFET 64

Chapitre IV : Modélisation de transistor FET a base de graphène.

Figure IV.1: variation de la transconductance gm suivant V_{gs} avec $Cox= 3.6 \times 10^{-3} F/m^2, \mu = 7000 cm^2 V^{-1} s^{-1}$, and $\omega = 8.5*10^{13} Hz$ $L=100nm$ (à gauche) et $L=440nm$ (à droite) [7]..... 68

Figure IV.2 : variation de la fréquence en fonction de V_{gs} pour 69
 $Cox= 3.6 \times 10^{-3} F/m^2, \mu = 7000 cm^2 V^{-1} s^{-1}$, and $\omega = 8.5*10^{13} Hz$. $L=100nm$ (à gauche) et $L=440nm$ (à droite)[7]..... 69

Figure IV.3: variation courant de drain I_d suivant la tension V_{ds} avec 70
 $Cox= 3.6 \times 10^{-3} F/m^2, \mu = 7000 cm^2 V^{-1} s^{-1}$, and $\omega = 8.5*10^{13} Hz$. $L=100nm$ (à gauche) et $L=440nm$ (à droite)[7]..... 71

Figure IV.5:variation du courant I_d en fonction de V_{gs} , avec 72
 $Cox= 3.6 \times 10^{-3} F/m^2, \mu = 7000 cm^2 V^{-1} s^{-1}$, and $\omega = 8.5*10^{13} Hz$. $L=100nm$ (à gauche) et $L=440nm$ (à droite) [7]..... 72

Figure IV.6.: Variation du courant de drain en fonction de V_{ds} , avec $C_{top} = 209 \times 10^{-9} F$, $C_{back} = 11.5 \times 10^{-9} F$, $V_{bg} = -1,5V$, $L=100nm$ (à gauche) et $L=440nm$ (à droite) [7] ..	74
Figure IV.7: Variation du courant de drain en fonction de V_{ds} , avec $L=100nm$ et $C_{top} = 209 \times 10^{-9} F$, $C_{back} = 11.5 \times 10^{-9} F$, $V_{bg} = -5V$	75
Figure IV.8 : Caractéristique de transfert $I_{ds}(V_{gs})$ d'un GNR FET avec $W=100nm$; $N_{ruban}=40$ et $L_g = 150nm$	76
Figure IV.9. : Influence des effets de bords sur le courant	77
Figure IV.10. :(A) caractéristique $I_{ds}=f(V_{ds})$, (B) caractéristique $I_{gs}=f(V_{gs})$	78
Figure IV.11. : Transconductance G_m calculée à partir $I_{ds}=f(V_{gs})$	79
Figure IV.12 : vu d'artiste d'un transistor au graphène	80

Introduction générale

Introduction générale :

Le transistor est le principal composant d'un circuit intégré, présent au cœur de notre quotidien il fait partie intégrante de tous nos appareils électroniques (téléphones, tablettes ; ordinateurs, véhicules ...). Ces appareils sont en perpétuelle évolution, toujours plus petits, toujours plus performants ... de ce fait l'évolution des circuits intégrés vers la haute intégration est devenu inévitable de nos jours ; si les avantages que celle-ci peut offrir à la technologie de demain afin de répondre à la course aux performances à laquelle est soumise la microélectronique actuelle.

Ainsi les transistors connaissant une miniaturisation régulière de leurs dimensions, celle-ci suivant la loi de MOORE mise en évidence par GORDEN MOORE sur des bases purement économiques celle-ci consistant à doubler la productivité tous les 18 mois.

Cependant, si cette loi a longtemps montré sa crédibilité, cette dernière a montré ses limites technologiques, en terme de réduction de taille des effets parasites font surface et mettent les dispositifs dans l'impasse, car il est évident qu'on ne peut pas miniaturiser des composants à l'infini, pour y remédier des études explorent de nouvelles architectures, de nouveaux concepts ou modes de fonctionnements, deux voies sont alors engagées, soit :

- pousser les limites du MOSFET classique (more MOORE) en trouvant d'autres manières de transport de porteurs
- En contournant cette loi en trouvant d'autres matériaux alternatifs afin de répondre au déclin de la technologie à base de silicium,

Le graphène qui fera l'objet de mon travail peut être considéré comme une alternative, la science moderne se penche sur ce matériau pour ses propriétés électronique et uniques.

Mon travail réparti en quatre chapitres, consiste à présenter ce matériau hors normes ,et les avantages qu'il peut apporter à la technologie ceci en présentant dans le premier chapitre une vue générale de ce matériau , on fera connaissance de sa structure cristallographique et électronique et les différentes manières de l'obtenir puis voir les propriétés qui font de lui un matériau miracle.

Le graphène étant un matériau semi-conducteur sans bande interdite nécessite une ouverture de celle-ci en créant un gap par différentes façons, comme on verra les régimes de transport et les désordres qui peuvent survenir dans le graphène et leur influence sur ses propriétés dans

deuxième chapitre, puis en troisième lieu on s'intéressera aux différents types de transistors FET à base de graphène et leurs techniques de fabrication, puis les différents modèles mathématiques de transistor FET à base de graphène et leurs caractéristiques seront présentés en dernier dans le quatrième chapitre et on termine par une conclusion .

Généralités sur le graphène

Introduction :

Les matériaux font partie de notre quotidien, à tel point qu'on y prête plus attention. Cependant dans les laboratoires, une armée de chercheurs les ausculte et les manipule dans l'espoir de découvrir et d'exploiter des propriétés qui permettront d'améliorer les produits que fabrique l'industrie pour notre usage.

Le graphène qui fut le premier système à deux dimensions jamais réalisé, figure dans la liste de ces matériaux tant étudiés, depuis son impressionnante découverte en 2004; ce dernier suscite la convoitise de chercheurs du monde entier.

Ce premier chapitre consiste donc à présenter ce matériau révolutionnaire en faisant un tour d'horizon sur son origine ainsi que sa structure, ses propriétés extraordinaires qui font qu'il rentre dans la course aux matériaux révolutionnant le monde de l'industrie technologique grâce aux applications possibles qu'il peut nous permettre de réaliser et ainsi le possible remplacement du silicium matériau de base de l'électronique d'aujourd'hui C'est donc une projection d'un futur probable qu'on va essayer de présenter.

I.1. le carbone

Trouvable sous différentes formes physiques appelées allotropies, il est le 4^{ème} élément le plus abondant dans notre système solaire Après (l'hydrogène, l'hélium et l'oxygène); son symbole chimique est le C, de la famille cristallogènes, son numéro atomique est le 6, sa masse volumique est le 2,2g. cm⁻¹ et sa masse molaire est de 12,0107 g. mol⁻¹ [1]

Il comporte 4 électrons sur sa couche externe ($2S^2, 2P^2$), ainsi il peut former de multiples liaisons carbone-carbone par hybridation de ses orbitales : le graphite avec (SP, SP^2) ou le diamant SP^3

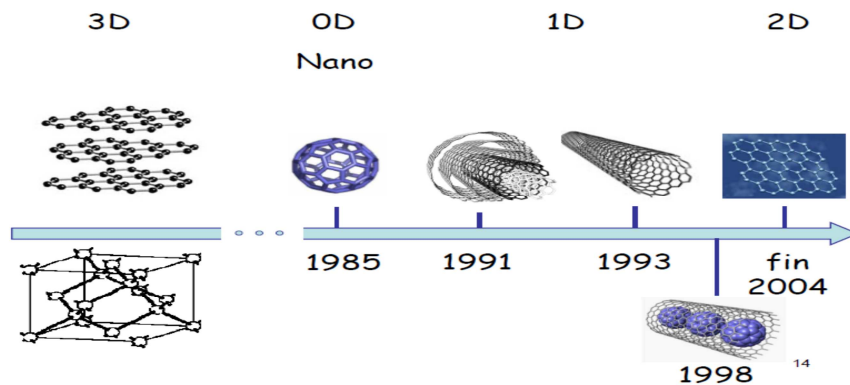
Non-métaux					18 VIII A
13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	2 Hélium 4.002602
5 B Bore 10.811	6 C Carbone 12.0107	7 N Azote 14.00674	8 O Oxygène 15.9994	9 F Fluor 18.9984032	10 Ne Néon 20.1797
13 Al Aluminium 26.981538	14 Si Silicium 28.0855	15 P Phosphore 30.973761	16 S Soufre 32.066	17 Cl Chlore 35.453	18 Ar Argon 39.948
31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.64	33 As Arsenic 74.92160	34 Se Sélénium 78.96	35 Br Brome 79.904	36 Kr Krypton 83.798
49 In Indium 114.818	50 Sn Étain 118.710	51 Sb Antimoine 121.760	52 Te Tellure 127.60	53 I Iode 126.90447	54 Xe Xénon 131.293
81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Plomb 207.2	83 Bi Bismuth 208.98038	84 Po Polonium (209)	85 At Astate (210)	86 Rn Radon (222)

Figure (I -1) : le carbone dans le tableau periodique

1.2. Allotropies du carbone :

La famille des carbonés se présente en 5 éléments essentiels et connaissent une convoitise extraordinaire de part les chercheurs du monde entier, qui par le billet de leurs études ont réussi à avoir des structures de différentes dimensions (3D, 2D, 1D, 0D) qui deviennent aujourd'hui essentiel à notre existence et qui font les sujets d'actualité du monde de la technologie grâce aux multiples applications que celles-ci peuvent offrir.

Selon leurs apparitions chronologiques et leurs dimensions ;ces allotropies sont représentées dans la figure ci-dessous :



Figure(I-2): famille des carbonés selon leur apparition chronologique.

On y distingue :

- le graphite et le diamant qui forment des systèmes à 3 dimensions
- les fullerènes parues en 1985 qui sont des systèmes à 0 dimension
- les nanotubes multi-parois depuis 1991 et les mono-parois en 1993 qui sont à 1 dimension
- le graphène paru en dernier, qui est un système à 2 dimensions

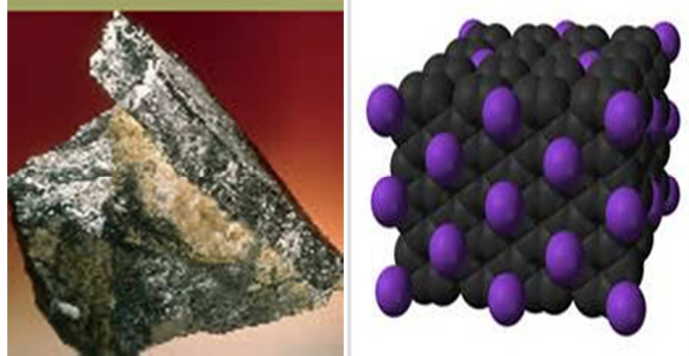
I.2.1. Le graphite :

Le graphite naturel est un minéral de carbone élémentaire de structure cristalline hexagonale, sa couleur va du gris au noir, il est tendre; flexible; luisant et d'éclat métallique. Bien qu'il soit trouvé sous forme moins pure que le charbon, celle-ci demeure la forme de carbone pur la plus stable à température ambiante et à pression atmosphérique.

Au-delà de sa structure dite lamellaire en forme de nid d'abeille; le graphite présente aussi des propriétés chimiques et physiques bien à lui; il demeure un excellent conducteur de chaleur et de température. ...c'est aussi une substance inerte qui résiste à toutes sortes d'attaques chimiques, et comme il possède un faible coefficient de friction à cause de ses atomes très peu liés et distants les uns des autres c'est alors un matériau tendre [1]

Il peut être trouvé sous plusieurs formes dans la nature :

- le graphite en paillettes
- le graphite de veine
- le graphite amorphe

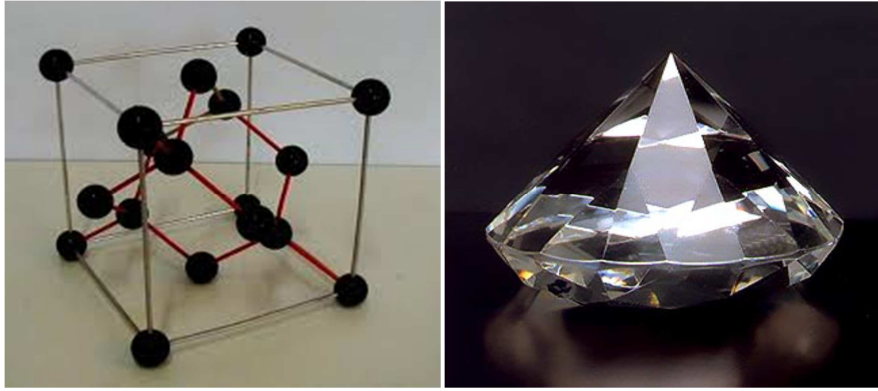


Figure(I-3) : le graphite dans la nature(à gauche) ; sa structure 3D (à droite).

I.2.2.Le diamant :

Le diamant tel qu'on le connaît est une pierre précieuse dont la composition est la plus simple, c'est un minéral composé de carbone il comporte parfois des traces d'azote et une très petite proportion d'autres éléments étrangers. C'est un assemblage d'atomes de carbone dans les trois directions de l'espace, ses liaisons atomiques sont très courtes d'où sa très grande dureté.

Cette forme de carbone est la plus stable à haute pression et température de tous les autres carbonés, il possède une structure cubique à faces centrées, chaque atome est lié par hybridation SP^3 , contrairement au cas du graphite tous les électrons sont impliqués dans les liaisons covalentes, donc le diamant est un isolant électrique, en revanche il demeure le meilleur conducteur de chaleur connu jusque-là, avec une conductivité thermique cinq fois supérieure à celle du cuivre..[1]



Figure(I-4) : structure du diamant (à gauche) ;Diamant dans la nature (à droite).

I.3. Nouvelles formes de carbones :

Vu les propriétés physiques et électriques hors normes que procurent les carbonés cités plus haut, la communauté scientifique à l'échelle mondiale ne cesse d'en exploiter pour l'industrie technologique et ainsi pousser leurs recherches en vue d'en obtenir de meilleures performances avec de nouveaux matériaux descendants du carbone de formes et propriétés souvent insoupçonnés et parmi les découvertes qui ont fait l'actualité de la fin du siècle dernier on y distingue :

I.3.1. Les fullerènes :

Ils furent découverts en 1985 par les trois chercheurs R. SMALLY ; R.CURL et H.KROTO, qui ont vu leurs travaux titrés du prix Nobel de chimie 1996. Le premier fullerène découvert comportait 12 pentagones et 20 hexagones avec un atome de carbone au sommet de chaque polygone et une liaison à chaque coté du polygone.

Ce sont des éléments de carbone composés qui prennent la forme d'une sphère, d'un ellipsoïde, d'un nanotube ou d'un anneau, les fullerènes sont similaires au graphite qui comporte des anneaux hexagonaux, heptagonaux, pentagonaux ce qui les empêchent d'être plats.

Un fullerène peut être vu telle une feuille de graphène enroulée sur elle-même lorsqu'on remplace quelques hexagones par des pentagones, formant ainsi une structure identique à un ballon de football..[3]



Figure (I-5) : (à gauche) poudre de fullerène C_{60} , (à droite) fullerène C_{60} comportant 20 hexagones et 12 pentagones.

I.3.2. Nanotube de carbone :

Un nanotube de carbone peut être vu tel une feuille de graphène enroulée comme un cigare formant ainsi un système à une dimension (1D), jusque là inimaginable suivant le célèbre théorème de MERMANN et de WAGNER dont la conclusion faite certainement à la hâte suppose qu'il n'existe pas de cristal à une ou deux dimensions à température non-nulle.

Découvert en 1991 par Sumioliijima alors qu'il observait par microscopie électronique à transmission à haute résolution les sous-produits, présents sous forme de suie, de fullerènes synthétisés par la méthode dite de l'arc électrique. Dans cette suie, il a clairement mis en évidence la présence de tubes constitués uniquement de carbone graphitique, de quelques nanomètres de diamètre. Ces « nano » tubes étaient en fait constitués de plusieurs tubes imbriqués les uns dans les autres. La communauté scientifique les a alors qualifiés de nanotubes multi-parois. [2]

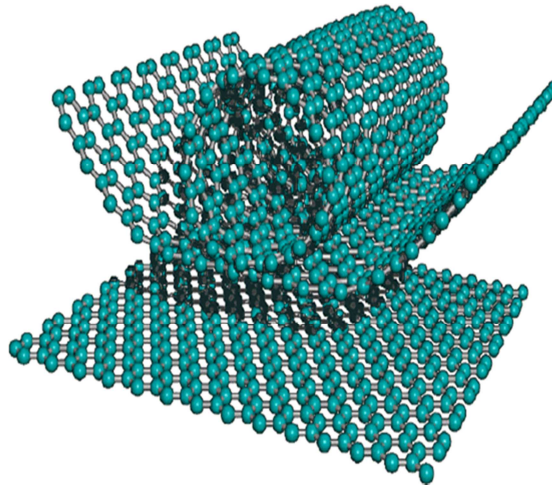
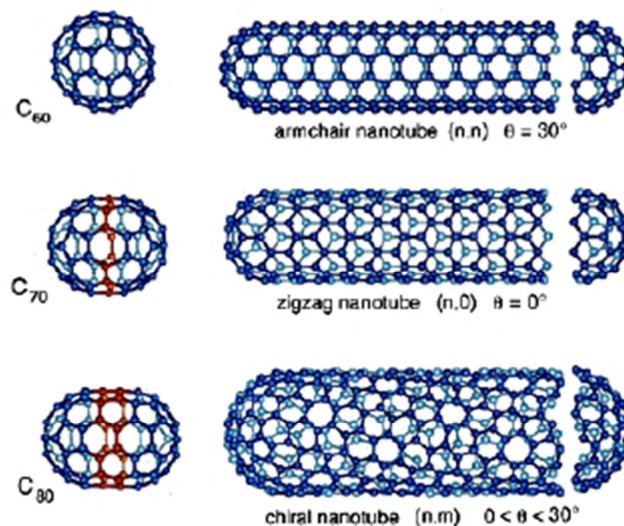


Figure (I-6) : Enroulement d'une feuille de graphène sur elle-même

En 1993, des nanotubes de carbone mono-paroi ont été synthétisés par la même méthode en ajoutant des catalyseurs métalliques dans les électrodes de carbone entre lesquelles se produit l'arc électrique.

Aujourd'hui, on distingue donc deux sortes de nanotubes : les nanotubes Mono-paroi et multi-parois. Les nanotubes mono-paroi sont constitués d'une seule paroi graphitique, alors que les nanotubes multi-parois sont constitués de plusieurs parois graphitiques.



Figure(I-7): représentation des trois types de tubes selon les différents fullerènes.

La figure ci-haut montre une autre manière de concevoir un nanotube qui consiste à considérer un fullerène que l'on allonge en y insérant toujours la même ceinture d'atome de manière à créer une paroi uniquement composée d'hexagones.

Toutes les caractéristiques des nanotubes découlent de la connaissance du couple (n, m) car c'est ceux-là qui définissent la géométrie du nanotube.

Le nanotube mono-feuillet peut-être modélisé par l'enroulement d'une feuille de graphène sur elle-même qui présente une structure en nid d'abeille avec deux vecteurs directeurs a_1 et a_2 qui vont définir un vecteur de chiralité C_h qui représente l'axe selon lequel la feuille de graphène s'enroule pour former le nanotube, ce vecteur peut donc être décomposé en deux composantes, selon les vecteurs a_1 et a_2 . Soient m et n , les scalaires tels que :

$$C_h = n a_1 + m a_2$$

Selon la valeur de ces deux scalaires, 3 types d'enroulement sont envisageable :

- Nanotube a une structure de type « zigzag » : $m=0$
- Nanotube a une structure de type « chaise » : $m=n$
- Nanotube de structure chirale pour tout autre cas

Grace à ces différences de chiralité (n,m) , un nanotube de carbone peut présenter de multiples propriétés notamment électrique car celui-ci peut être soit 'métallique' si $(2n+m)$ est un multiple de 3 si non il sera 'semi-conducteur'. [2]

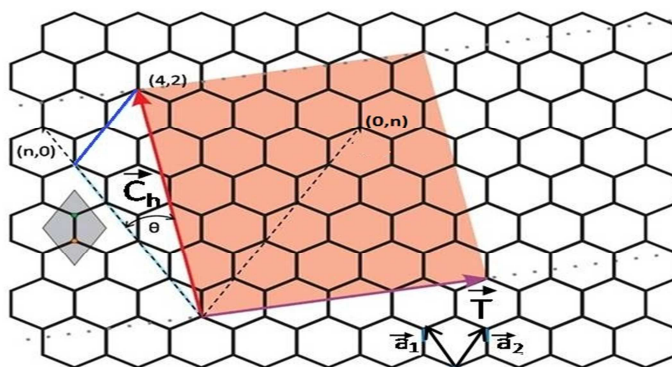


Figure I(-8): Définition de la chiralité (n, m) des nanotubes sur la base d'une feuille de graphène enroulée sur elle-même en reliant les deux extrémités du vecteur C_h , T est orienté le long de l'axe du tube, dont le module représente la plus petite maille.

I.4. Le graphène :

I.4.1. Définition du graphène :

Le graphène est le plus jeune élément de la famille graphitique descendant lui aussi du carbone, c'est un plan unique d'atomes de carbone disposés en nid d'abeille, bien que celui-ci ne soit pas découvert récemment il fut négligé pendant plusieurs décennies ; il a fallu donc l'avènement de l'année 2004 pour qu'une équipe de l'université de Manchester le remette à l'honneur, ce qui a valu le prix Nobel de physique de l'année 2010 aux deux chercheurs NOVOSELOV et GEIM qui au terme de leurs études ont pu isoler pour la première fois un système à deux dimensions et depuis les nombreuses propriétés uniques qu'il peut apporter à la technologie suscite une grande convoitise et si on pouvait le décrire en une seule phrase on dira alors que : *« c'est un cristal de carbone d'épaisseur atomique, conducteur, et dont les porteurs de charges se comportent comme des particules ultra-relativistes sans masse. »*[3]

C'est pour cela qu'on parle d'un gaz d'électron bidimensionnel qui a des électrons de masse effective nulle pouvant se déplacer toujours à la même vitesse imitant les particules ultra-relativistes comme les photons ou les neutrinos.

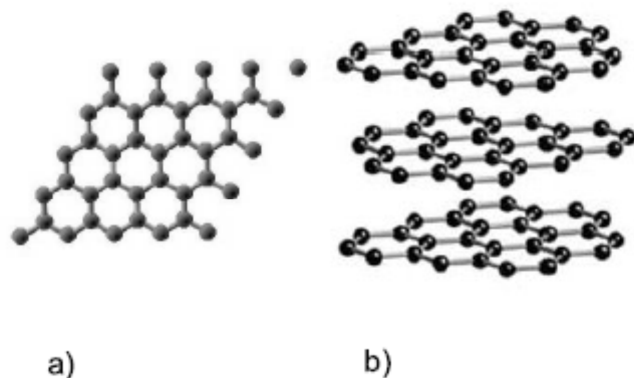
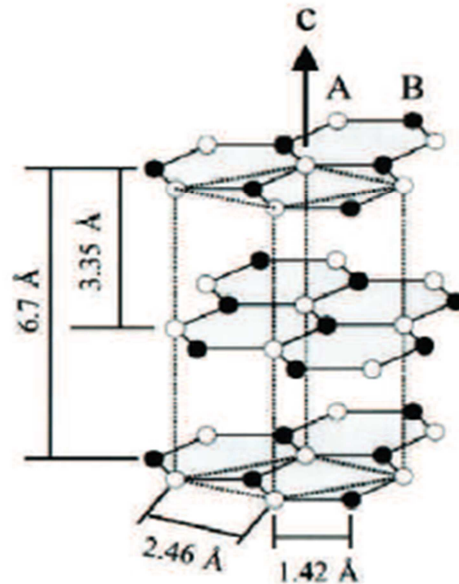


Figure I-9 :a) couche de graphène; b) empilement de trois couches de graphène(graphite).

I.4.2. Structure atomique :

Le graphène est constitué d'une cellule unitaire hexagonale avec deux atomes de carbone, la distance entre chaque deux atomes est de : 1.42 \AA , et la distance entre les plans est plus grande à cause des liaisons plus faibles, cette distance est de : $3,35 \text{ \AA}$



Figure(I-10): structure atomique d'un empilement de trois couches de graphène.

La structure cristalline du graphène qui réalise un pavage d'hexagone symbolisé par un disque soit bleu (atome de type A), soit jaune (atome de type B) et des traits qui représentent les liaisons covalentes entre les atomes de carbone.

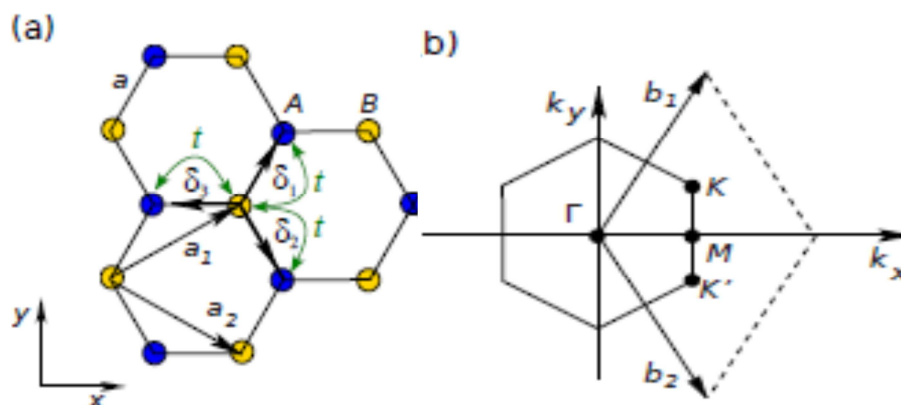


Figure I-11: a) structure en nid d'abeille du graphène ; b) zone de Brillouin du graphène.

- Les vecteurs de base du réseau de Bravais avec un motif de deux atomes A et B par maille élémentaire sont :

$$\mathbf{a1} = \frac{a}{2}(3, \sqrt{3}), \mathbf{a2} = \frac{a}{2}(3, -\sqrt{3})$$

- Les trois vecteurs $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ d'un atome B à ses plus proches voisins A sont :

$$\delta_1 = \frac{a}{2}(\sqrt{3}, 1); \delta_2 = \frac{a}{2}(-\sqrt{3}, 1); \delta_3 = \frac{a}{2}(0, 1)$$

- Le réseau réciproque défini par rapport au réseau triangulaire a pour vecteurs de bases :

$$\mathbf{b1} = \frac{2\pi}{3a}(\sqrt{3}, 1); \mathbf{b2} = \frac{2\pi}{3}(-\sqrt{3}, 1)$$

La première zone de BRILLOUIN présente en particulier deux points K et K' non-équivalents dit points de Dirac dont les coordonnées sont définies comme suit :

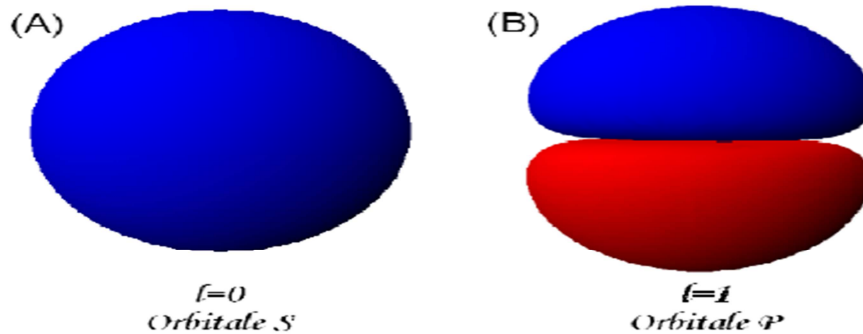
$$\mathbf{K} = \left(\frac{2\pi}{3a}, \frac{2\pi}{3a\sqrt{3}}\right), \quad \mathbf{K}' = \left(\frac{2\pi}{3a}, \frac{-2\pi}{3a\sqrt{3}}\right)$$

La cellule unitaire contient donc deux atomes de carbone et les vecteurs du réseau forment un angle de 120° ; ces atomes sont équivalents puisqu'ils ont le même nombre de voisins. Chaque atome est lié à trois autres atomes à travers les liaisons très fortes σ (chevauchement frontal) d'orbitales hybrides sp^2 de façon covalente, tandis qu'un chevauchement latéral dû aux orbitales p_z perpendiculaires au plan du graphène forment un angle responsable de la conduction électronique. [4]

I.4.3. Structure électronique :

I.4.3.1. Hybridation SP^2 ::

Six électrons tournent autour du noyau de chaque atome de carbone ; ces électrons occupent les positions $1S^2 2S^2 2P^2$. Les deux électrons qui occupent $1S$ sont les plus liés au noyau tandis que les 4 autres le sont moins, ils interviennent plus dans le cas de liaisons chimiques et autre, Les orbitales S et P sont représentés comme suit :



Figure(I-12): vues en perspectives des orbitales selon les différentes valeurs de m

A est sous forme sphérique et B prend la forme de 8.

L'orientation de l'électron dans l'orbital « p » n'est pas unique dans l'espace selon le nombre quantique « m » qui peut prendre trois valeurs de $m = [-1, 0, 1]$, On note que l'axe de ces trois orientations P_x, P_y, P_z dans l'espace :

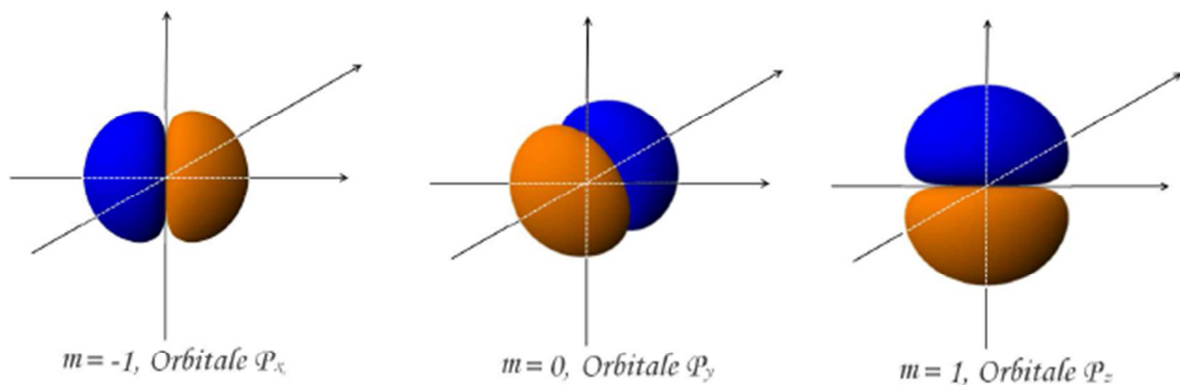


Figure (I-13): illustration de différentes formes d'orbitale d'électrons pour $n=2$.

Lorsque un atome de carbone est lié à un autre atome identique, il en résulte des orbitales hybrides, qui sont des combinaisons linéaires des fonctions d'onde initiales. il va également créer entre les atomes une liaison covalente notée .

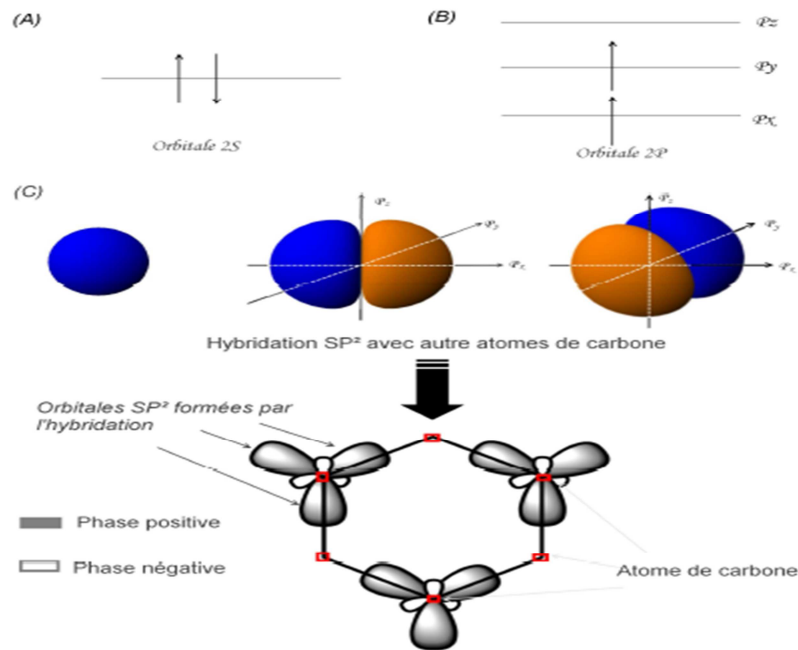


Figure (I-14) : (A) état de remplissage d'électron dans l'orbitale S, les flèches correspondent aux spins B) état de remplissage d'électrons de l'orbitale P, (C) illustration de l'hybridation de l'orbitale S avec les orbitales Px et Py.

L'hybridation des orbitales de deux atomes conduit à la formation de quatre autres orbitales sp^2 . Trois de ces orbitales sont disposées de façon trigonale dans le plan Px Py, formant entre elles un angle de 120° , la quatrième est orientée dans la direction de Pz perpendiculairement au plan Px Py. C'est avec ces nouvelles orbitales que les atomes de carbone forment des liaisons chimiques entre eux pour construire différents matériaux tels que les nanotubes de carbone, les fullerènes, et le graphène.

Lorsque deux atomes mettent en commun une paire d'électrons, pour former une liaison chimique alors une liaison covalente est créée, on y distingue deux types :

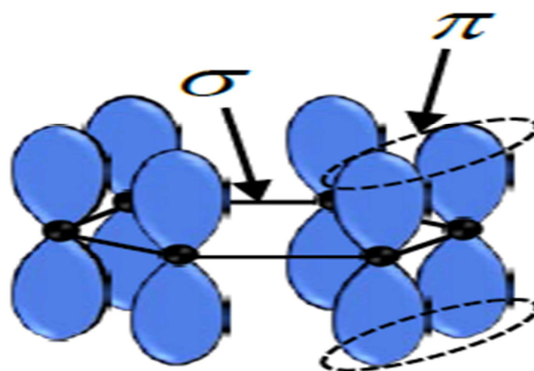


Figure (I-15) : diagramme schématisé des liaisons σ et des orbitales π .

- **Liaison σ :**

Une combinaison linéaire des trois orbitales de valence $2S, 2P_x, 2P_y$ va donner trois orbitales hybrides notées SP^2 pointant dans les trois directions du triangle équilatérale; la répartition des électrons dans ce type de liaison se fait de façon cylindrique, symétrique par rapport à l'axe de l'orbitale formée, la paire d'électron est rotationnelle autour de l'axe d'orbitale ; donc les orbitales des atomes se recouvrent de façon axiales autrement dit :

Les orbitales de deux atomes se superposent l'une sur l'autre formant ainsi une nouvelle orbitale qui garde le même axe qu'avant superposition; ce type de liaisons sont dites très forte ce qui procure une bonne stabilité au graphène; et chimiquement inerte car ces dernières sont aussi très énergétique ce qui les rend difficiles à dissocier [10]

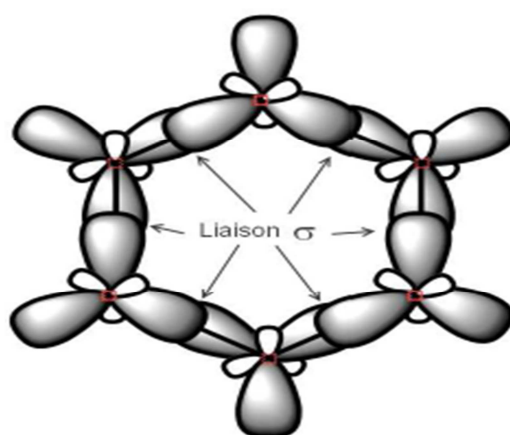


Figure I- 16 : illustration de la formation de liaison σ , l'orbitale d'un atome de carbone se recouvre de façon axiale avec celui de son voisin.

- **Liaison π :**

Ces liaisons seront obtenus du recouvrement partiel d'orbitales P_z de deux atomes de carbone, les électrons dans ce cas sont quasiment libre à cause de leur faible teneur énergétique lié au faible recouvrement des orbitales c'est pourquoi le graphène est un matériau de type gaz 2D naturel ce qui rend ainsi le transistor à base de graphène capable de fonctionner à haute fréquence [5]

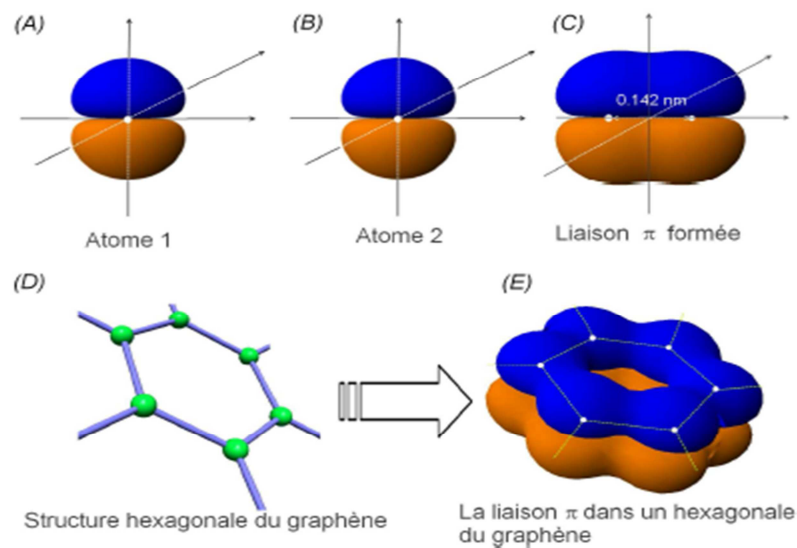


Figure (I-17): illustration de la formation de la liaison π (A),(B) ;et (C) entre deux atomes de carbone . (D) et (E) dans une structure hexagonale du graphène.

I.4.3.2. Structure de bandes d'énergies :

Le premier calcul de la structure des bandes a été mené par P.R. WALLACE en 1947 dans le cadre du modèle des liaisons fortes dans le but de décrire la structure de bande du graphite même si ce calcul a été affiné par la suite, il donne néanmoins accès aux propriétés électroniques du graphène

L'approche de cette méthode est que les électrons peuvent sauter d'un atome à ces trois proches voisins avec un coup énergétique $t \approx 3$ eV

WALLACE au cours de son étude a alors put monter que le graphène possède une bande de valence à énergie négative et une bande de conduction à énergie positive qui se

touche en des points particuliers K et K' de la zone de BRILLOUIN, autrement dit la bande interdite devant être entre la bande de conduction et la bande de valence est nulle ;le niveau de fermi se situe juste en ces point de contact à énergie nulle et c'est pour cette raison que le graphène est considéré d'une part comme semi-métal (*point de contact entre la bande de conduction et la bande de valence*) d'autre part comme semi-conducteur (*densité électronique nulle au niveau de FERMI*) d'où l'appellation : **«semi-conducteur à bande interdite nulle»** . [3]

De plus, on parle d'électrons ultra-relativistes sans masse en raison de la relation qui relie l'énergie E à leur impulsion p, dans le cas du graphène elle prend une forme tout autre que celle des autres solides,la fonction qui relie l'énergie E des électrons à leurs impulsion p s'écrit alors comme suit :

$$E = \mp \sqrt{(p^2 \times C'^2 + C'^2 \times m^2)} = \pm P \times C \dots \dots \dots (I-1)$$

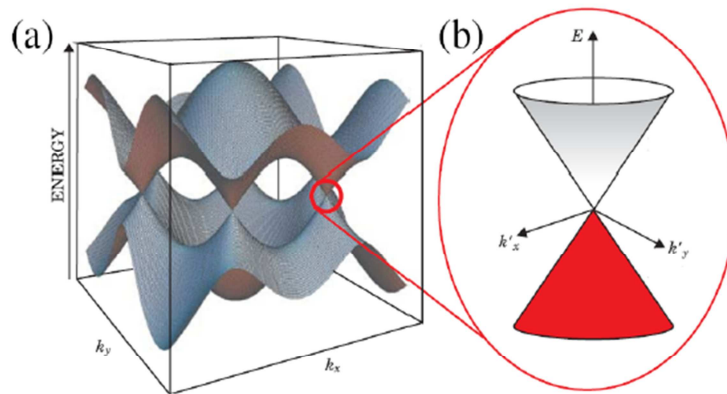
C' : vitesse de la lumière effective ou vitesse de fermi, différente de la célérité C=300 000 km/s

Avec une masse effective nulle m=0 et une Célérité effective $C' = \sqrt{\frac{3t}{2}} = 1000 \text{ km/s}$ inférieure de 300 fois à la vitesse de la lumière, elle est relié au pas du réseau a et à l'intégrale de saut t=3eV

Quant au +- il a une importance considérable dans cette relation, car en raison de l'absence de bande interdite, la bande de valence et la bande de conduction se touchent à énergie nulle, les électrons appartiennent donc aux deux bandes simultanément.

Les électrons dans ce cas n'obéissent plus à la loi dictée par Schrödinger mais celle de Dirac en les points K et K' la relation de dispersion n'est pas quadratique comme pour le silicium mais linéaire,l'énergie est proportionnelle au vecteur d'onde K

L'allure de la bande d'énergie du graphène stimulée par la méthode de liaison forte est donnée par la figure qui suit :



Figure(I-18) : structure de bande d'énergie du graphène, agrandissement de la structure de bande d'énergie aux voisinages de K et K'.

I.4.3.3 niveaux de Landau et effet Hall quantique :

Tout électron dans un plan de surface S est soumis à un champ magnétique B perpendiculaire au plan, en principe un électron soumis à une force magnétique de Lorentz prend une trajectoire circulaire, le rayon de cet orbite dépendrait de l'énergie de cet électron

La mécanique quantique lève cet arbitraire en imposant des valeurs discrètes à ce rayon comme c'est le cas pour les orbites fermées d'un électron autour du noyau d'un atome, de même que ces orbites cyclotron comme on les appelle donnent naissance à des énergies discrètes dites niveau de Landau qui peuvent abriter un grand nombre d'électrons qui est identique au flux magnétique total $B.S$ traversant l'échantillon occupant une surface, pour les électrons ayant une relation de dispersion parabolique les énergies des niveaux de Landau sont proportionnelles au champ magnétique.

Pour des fermions de Dirac de masse nulle, la relation de dispersion est linéaire et les niveaux de Landau varient comme la racine carrée du champ magnétique et de l'indice n du niveau. Ceci se traduit par une densité d'états montrant des pics qui ne sont pas équidistants, mais dont l'espacement varie comme la racine carrée de leur indice.

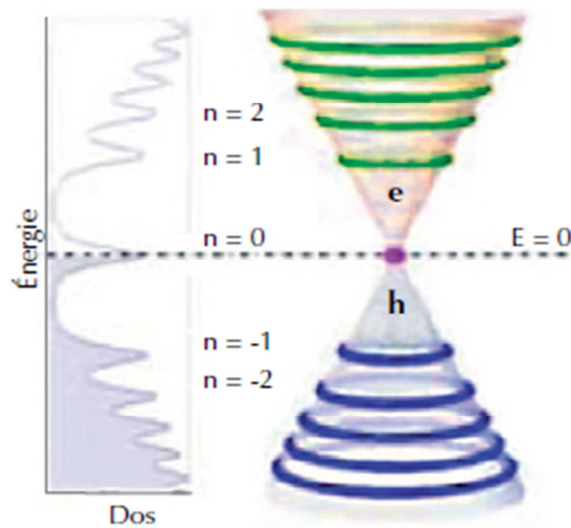


Figure (I. 19): à gauche niveaux de Landau du graphène apparaissant comme des pics, à droite sont représentés les orbitaux cyclotrons sur le cône de Dirac.

Quant à l'effet Hall quantique qui est une manifestation de l'existence de niveau de Landau, classiquement l'effet Hall survient lorsqu'on applique un champ magnétique perpendiculaire.

On détecte une accumulation de charge sur les bords latéraux de l'échantillon, en mesurant une tension de Hall fonction du rapport entre le champ magnétique B et le nombre N de porteurs de charges dans le système. Correctement normalisé, l'inverse de ce rapport donne le facteur de remplissage des bandes.

classiquement, la tension de Hall est proportionnelle à B , on mesure alors une droite qui passe par l'origine, à basse température et sous un fort champ magnétique ce n'est plus une droite qui apparaît mais un escalier on parle alors d'un effet quantique dans l'expérience de Hall, cet escalier reproduit en moyenne la droite observé en Hall classique [3].

II.1. Techniques de synthèse du graphène :

Afin d'obtenir les feuillets de graphène pour qu'il soit enfin utilisé dans l'industrie technologique notamment dans la fabrication de transistors à base de graphène, plusieurs méthodes de synthèse ont été mises à disposition des chercheurs dans le domaine.

II.1.1. synthèse de graphène par exfoliation mécanique :

Avant 2004 le graphène était considéré comme étant thermodynamiquement instable à température ambiante et il semblerait que le fait de le déposer sur un substrat casserait sa symétrie et le rendrai instable, malgré les nombreuses autres propriétés que celui-ci peut présenter, ce dernier fut longtemps négligé à cause de cette réputation qui le rendrai donc inutile pour la technologie.

Le graphite de nos mines de crayon consiste en des feuillets de graphène empilés et très faiblement liés entre eux; lorsqu'on fait glisser le crayon sur du papier, ces feuillets restent accrochés dessus et c'est sur ce principe que repose le travail du groupe de Manchester.

Effectivement afin d'isoler une feuille de graphène, cette équipe a mis en évidence l'astuce du scotch , ils ont remplacé la mine de crayon par une fine pastille de graphite et le papier par une sorte de scotch qu'ils ont replié sur la pastille ,après l'avoir déplier à nouveau la pastille s'est scindée en deux feuillets plus fins encore ; et la répétition de ce procédé leur a permis d'obtenir sur le ruban adhésif un empilement de feuillets de graphène qui seront par la suite déposé sur du silicium rendu isolant par un dépôt d'une fine couche d'oxyde.[4]

Les étapes suivis pour cette méthode sont décrites dans l'image ici-bas :

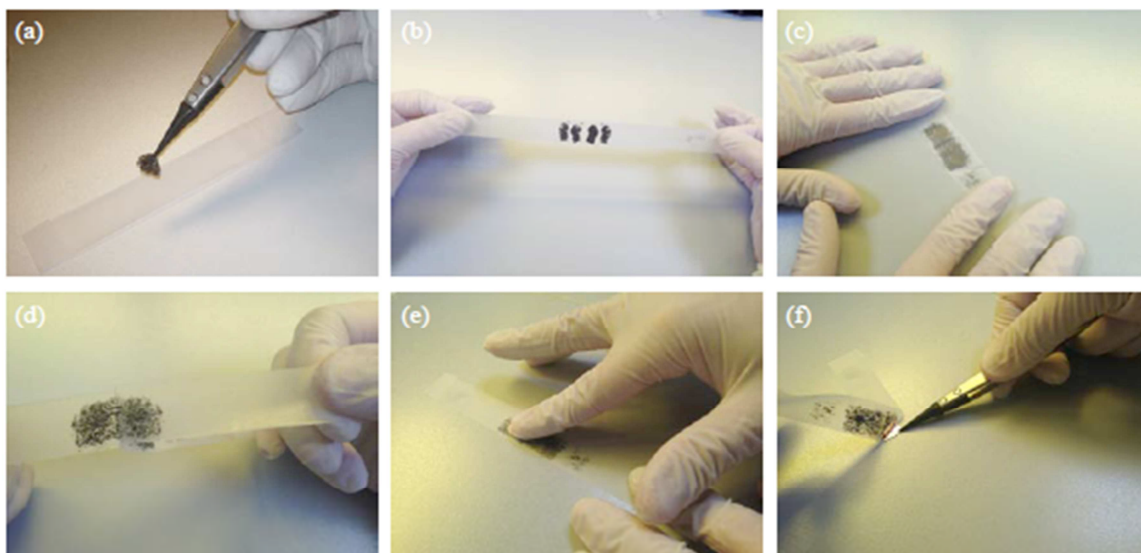


Figure (I-20): les différentes étapes d'exfoliation mécanique du graphène à partir du graphite.

Etape (a) : Du graphite est déposée sur une sorte de ruban adhésif.

Etape (b) : Le ruban est plié en deux puis déplié doucement.

Etape (c) : Un autre ruban adhésif est déposé sur le premier.

Etape (d) : Décoller lentement les deux morceaux et reproduire l'étape (c) et (d) jusqu'à observation de zones transparentes.

Etape (e) : Coller le ruban sur un substrat et masser dessus pendant quelques minutes.

Etape (f) : Enlever le ruban adhésif avec délicatesse.

Après avoir transféré des morceaux de graphite sur la plaque de silicium, il faut ensuite repérer au microscope électronique ces bouts de graphène et ainsi identifier le nombre de couches en profitant des différents indices optiques entre le graphène et le SiO₂.

Cette méthode est peut couteuse mais aussi très longue et permet d'obtenir du graphène très pure et c'est avec celle-ci qu'on arrive à avoir les meilleurs résultats surtout en terme de mobilité de porteurs.

L'inconvénient ici est que le nombre de couche n'est pas reproductible comme il est aussi difficile d'obtenir de grandes surfaces [4].

I.1.2. Synthèse par dépôt chimique en vapeur :

Du graphène peut être aussi obtenu par CVD (chimical vapor deposition) sur des films métalliques, à partir d'un hydrocarbure qu'on chauffe à des températures allant de 700 à 900°C sur une surface d'un métal; qui catalyse le craquage de la vapeur de l'hydrocarbure et obtient les atomes de carbone qui s'organisent de façon à avoir un cristal de graphène.

Les métaux les plus utilisés sont le cobalt (Co) [68], le nickel (Ni) [74-78], le platine (Pt) [69][79], l'iridium (Ir)[71][72], le ruthénium (Ru)[73], et le cuivre (Cu)[79] .

Les sources gazeuses utilisées pour ce dépôt sont des hydrocarbures. On utilise généralement le méthane, l'acétylène, ou l'éthylène. Ces sources gazeuses se décomposent ou réagissent dans certaines conditions avec la surface des métaux pour former des couches de graphène.

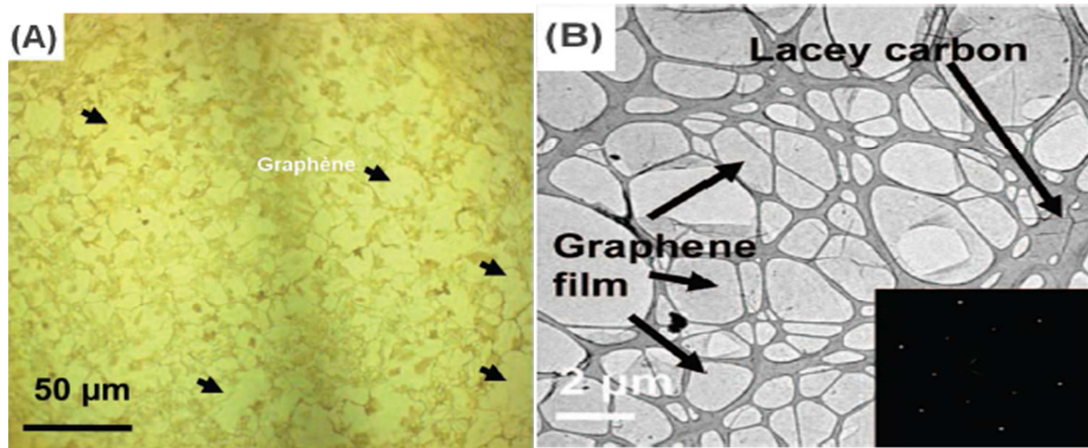


Figure (I-21): graphène synthétisé par la méthode CVD sur Ni . (A) image optique du graphène sur Ni , les flèches marquent des zones couvertes par graphène (B) image TEM du graphène sur Ni .

L'avantage de cette méthode est lié à son cout de fabrication relativement faible et sa reproductivité. La surface de graphène peut être très large par rapport à la technique d'exfoliation vue précédemment, En effet elle dépendrait de la dimension du film métallique. La température et la pression sont des éléments clés de la croissance.

Pour utiliser le graphène obtenu par cette méthode dans la fabrication de composants, une étape supplémentaire de report du graphène sur un substrat isolant est nécessaire

II.1.3 Synthèse par décomposition thermique du SiC :

La troisième méthode de synthèse du graphène consiste à chauffer la surface d'un substrat en carbure de silicium, le principe de cette méthode est de chauffer un substrat SiC dans un bâti sous ultra vide à une certaine température de manière à sublimer le silicium.

Du carbure de silicium est donc chauffé à plus de 1000°C, alors les atomes de silicium s'évaporent tandis que ceux du carbone s'arrange pour former une ou plusieurs feuillets de graphène très peu couplés au substrat (on parle ici de graphène épitaxié)

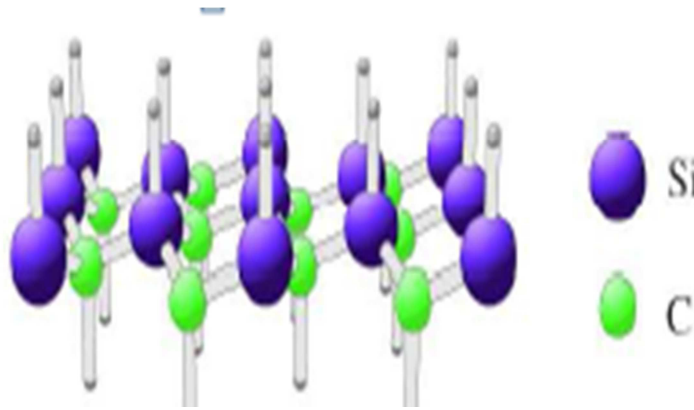


Figure (I-22): bicouche de carbure de silicium composé d'une couche d'atome de silicium et une autre couche d'atome de carbones intercalés.

Cette méthode permet d'avoir une ou plusieurs couches de graphène de manière contrôlée, et permet d'en avoir à grande échelle, Le graphène obtenu par cette méthode est plus homogène que celle obtenu en CVD, de plus ici il n'est pas nécessaire de transférer le graphène obtenu sur un autre substrat vu que le SiC lui-même est isolant.

L'inconvénient ici reste le cout, car le carbure de silicium reste cher ce qui rend la fabrication très couteuse.[8]

II.1.4. Ouverture de nanotubes de carbone :

Cette méthode est la plus spectaculaire, les nanotubes sont plongés dans un oxydant puissant en milieu acide, il se forme un ester puis un double composé carbonylé, les doubles liaisons carbone les plus proche sont alors affaiblit et donc sont également oxydés et de proche en proche, toutes les doubles liaisons s'affaiblissent et le nanotube s'ouvre, l'image suivante montre cela :

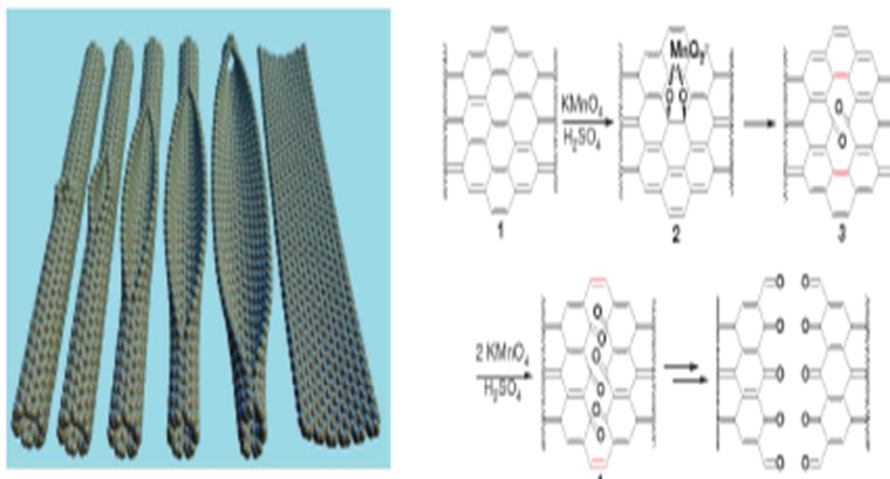


Figure (I-23): représentation de l'ouverture d'un nanotube de carbone mono-feuillet (à droite) mécanisme de l'ouverture d'un nanotube de carbone (à gauche).

Le graphène obtenu par cette méthode ne donne pas de bons résultats en terme de conductivité électrique à cause des groupes oxygénés observés dessus, et malgré qu'il soient réduit par un puissant réducteur la conductivité thermique est moindre que celle observée dans le graphène exfolié.

Cependant il présente une bonne mobilité de porteurs $1500\text{cm}^2 /(\text{V.s})$ et présente un intérêt majeur qui consiste à donner directement des nano rubans très fins sans passer par la lithographie.[12]

II.1.5. réduction d'oxyde du graphène :

Afin d'obtenir du graphène avec cette méthode une oxydation du graphite est nécessaire, Cette étape se fait en trempant des morceaux de graphite dans du nitrate de sodium mélangé à du permanganate de potassium et de l'acide sulfurique, L'oxydation du graphite brise la structure SP^2 et crée des défauts dans la structure ainsi la distance entre plan n'est plus $3,35 \text{ \AA}$ mais $6,8 \text{ \AA}$.

Le graphite oxydé est alors placé dans un solvant, ainsi ses plans se séparent en feuillets de graphène ainsi chaque plan serait alors composé de groupement acide sur les bords, des groupes hydroxyle et de composés carbonylés.

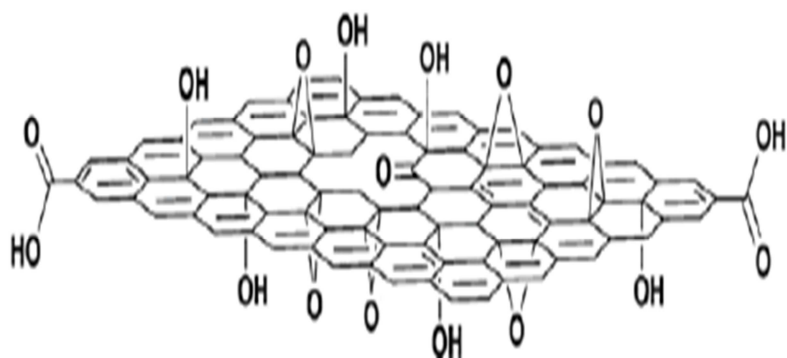


Figure (I-24): Modèle d'une feuille de graphène oxydé.

Une fois donc le graphite oxydé, les feuillets sont réduits dans une solution d'hydrazine on obtient alors des feuillets semblables à celui-ci :

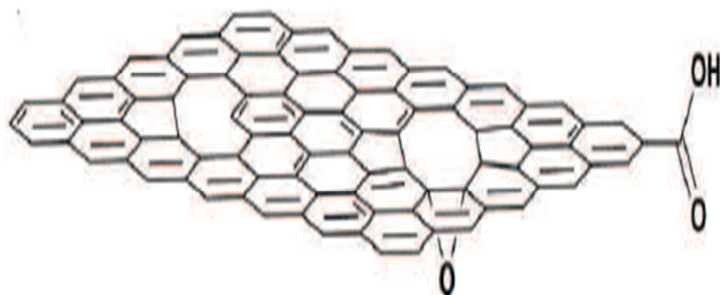


Figure (I-25): modèle d'un feuillet de graphène réduit.

Dans cette méthode certains groupements ne sont pas réduits notamment les groupements acides en bord de feuille ce qui rend le graphène obtenu peu exploitable car ses propriétés mécaniques sont perdues. [12]

II.1.6. Nombres de couches obtenus :

La littérature indique que les propriétés du graphène dépendent particulièrement du nombre de couches, la connaissance de cette caractéristique est donc importante pour la compréhension du fonctionnement de nos transistors, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour l'estimation du nombre de couches de graphène notamment la spectroscopie Raman et la microscopie électronique à transmission (TEM) qui se limitent lorsque le nombre de couches se voit augmenter, dépassé deux couches les spectres de TEM et Raman

sont fortement atténués , le graphène peut-être monocouche ,bicouche ou multicouches sans pour autant être du graphite.

III. Propriétés du graphène :

Les propriétés électronique exceptionnelles du graphène présentent un grand intérêt tant pour la recherche que pour beaucoup d'applications techniques et industrielle, ce qui répond donc aux exigences du marché visant à surmonter les défauts présents dans d'autre matériaux entre-autre le silicium; soulignons alors quelques-unes comme :

III.1.Sa haute mobilité :

la haute mobilité de ses électrons qui dépassent largement celle du silicium ; on obtient à température ambiante une mobilité 100 fois supérieur à celle du Si et du GaAS

Cette haute mobilité est due à un nombre réduit de diffuseurs, une grande force des liens chimiques et une très peu de défauts cristallins qui est une grande source de diffusion.

III.2.Propriétés de transparence optiques :

Le graphène présente une absorption de 2,3 % de la lumière reçu lié à ses propriétés électroniques originales ce qui permet son observation au microscope optique.

III.3.Propriétés de résistance mécanique :

Le graphène ne présentent pas seulement un intérêt pour que ses propriétés électroniques mais il est aussi exceptionnel d'un point de vu mécanique.

En effet des études ont montrés que ce matériau tant convoité dispose de propriétés mécanique dont sa stabilité lié au fortes liaisons covalentes entre les atomes de carbone (100 fois plus importante que celle de l'acier),en plus de cela il présente une grande flexibilité (élasticité égale à 0,5 terra-pascal) lui permettant de s'adapter à tous types de substrat notamment les souples .

III.4.Propriétés de conductivité thermique :

sa conductivité dépasse celle du diamant le meilleur conducteur thermique connu jusqu'aux études poussées du graphène, le contact avec un substrat altère cette conductivité mais d'après une étude paru en 2010 montre que lorsque une feuille de graphène exfolié est posé sur un substrat en silicium il garde tous de même une conductivité supérieur à celle du cuivre ce qui

constitue un atout majeur pour nombre d'applications ou la dissipation de chaleur pose problème.

IV. Applications possibles:

Les propriétés électroniques et exceptionnelles propres au graphène lui confère la convoitise des recherches dans divers domaines, effectivement ce matériau prometteur à différents types de systèmes d'application notamment l'aviation, le nucléaire ... car grâce à sa rigidité et sa faible résistivité, il est un excellent candidat pour la réalisation de systèmes électromécanique de taille nanométrique (NEMS) qui fleurissent dans l'électronique ces dernières années.

Le graphène s'avère aussi d'un grand intérêt pour l'électronique de spin puisque dans ce cas les électrons peuvent se déplacer pendant longtemps sans que leur spin soit modifié ce qui permet d'envisager de manipuler aisément les spins électroniques et des applications nombreuses dans le domaine de stockage et du traitement de l'information.

Grace aussi à sa conductivité thermique remarquable, Il présente une alternative importante pour des applications en électronique qui visent à réduire d'avantage les tailles et qui rencontre des problèmes de dissipation de chaleur.

Sa transparence confère elle aussi des avantages que tant d'autres matériaux ne possèdent pas pouvant trouver refuge dans des applications nécessitant des électrodes transparentes, écran plat tactile ,affichage à cristaux liquides ,cellule solaires

Ce qui suit montre des exemples d'application probables au graphène ; même si leur commercialisation n'est pas pour demain :

- **Les batteries :**

le rechargement de nos batteries constitue un réel problème jusque là sauf que voilà qu'en 2011 une équipe d'ingénieurs de l'université de Northwestern ont découvert que les anodes en graphène conservaient beaucoup mieux l'énergie que ceux en graphites ; puis par la suite une autre équipe de l'université de Rice ont constaté que le graphène mélangé à de l'oxyde de vanadium, qui peut servir à la création de batteries capables d'être rechargées en 20 secondes et conservent 90% de leur capacité même après 1000 cycles d'utilisation.

- **Smartphones :**

Grace à la flexibilité de ce matériau, le graphène sera un bon candidat pour remplacer le silicium et être le matériau principal de nos Smartphones de demain, on pourra ainsi avoir des objets mobiles incassables et des téléphones pouvant se plier et se tordre ainsi que leurs écrans tactiles.

- **Tissus vivants :**

Etant un matériau biocompatible, le graphène est capable d'interagir avec les systèmes biologiques d'après une étude menée par une équipe de Manchester, ce qui pourra porter l'internet des objets vers de plus lointains horizons.

Ici ce n'est pas le graphène lui-même qui fait le travail, mais les couches de phospholipides synthétiques entre lesquelles il est déposé ; ce qui montre sa capacité à se fondre entre des systèmes biologiques

Il est aussi possible d'introduire du graphène dans la technologie basée sur le silicium tel que le transistor à effet de champ ou il peut être utilisé comme canal de conduction dans le Gr FET , en 2010 des chercheurs de IBM ont mis au point un transistor à graphène pouvant être fonctionnel à 100GHZ alors que les performances maximales du transistor au silicium pour les mêmes dimensions est de 40GHZ .

VI. Conclusion :

Dans ce premier chapitre on a pu faire connaissance avec ce matériau aux qualités unique en montrant sa structure atomique et électronique ainsi que ses différentes propriétés qui ouvrent un vaste champs d'applications pour la technologie grand publique de demain.

A l'heure actuelle, les trois principales méthodes de synthèse sont le graphène exfolié, le graphène sur SiC et le graphène sur métal. Le graphène exfolié permet d'avoir du graphène extrêmement pur et donc de vérifier expérimentalement les propriétés exceptionnelles du graphène. Le graphène sur SiC et le graphène sur métal ouvrent la voie à une électronique carbone grâce aux grandes surfaces de graphène obtenu. [12]

Etude du graphène
Et régimes de
transport

Introduction

Le graphène présenterai donc des propriétés très prometteuses pour la micro-électronique de demain, conducteur sous sa forme naturelle, il est toutes fois nécessaire de le transformer en semi-conducteur en vu de la réalisation de transistors.

Notre chapitre se reposera donc sur les méthodes possibles d'ouvrir une bande interdite dans le graphène le rendant ainsi semi-conducteur puis voir ses différents régimes de transport auxquels s'intéresseraient les chercheurs afin de prouver l'utilité de ce matériau à la technologie de demain, en décrivant la réponse des électrons interagissant à la fois avec le réseau cristallin et avec eux-mêmes lors de l'application d'un champ électrique, magnétique ou même thermique.

I. Ouverture d'une bande interdite dans le graphène :

Le graphène, tel qu'on l'a décrit précédemment est un semi-conducteur à bande interdite nulle, peut être pris d'une part pour un « semi-métal » et d'autre part pour un « semi-conducteur », ainsi afin de mettre à profit les propriétés exceptionnelles de ce matériau une bande interdite doit être générée ; alors le graphène pourrait potentiellement remplacer le silicium dans les dispositifs électroniques.

Effectivement puisque les applications électroniques requièrent l'utilisation de semi-conducteurs, différentes solutions sont possibles pour ouvrir un gap dans le graphène, car cette bande interdite va permettre de séparer l'état bloqué de l'état passant d'un transistor.

I.1. Nano ruban de graphène :

La bande interdite dans les nano-ruban de graphène est fonction de sa largeur, en fait par confinement latérale, il se crée par quantification d'énergie dans le ruban de graphène, la difficulté technologique est de descendre à de très faibles largeur du ruban afin d'avoir une bande interdite conséquente, la lithographie électronique qui consiste à écrire directement sur la résine permet d'atteindre des largeurs de ruban de 10 nm qui peut donner une bande interdite satisfaisante [5].

Chapitre II : Etude du graphène et régimes de transport

Sachant qu'une feuille de graphène n'est pas un plan infini mais limité par des bords, le fait de la couper alors en deux reprises suivant la même direction donne alors naissance à des structures appelées nano-ruban de graphène (GNR : Graphene Nano-ruban), selon les bords de la feuille de graphène on peut construire deux types de rubans soit arm chair ou bien zigzag

- ZGNR : pour des nano-rubans construit selon des bords zigzag
- AGNR : pour des nano-rubans construit selon des bords arm chair

Les deux types peuvent évidemment être mélangé conduisant à des nano-rubans de type chiral mais dans ce cas-ci les mailles cristallographiques obtenues sont complexes et ne font donc pas l'objet d'études approfondies.

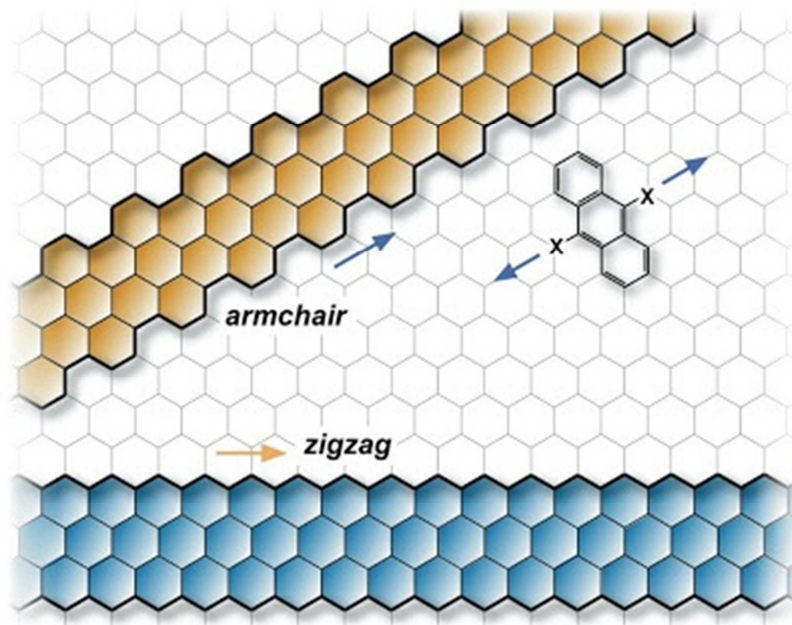


Figure II.1: représentation de nano ruban arm chair (en marron) et zigzag (en bleu)

I.2. Bicouche de graphène :

Les nano rubans ne sont pas l'unique solution afin de générer une bande interdite dans le graphène, il est donc possible d'y parvenir aussi par dopage électrostatique du graphène en empilement AB (graphène bicouche), en appliquant un champ électrique sur le film de graphène où le principe est de casser la symétrie du biplan car les atomes A et B ne sont plus équivalents comme le montre la figure suivante :

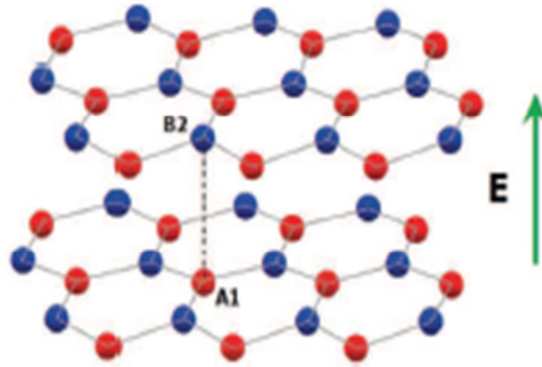


Figure II.2: application d'un champ électrique sur un biplan de graphène

A l'issue de cette expérience une différence de potentiel est observée entre les deux feuillets de graphène, ainsi la bande interdite est générée, pour se faire il suffit de fabriquer des transistors avec grille avant, grille arrière

Cette technique est simple à mettre en place pour le graphène exfolié et le CVD mais plus compliquée pour du graphène obtenu sur SiC car ce dernier nécessite une polarisation plus élevée puisque tous le substrat est isolant [6].

I.3. graphène sur SiC :

Il est démontré par des études que ce type de graphène présente naturellement une bande interdite grâce au substrat SiC, en effet la rupture de symétrie entre la feuille de graphène et le substrat donne naissance à une bande interdite qui varie selon le nombre de couches de graphène, un gap de 0,26 eV est mesuré pour du graphène monocouche, cette bande interdite s'annule lorsque le nombre de couches dépasse les quatre

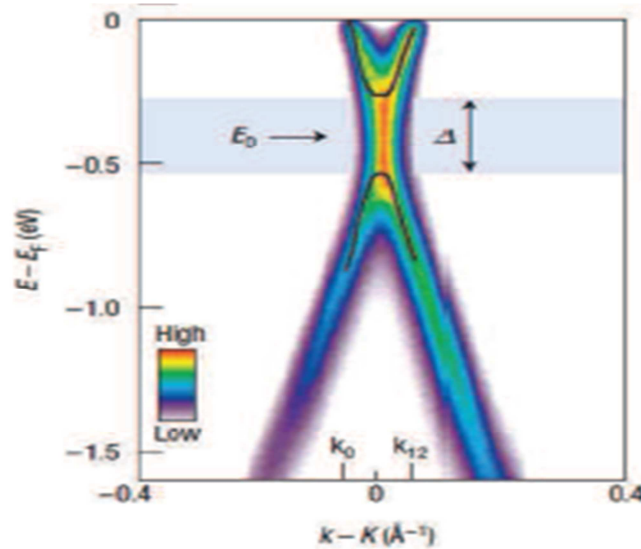


Figure II.3: cliché ERPES pris près du point de Dirac K

Les traits noirs sur la figure indiquent une relation de dispersion parabolique au point K et une bande interdite ouverte [6].

I.4. Dopage du graphène :

Une autre façon d'y arriver est de fonctionnaliser la couche de graphène en greffant aux atomes de carbone de la couche des atomes d'hydrogène, d'oxygène ou de fluor. Plusieurs études révèlent que l'hydrogénation du graphène permet l'ouverture d'une bande Interdite.

Par exemple une hydrogénation totale du graphène montre un comportement de type semi-conducteur grand gap . Une demi-hydrogénation de graphène ouvre une bande interdite de 0,43 eV; Comme il est aussi possible de doper le graphène avec des atomes comme l'azote ou le bore .

jusque-là il n'existait pas de méthode qui puisse éviter de causer de dommages pour la feuille de graphène, des chercheurs ont alors proposé une technique dite « non-destructrice », car celle-ci repose sur des espèces à faible énergie cinétique par l'utilisation de l'écoulement post-décharge de plasma à pression réduite et peut s'effectuer à faibles puissance, comme elle est aussi compatible avec les pratiques existantes déjà dans l'industrie.

Chapitre II : Etude du graphène et régimes de transport

Une fois cette bande interdite générée les propriétés de ce matériau peuvent donner suite à une longue liste d'applications, le graphène dopé peut-être par exemple utilisé dans des supraconducteurs ; des transistors à effet de champ

Afin de comprendre d'avantage sur ce matériau deux dimensions à la structure électronique inhabituelle, une étude comparative des régimes de transports classique et du transport dans le graphène est donc nécessaire :

II. Régimes de transport :

Dans les matériaux conducteurs macroscopiques, on assiste à une obéissance de la loi d'ohm, cependant dans les systèmes bis- dimensionnels il s'avère que ça ne soit pas le cas, et la conductance s'écrirait alors ainsi :

$$G = \sigma \frac{w}{L} \dots\dots\dots \text{Eq (II.1)}$$

Où la conductivité est donnée comme suit :

$$\sigma = \mu n e \dots\dots\dots \text{Eq (II.2)}$$

μ : la mobilité

n : la densité de porteurs du système

La mobilité est directement proportionnelle au temps de collision

Dans le cas des systèmes où une ou plusieurs dimensions sont inférieures aux longueurs caractéristiques de transport, la loi d'ohm est inopérante car si la distance séparant deux chocs devient supérieure à la distance séparant les contacts de mesures, le transport devient alors balistique.[11]

II.1. longueurs caractéristiques :

Selon le mécanisme de diffusion deux types de collisions sont distinguées : la collision élastique qui va affecter uniquement le sens ou la direction de l'impulsion de l'électron sans toucher à son énergie et la collision inélastique qui va non seulement affecter la phase de l'électron mais aussi la norme d'impulsion on peut alors y associer deux temps moyens :

Chapitre II : Etude du graphène et régimes de transport

Le temps de relaxation de l'impulsion τ_e :

C'est la durée moyenne pendant laquelle un électron va conserver son impulsion, le libre parcours moyen est donné comme suit :

$$l_e = v_F \tau_e \dots\dots\dots \text{Eq (II.3)}$$

v_F : la vitesse de Fermi

Le temps de relaxation de phase τ_ϕ :

C'est la durée pendant laquelle un électron va conserver sa phase

. Pour $\tau_\phi < \tau_e$: les électrons conservent leur impulsion plus longtemps que leur phase et la vitesse caractéristique est la vitesse de Fermi alors :

$$l_\phi = v_F \tau_\phi \dots\dots\dots \text{Eq (II.4)}$$

. pour $\tau_\phi > \tau_e$: le transport est diffusif dans une région où la phase reste cohérente, dans ce cas on fait appel au coefficient d'Einstein :

$$D = v_F^2 \tau_\phi \dots\dots \text{Eq (II.5)}$$

La distance moyenne parcourue sera alors :

$$l_{\phi=D}^2 = D \tau_\phi \dots\dots\dots \text{Eq (II.6)}$$

II.2. transport classique :

Pour que le régime classique de conduction électronique soit appliqué, deux conditions doivent subsister, il faut que $\tau_\phi < \tau_e$ et que $l_e \ll L$ ce qui voudrait dire que les électrons sont incohérents et subissent un nombre important de collisions en traversant le système et la loi d'ohm peut être alors appliquée, les électrons sont décrites par des ondes de Bloch de vecteur d'onde \mathbf{k} .

La vitesse de groupe est alors donnée de la manière suivante :

$$V(\mathbf{k}) = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E}{\partial \mathbf{k}} = \frac{\hbar \mathbf{k}}{m^*} \dots\dots\dots \text{Eq (II.7)}$$

Où : m^* : est la masse effective de l'électron dans le cristal, différente de la masse réelle de l'électron m_e

Chapitre II : Etude du graphène et régimes de transport

La dynamique des électrons est alors décrite par la loi de mouvement :

$$\sum \vec{F} = m^* \vec{a} \dots \dots \dots \text{Eq (II.8)}$$

À l'équilibre :

en soumettant les électrons à la force de ce champ ainsi qu'à une autre force de frottement liée aux collisions entre eux, elle est alors donnée comme suit :

$$m^* \vec{a} = -\frac{m \vec{v}_d}{\tau} - e \vec{E} \dots \dots \dots \text{Eq (II.9)}$$

τ : temps entre deux collisions

En régime stationnaire :

La vitesse de dérive des électrons est donnée comme suit :

$$\vec{v}_d = -\frac{e \tau \vec{E}}{m} = \mu \vec{E} \dots \dots \dots \text{Eq (II.10)}$$

μ : Donne une mesure directe du temps de relaxation lié aux défauts et impuretés

Le modèle de Boltzmann décrit l'évolution de la répartition énergétique soumise à une force extérieure. Ainsi à l'équilibre thermodynamique les électrons obéissent à la statistique de Fermi-Dirac :

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_f}{kT}}} \dots \dots \dots \text{Eq (II.11)}$$

T : température

K_B : constante de Boltzmann

Afin de déterminer la distribution énergétique des électrons sous un l'influence d'un champ électrique, l'équation de Boltzmann doit être résolu :

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{1}{\hbar} \vec{F} \frac{\partial f}{\partial \vec{k}} + \vec{v}(\vec{k}) \frac{df}{d\vec{r}} \dots \dots \dots \text{Eq (II.12)}$$

II. 3. Transport balistique :

Un conducteur balistique est un conducteur où aucun phénomène de diffusion ne se produit; dans ce cas le libre parcours moyen de l'électron est supérieur à la largeur L ;

Pour calculer le courant circulant dans un conducteur mésoscopique on peut commencer par le calcul le courant d'un seul mode transverse j :

$$I_j = \frac{e}{L} \sum_k v f_j^+ (E_j) = \frac{e}{Lh} \sum_k \frac{\partial E}{\partial k} f_j^+ (E_j) \dots \dots \dots \text{Eq(II. 13)}$$

Le courant pour plusieurs sous-bandes :

$$I = \sum_j \int_{E_j}^{+\infty} f^+ (E_j) dE_j = \frac{2e}{h} \int_{-\infty}^{+\infty} f^+ (E) M(E) dE \dots \dots \dots \text{Eq(II.14)}$$

La résistance de contact est calculée comme suit :

$$I = \frac{2e^2}{h} M \frac{\mu_1 - \mu_2}{e} \Rightarrow G_c = \frac{2e^2}{h} M \dots \dots \dots \text{Eq (II.15)}$$

Avec μ_1, μ_2 différence de potentiel

II.4. Transport dans le graphène :

Le graphène à son état pur est un système très exposé aux perturbations extérieures car celui-ci n'est pas dans une matrice tri- dimensionnelle comme les autre gaz bi- dimensionnels, son désordre est donc inévitable.

II.4.1. Transport dans le graphène intrinsèque :

Comme le graphène n'a pas a une bande interdite dite "nulle", son réseau hexagonal d'atomes de carbone obéit à une relation de dispersion linéaire.

A l'état intrinsèque, il ne possède donc pas de porteurs libres; habituellement la conductance d'un métal est nulle lorsque la densité de porteur devient nulle, ce n'est pas le cas des porteurs de Dirac présent dans le graphène, si on considère un échantillon de graphène sans désordre, relié à deux contacts de graphène dopé au potentiel V , des études montrent que la résolution de l'équation de Dirac donne la transmission aux points de neutralités, qui est due à l'effet tunnel des ondes évanescentes comme suit :

Chapitre II : Etude du graphène et régimes de transport

$$T_n = \frac{1}{\cosh 2\left[\pi\left(n+\frac{1}{2}\right)\frac{L}{W}\right]} \dots\dots \text{Eq (II.16)}$$

L,W: respectivement longueur et largeur de l'échantillon

Ce résultat contraste avec les électrons non relativistes pour lesquels la probabilité de transmission pour une bande n donnée est inversement proportionnelle à la hauteur la barrière de potentiel :

$$T_n \sim 1/v \dots\dots\dots \text{Eq (II.17)}$$

La conductance G pour un nombre important de modes propagateurs est alors donnée comme suit :

$$G = G_0 \sum_n T_n = \frac{W}{L} \frac{4e^2}{\pi h} \dots\dots\dots \text{Eq (II.18)}$$

II.4.2 transport dans le graphène désordonné :

Les impuretés et perturbations extérieurs influent considérablement sur les propriétés de transport dans le graphène.

II.4.2.1 Transport à haute densité de porteurs :

Dans un système homogène, il a été démontré que l'approche classique de Boltzmann pouvait être appliquée, soit pour $n \gg n_i$ où \mathbf{n} est la densité de charge et n_i la densité d'impuretés.

La conductivité fonction du temps de diffusion est alors donnée comme suit :

$$\sigma = \frac{e^2}{2} \int \left(-\frac{\partial f}{\partial E}\right) \text{DoS}(E) v_F^2 \tau E dE \dots\dots \text{Eq(II. 19)}$$

DoS : densité d'état et $f(E)$: fonction de fermi Dirac

Le temps de diffusion peut être calculé en utilisant la règle d'or de Fermi :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{n_{imp}}{\pi h^4} \int d\vec{k}' |V(\mathbf{q})|^2 (1 - \vec{k} \cdot \vec{k}') F_{\vec{k}\vec{k}'} \partial(E(\vec{k}) - E(\vec{k}')) \dots \text{Eq (II.20)}$$

\mathbf{q} : l'impulsion inchangée et $q = |\vec{k} - \vec{k}'|$

$V(\mathbf{q})$: transformé de Fourier du potentiel d'impuretés

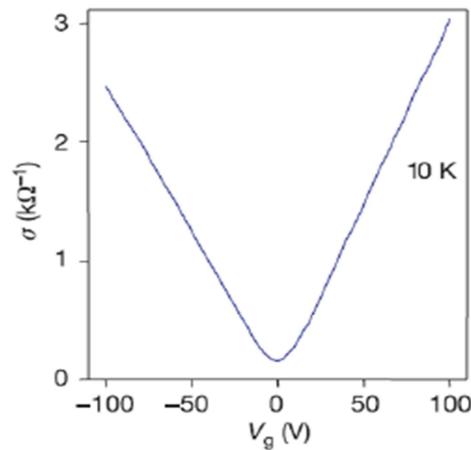


Figure II.4 : la conductivité en fonction de la tension de grille V_g

Lorsque le désordre est à grande portée où les impuretés sont chargées, la conductance varie linéairement avec la variation de la densité de charge comme le montre la figure ; la transformé de Fourier $V(q)$ est alors :

$$V(q) = \frac{2\pi e^2}{(\kappa q \epsilon(q))} \dots\dots\dots \text{Eq (II .21)}$$

$\epsilon(q)$: la fonction diélectrique du graphène

II.4.2.2 Transport à faible densité de porteurs :

A faible densité de porteurs, la présence d'impuretés chargées influent sur le potentiel électrostatique local, en appliquant une tension de grille près des points de neutralités, on observera alors des îlots d'environ 30nm contenant exclusivement soit des électrons, soit des trous

Pour $n_i \geq n$: le transport est dominé par les effets liés à la présence de ces îlots, Des expériences utilisant un transistor à électron unique ont permis d'effectuer une cartographie de la densité de porteur locale au voisinage du point de neutralité de charge, la densité de porteurs déduite au point de neutralité sous l'effet Hall est alors :

$$n = 2.3 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$$

Chapitre II : Etude du graphène et régimes de transport

Grâce à la présence de ces îlots, il a été aussi confirmé qu'à faible densité de porteurs la résistance de Hall $R_{xy}(B)$ devient presque nulle alors que la résistance longitudinale $R_{xx}(B)$ augmente

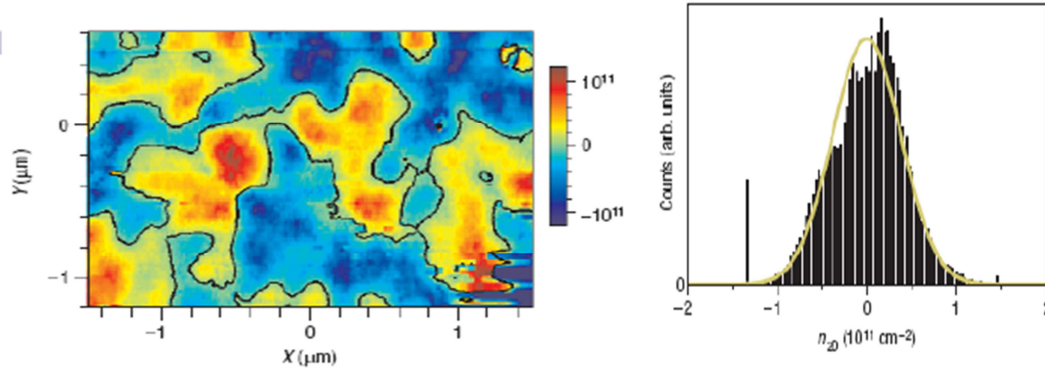


Figure II.5 : (à gauche) densité locale de charge mettant en évidence les îlots des électrons (régions en rouge) et trous (régions en bleu) , (à droite) histogramme représentant la distribution de densité

II.5. nano ruban balistique :

Sans désordre quelconque les nano rubans en graphène présenterai un transport balistique.

$M(E)$ le nombre de modes de transverses impliqués dans le transport d'énergie doit être démontré afin de pouvoir calculer la conductance du système. à énergie nulle; un nano ruban de type arm chair ne possède aucune sous bande conductrice, il présenterai donc une conductance nulle, et en s'éloignant du niveau de Fermi de nouvelles bandes sont impliquées dans le transport ainsi on s'éloigne aussi de l'énergie nulle ; à chaque fois qu'une bande est impliquée dans le processus de conduction G_0 augmente[11]

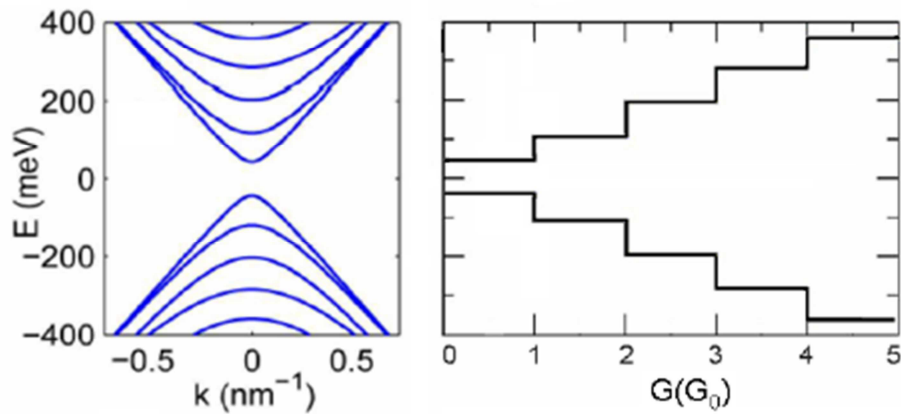


Figure II.6 : (à gauche) structure de bande 1D pour un nano ruban de type arm chair (N=90) et (à droite) conductance théorique en fonction de l'énergie de Fermi

Cette figure montre que pour les nano rubans métalliques l'absence de gap impose une conductance G_0 qui va évoluer par palier par la suite exactement comme dans un semi-conducteur.

Pour les ZGNR la conductance est égale à $2 G_0$ car celui-ci possède deux sous bandes non-dispersives, cette conductance tombe à G_0 si le niveau de Fermi est modifié.

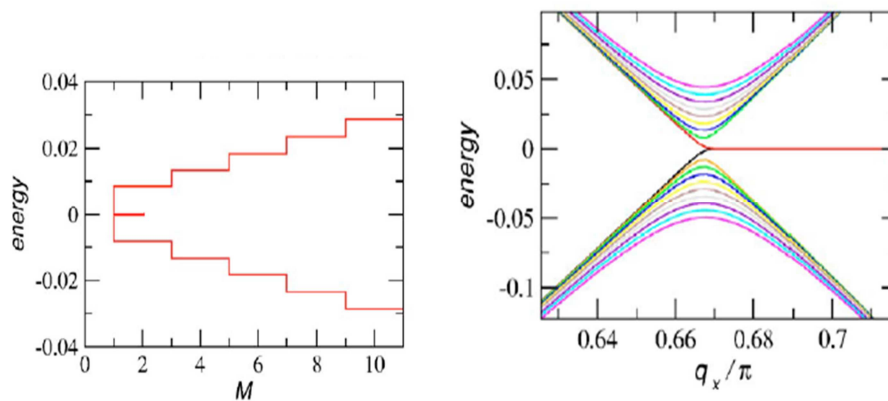


Figure II.7: structure de bande 1D pour un nano ruban zigzag et conductance théorique en fonction de l'énergie de Fermi

Quand le niveau de fermi s'éloigne de l'énergie 0, d'autres bandes sont impliquées ici aussi dans le processus de conduction, la dégénérescence de vallées n'étant pas levée la conduction augmente par palier de $2G_0$

$$G = \frac{2(2n + 1)}{h} = 1, 3, 5, \dots G_0 \dots \dots \text{Eq(II. 22)}$$

Chapitre II : Etude du graphène et régimes de transport

Les effets de la température sont pris en compte dans le calcul de la conductance en introduisant la distribution de Fermi-Dirac.

$$G(T) = \frac{2e^2}{h} \int M(E) \frac{\partial f(E - E_f)}{\partial E} dE \dots \dots \dots \text{Eq(II. 23)}$$

A faible température (T=5K) l'énergie séparant deux bandes consécutives est bien plus grande que l'énergie thermique d'activation $k_B T = 0.4meV$, en augmentant la température(T=20K) ,les deux énergies deviennent comparables, la conductance ne montre alors plus de paliers d'escaliers bien marqués mais des transitions plus douces.

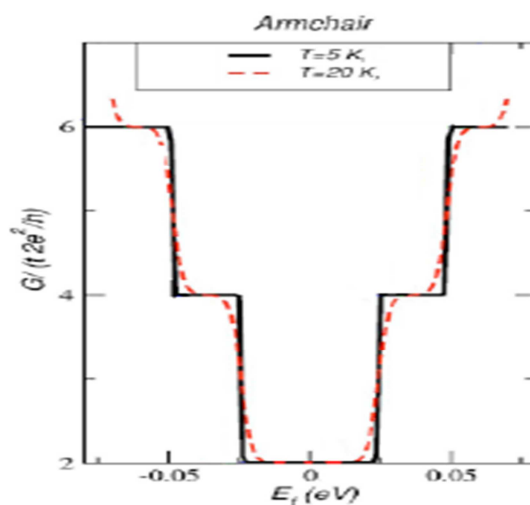


Figure II.8: Conductance (G) pour un ruban arm chair en fonction de l'énergie de fermi E_f

II.5.1. Nano ruban désordonné :

Plusieurs désordres peuvent survenir dans un nano ruban dont le désordre ponctuel, désordre longue portée et enfin un désordre qui lui est propre qui est le désordre des bords :

II.5 .1 .1. Désordre courte portée :

Les effets du désordre de courte portée sur la conductance sont calculés en utilisant le modèle d'impureté de type Anderson. Ce désordre est introduit comme une fluctuation aléatoire de l'énergie d'un site atomique dans l'Hamiltonien liaisons fortes. L'énergie d'un site ε passe alors de 0 à $\delta\varepsilon$ avec $\delta\varepsilon \in [-W\gamma_0/2, W\gamma_0/2]$

Le paramètre W définit donc la force du désordre..

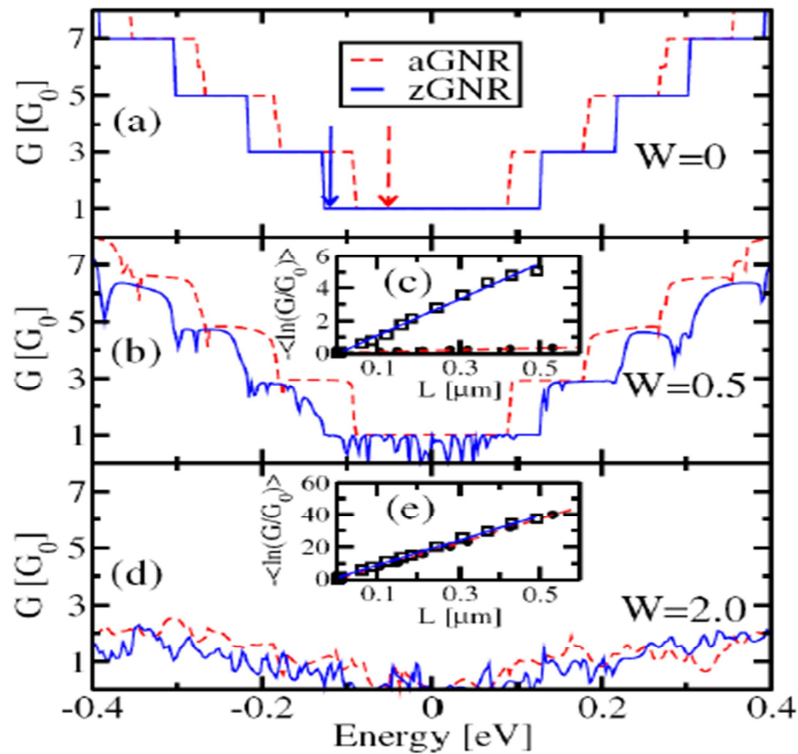


Figure II.9: Conductance pour un nano ruban de type zigzag idéal (ligne bleue) et arm chair (ligne rouge pointillés) de largeur 20 nm. Conductance pour une configuration de désordre pour un ruban zigzag (ligne bleue) et arm chair (ligne rouge pointillés) pour $W = 0.5$. (c) Conductance moyennée sur 400 configurations de désordre en fonction de la longueur L du nano ruban. (d) et (e) même informations que en (b) et (c) avec $W = 2$

La figure montre que pour un désordre faible, il apparaît que la conductance du ZGNR est bien plus affectée que celle de l'AGNR.

Lorsque $L > \xi$:

Le système entre dans un régime de localisation forte pour lequel la conductance décroît exponentiellement avec la longueur du système :

$$G = G_0 e^{-L/\xi} \dots \dots \dots \text{Eq(II. 24)}$$

II.5.1.2. désordre longue portée :

Des particules chargées peuvent être piégées dans l'oxyde sur lequel est déposé l'échantillon. Ces particules chargées induisent un potentiel électrostatique de longue portée, qui peut être approximé par une Gaussienne d'extension spatiale d :

$$\mathcal{E} = \sum_{r_0} V_0 \exp(-|r_i - r_0|^2/d^2) \dots \dots \dots \text{Eq (II.25)}$$

V_0 : l'amplitude

r_0 : la position de l'impureté

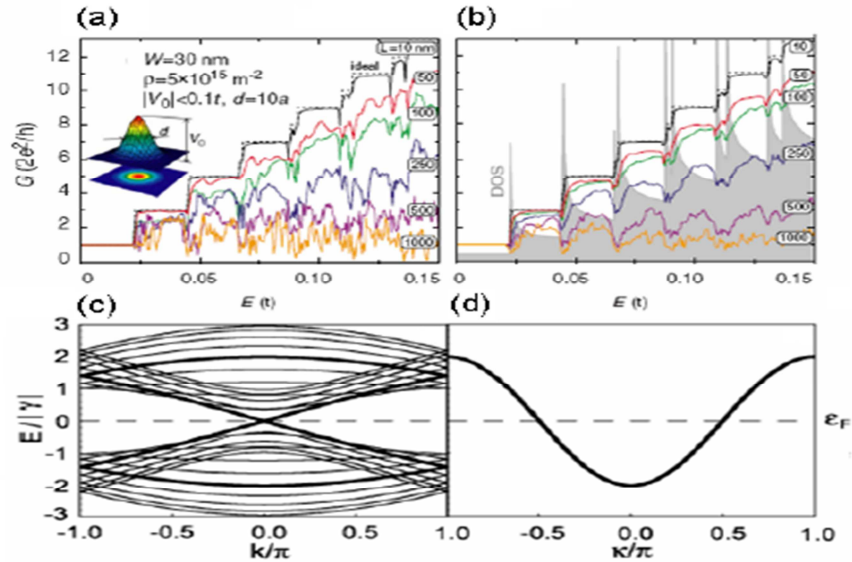


Figure II.10: (a) conductance ; (b) conductance moyenne pour GNR arm chair de largeur $W = 30\text{nm}$ et des longueurs $L \in [10 \text{ } 1000\text{nm}]$, (c) structure de bande pour un GNR arm chair ($N=13$), (d) la bande noire de la figure (c) déroulée pour paraître comme une seule bande

Les courbes (a) et (b) présentent la conductance calculée, pour différentes longueurs de ruban de type arm chair métalliques, en présence de ce type de désordre. la densité d'impuretés dans cet exemple est de :

$$\rho = 5 \times 10^{15} \text{m}^{-2}$$

Pour donner un ordre de grandeur, le ruban a $W=30\text{nm}$ et $L= 250\text{nm}$ (courbe bleue). Une trentaine de défauts sont présents sur l'échantillon. La présence de ce type de désordre entraîne un mélange entre les différentes sous bandes, qui affecte fortement la quantification de la conductance.

Chapitre II : Etude du graphène et régimes de transport

Les bandes de hautes énergies sont plus affectées par ce phénomène car la probabilité de rétro diffusion augmente avec l'indice.

Pour une longueur de $1\mu m$ la conductance à forte énergie est approximativement égale à celle due aux deux premières sous bandes. la différence de phase de π qui existe entre ces deux bandes comme on peut l'apercevoir dans les courbes (c) et (d) fait que la conduction ne soit pas affectée par les désordre.

II .5.3. Désordre de bords :

La régularité des bords d'un nano ruban est très difficile à contrôler expérimentalement, et les méthodes de fabrication actuelle ne peuvent empêcher l'apparition d'une rugosité.

La courbe (b) montre qu'une concentration de 10 % de ce type de défaut suffit à détruire le comportement balistique de la conductance pour un ruban de $1\mu m$ de long et $6.4nm$ de large et ce pour toutes les sous bandes.

En effet sur la courbe (a) on peut voir que malgré le fait que 50% des atomes de carbone aient été supprimés sur les 4 couches externes, la valeur de conductance du premier plateau n'est pas affectée.

Dans le cas d'un ZGNR idéal, la présence des états peu dispersifs localisés sur les bords induit une forte augmentation de la densité d'états. en injectant des porteurs à énergie supérieure à celle présente sur la première bande la conductance de ces états devient sensible aux effets de bord.[11]

II.6. Effets de nano ruban de graphène sur les propriétés électrique :

Dans le cas d'un nano ruban type arm chair la largeur du ruban détermine son comportement électronique M_c ,

- Pour $M_c = 3p$ ou bien $M_c = 3p+1$ ($p \in \mathbb{N}$) : le nano ruban est semi-conducteur
- Pour $M_c = 3p+2$: le nano ruban est métallique

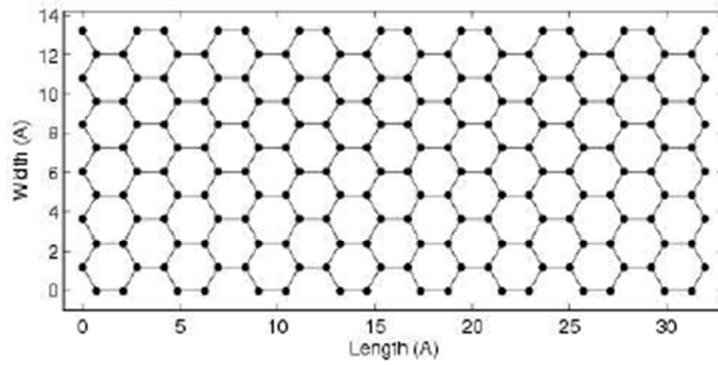


Figure II.11 : GNR arm chair de largeur $M_c=12$

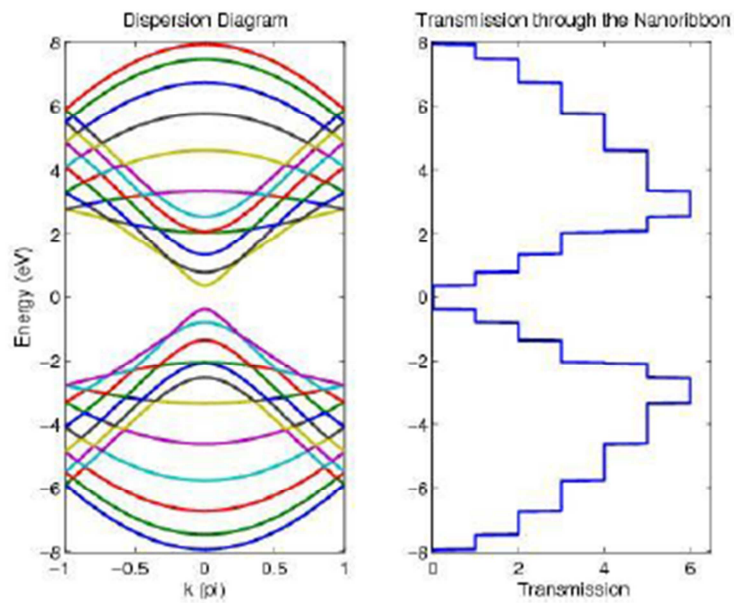


Figure II.12 : Diagramme de bandes et transmission du GNR arm chair $M_c=12$

On peut voir sur la figure une bande interdite dans le diagramme de bande du système ainsi que dans la transmission à travers le ruban, un gap de 0,72eV est observé
 Dans le cas de : $M_c=8 = 3p+2$ le nano ruban adopte un comportement métallique

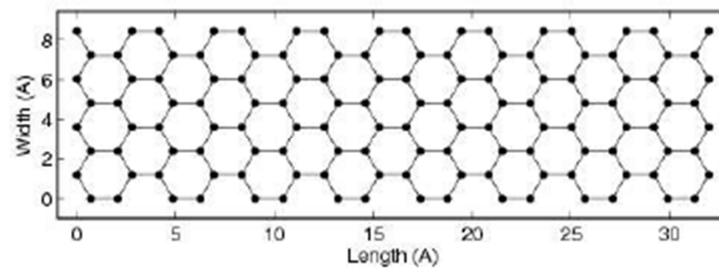


Figure II.13: GNR arm chair $M_c=8$

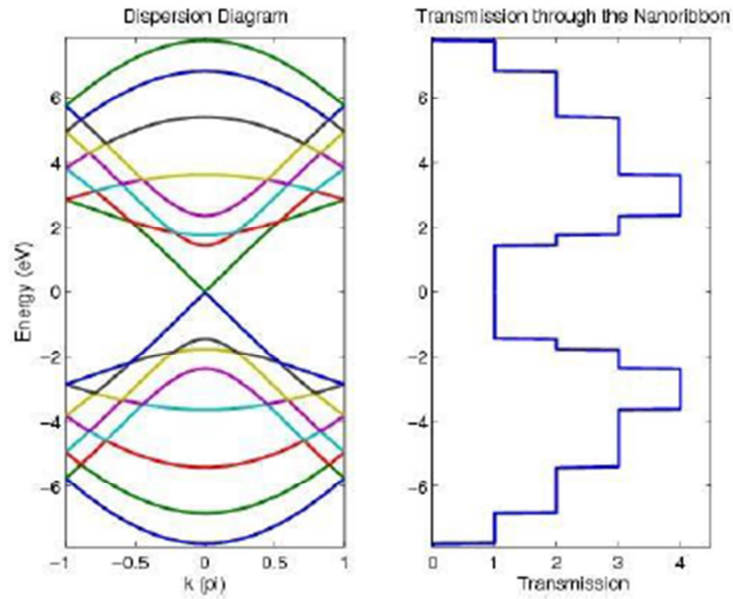


Figure II.14 : Diagramme de bande et transmission du GNR arm chair $M_c=8$ [11]

Les dimensions du GNR influencent normalement non seulement la présence ou non d'une bande interdite mais aussi sa largeur lorsque celle-ci est créée

La figure suivante montre que cette largeur E_g inversement proportionnelle à la largeur de bande, l'évolution de la bande interdite a été tracé en fonction de la largeur GNR

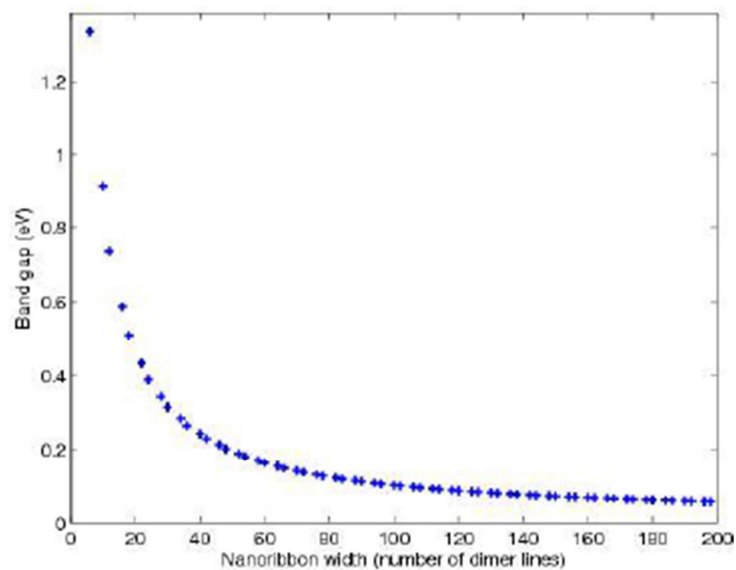


Figure II.15 : évolution de E_g en fonction de la largeur M_c du GNR [11]

Chapitre II : Etude du graphène et régimes de transport

Conclusion :

Nous avons vu dans cette partie l'existence pour le graphène d'un minimum de conductivité au point de neutralité de charge. En effet, malgré une densité de porteur nulle, la nature relativiste des porteurs dans le graphène entraîne une quantification de la conductance. Cette caractéristique est de première importance car elle prévient, la fabrication de transistor à base de graphène.

Comme on a aussi pu voir que les impuretés chargées ont une influence primordiale sur les propriétés de transport dans le graphène. Au point de neutralité de charge, leur présence induit le morcelage du système en îlots d'électrons et de trous spatialement ségrégués. A forte densité de porteurs, le désordre longue portée est responsable de la variation linéaire de la conductance avec la densité de porteurs.

Dans les nano rubans de graphène la quantification en sous bande 1D induit dans les rubans balistiques, une quantification de la conductance. La suite des plateaux de conductance est différente selon que le ruban est de type arm chair ou zigzag.

La présence de désordre, que ce soit de longue portée, de courte portée ou de bords, entraîne une augmentation de la diffusion inter et intra-bande ; qui peut, lorsque le désordre est assez important entrainer la disparition du caractère quantifié de la conductance.

Transistors à Effet de Champ à Base de Graphène

Introduction :

Vu les propriétés fascinantes que le graphène peut offrir à la technologie et le vaste champ d'application auquel il peut donner suite, il n'aura pas fallu longtemps après sa découverte pour qu'il soit envisagé pour la réalisation de transistors avec une finesse de gravure avancée.

L'ouverture d'un gap dans la structure électronique du graphène s'est avérée possible ce qui laisse alors libre cours à son exploitation, la compréhension des différents régimes de transport dans le graphène ont permis aux chercheurs de réaliser différents types de transistors à base de graphène et pu pour la première fois envisager son utilisation dans la technologie MOSFET jusqu'ici dominée par le silicium, notre chapitre se reposera donc sur ces différents types de Gr FETS ainsi que les différentes techniques de fabrication qui permettent aux chercheurs d'y parvenir, puis voir un exemple de fabrication d'un transistor FET à base de nano-ruban.

I. Généralités sur les transistors à effet de champ :

Les propriétés physiques du graphène dépendent fortement de la position de leur niveau de fermi E_f , il existe différentes manières d'introduire des porteurs de charge par exemple par dopage chimique qui va ajouter des électrons (donneurs) ou des trous (accepteurs).

Une autre manière consiste à utiliser l'effet de champ électrique qui est employée dans les Gr FET et chercher à contrôler la conductivité d'un matériau, ces transistors sont au cœur de la technologie moderne des circuits intégrés

Ils se composent de trois électrodes : la **grille**, le **drain** et la **source**. Le drain et la source connectent le matériau afin d'y faire passer un courant. La grille quant à elle ne contacte pas le matériau mais permet le contrôle du dopage.

Les composants MOS constituent la technologie majeure en micro-électronique et leur impacte ne cesse de croître dans tous les domaines de l'électronique, une connaissance approfondie des performances et des possibles limites du MOSFET est donc nécessaire

Chapitre III : transistors à effet de champ à base de graphène

Le principe du transistor Métal-oxyde-semi-conducteur à effet de champ a été trouvé pour la première fois en 1926 mais le MOSFET ne connaît son véritable succès qu'à partir du début des années 1960 grâce à la bonne qualité d'oxyde de grille fabriquée à cette époque-là.[9]

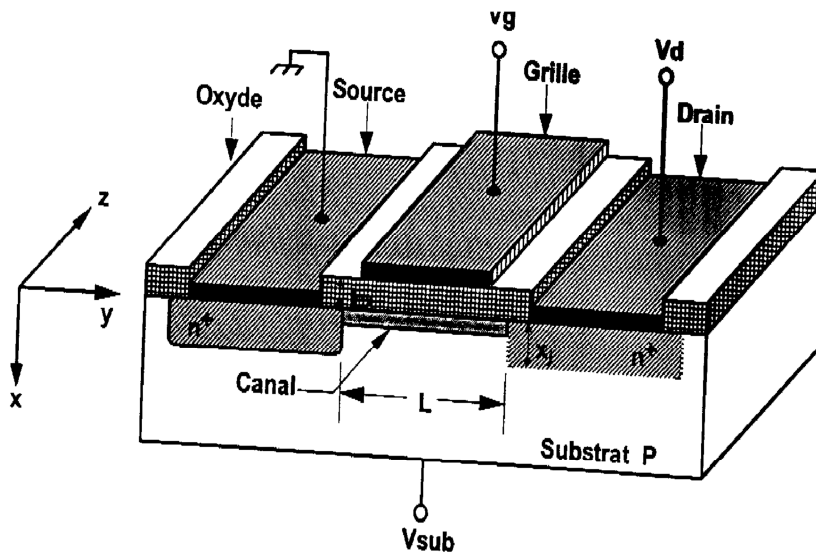


Figure III.1: structure schématique de base du transistor MOS

L_{eff} : la distance source/drain

W : la largeur du dispositif

V_g, V_d : tensions de polarisation du drain et de la grille

La source et le substrat maintenus à la masse

X : profondeur de diffusion

t_{gx} : épaisseur de l'oxyde de grille

L'effet de champ se produit lors de l'application à la grille d'une tension positive suffisante, l'inversion de surface se produit et les électrons forment une couche de conduction sur l'interface, la densité de charge Q_i et la conductance du canal sont modulés par la tension de grille.

L'application d'une polarisation entre la source et le drain rompt l'équilibre thermodynamique et provoque le passage d'un courant à travers la couche d'inversion.

Chapitre III : transistors à effet de champ à base de graphène

L'effet de champ consiste donc à modifier la concentration des porteurs au voisinage de l'interface oxyde /silicium par l'application d'un potentiel électrique sur la grille qui modifie les courbures de bandes d'énergie du semi-conducteur.

Pour les applications logiques le comportement électrique idéal est celui d'un interrupteur parfait.

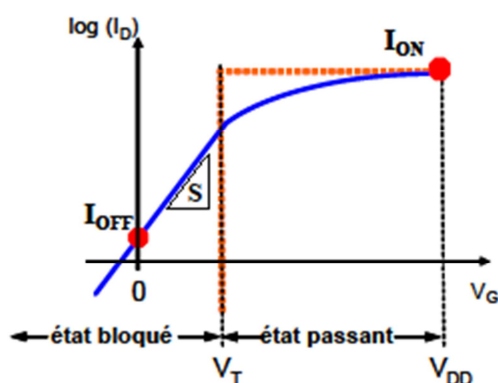


Figure III.2: caractéristiques de transit d'un transistor NMOS : courant de drain I_D en fonction de la tension de grille V_G

La figure ci-dessus montre en pointillés que le courant est nul en l'absence de tension appliquée sur la grille et est maximal (I_{ON}) pour une tension V_{DD} (tension d'alimentation), en réalité ceci est irréalisable car même pour $V_g = 0$ il y'aura toujours un petit courant de diffusion qui circule au niveau des jonctions PN coté drain et source, ce courant de fuite est noté I_{off} ; il est affecté par plusieurs facteurs dont la température, qualité de la jonction ... comme il est aussi affecté par les fuites de grille (pour les diélectrique très mince).

Ainsi le passage de l'état ON à l'état OFF dépendra de la tension de seuil, et la qualité d'un MOSFET pour des applications logiques est défini par ses niveaux de courant I_{OFF} le plus faible possible et I_{ON} le plus fort possible et l'aptitude du transistor à passer rapidement de son état à bloqué à l'état passant, cette caractéristique est représentée par la pente sous le seuil $1/S$.

Plus S est petit plus la commutation se fait facilement à savoir sans avoir à appliquer de fortes tensions de grille [9].

Le transistor MOSFET passe alors par plusieurs régimes de fonctionnement :

Chapitre III : transistors à effet de champ à base de graphène

- **régime linéaire :**

Lorsque V_d est faible, on est en régime ohmique, le potentiel de surface est constant le long du canal et supérieur à $2\phi_F$. la charge Q_i est donc uniformément répartie dans le canal ce dernier se comporte donc comme une résistance. Le courant de drain est alors égale à :

$$I_d = \frac{\mu_{eff} C_{ox} W}{L} (V_g - V_t) V_d \dots \text{Eq (III.1)}$$

Le courant I_d croit linéairement avec les tensions V_g et V_d . On définit alors :

- (i) la tension de seuil explorée V_t en explorant la partie linéaire de la caractéristique $I_d(V_g)$ pour $I_d \rightarrow 0$; ou en prenant l'intersection de la droite passant par le point d'inflexion de la courbe avec l'axe des V_g .
- (ii) la transconductance G_m par la pente $\frac{dI_d}{dV_g}$.

Comme peut le montrer la figure suivante :

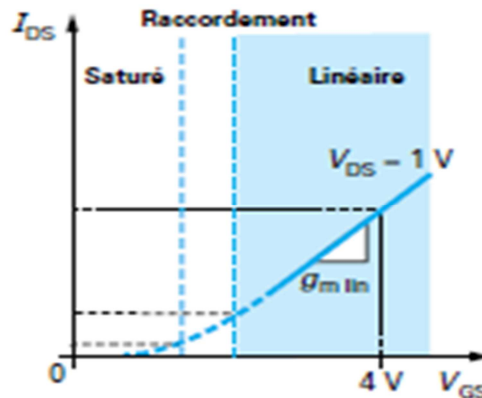


Figure III.3: variation du courant de drain en fonction de la tension de grille

- **régime de saturation :**

Lorsque V_d augmente, le canal n'est plus homogène mais pincé du côté du drain.

V_d est alors égale V_{dsat} , tension de saturation, le régime de fonctionnement est alors dit : « de saturation ». V_{dsat} est calculée en annulant la charge Q_i au point de pincement et vaut :

$$V_{dsat} = V_g - V_t \dots \dots \dots \text{Eq(III.2)}$$

Chapitre III : transistors à effet de champ à base de graphène

Le courant de saturation est alors donné par :

$$I_d = \frac{\mu_{eff} \cdot C_{ox} \cdot W}{2L} (V_g - V_t)^2 \dots\dots \text{Eq (III.3)}$$

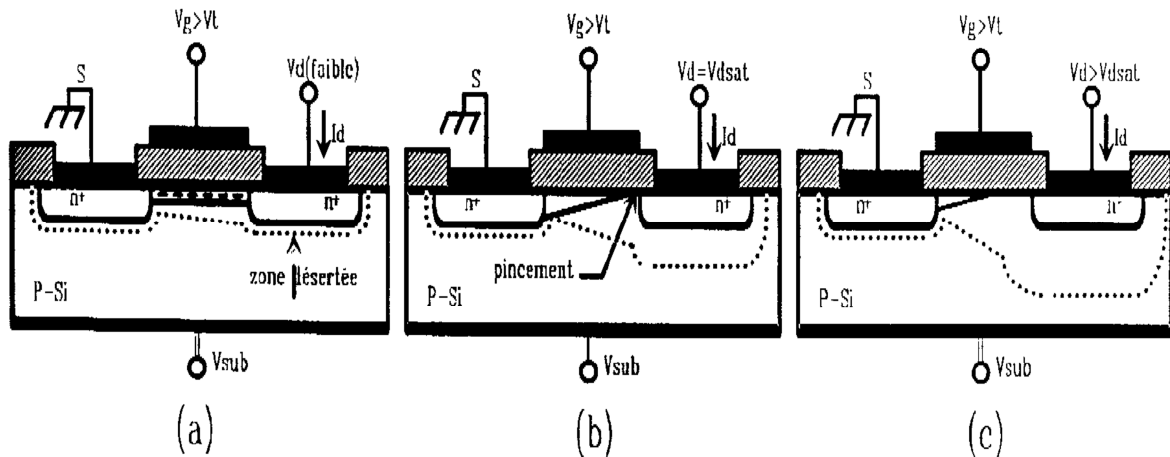


Figure III.4: les différents régimes du TMOS

II. Types de transistors à base de graphène :

De nombreuses structures de FET ont été développées durant les décennies passées, par l'industrie microélectronique, les différents types de transistors sont décrits ici-bas :

II.1. Transistor avec grille supérieure TG (Top Gate) :

Le graphène est déposé sur un substrat quelconque puis recouvert d'un polymère électrolytique d'un gel ionique et une électrode de grille métallique contacte le polymère.

En appliquant une différence de potentiel entre la grille et le graphène des ions se déplacent par effet de champ.

1. Graphène exfolié :

La première fois que ce transistor avec grille supérieure ait été démontré fut en 2007, une ouverture aux dimensions de la grille est d'abord dessinée dans la résine par lithographie électronique puis le diélectrique et le métal de grille sont déposés. Puis la résine est éliminée dans l'acétone laissant uniquement la grille, la mobilité de porteur est de $500 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ elle

Chapitre III : transistors à effet de champ à base de graphène

est relativement basse comparée à celle observée dans le cas de grille arrière car le fait d'ouvrir le film de graphène impacte les performances du dispositif.

En intercalant la couche de polymère entre le graphène et le diélectrique il est possible d'avoir de meilleures performances, en 2009 Liao et al démontrent une mobilité de $23\,000\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ et Farmer et al obtiennent la même mobilité dans leur dispositif avant et après dépôt de la grille supérieur.[12]

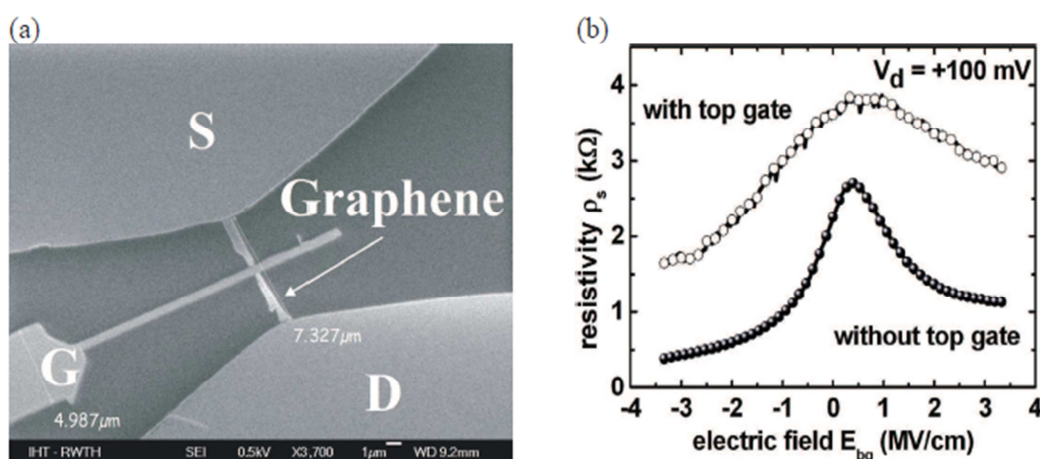


Figure III.6 : (a) photographie SEM d'un transistor au graphène exfolié et grille supérieur (b) caractéristique $I_D(V_G)$ d'un transistor avec et sans grille supérieur. La grille impacte les performances du dispositif

2. Graphèneépitaxié :

C'est en 2004, simultanément aux premières études sur le graphène exfolié, que l'équipe de Walt De Heer à Atlanta effectue les premières mesures de Hall pour un système composé de quelques plans de graphène (de 3 à 5 plans de graphène) obtenus sur la face silicium du substrat SiC. Leurs travaux mettent en évidence un comportement de type « gaz d'électrons bidimensionnel » avec comme caractéristiques principales une mobilité électronique de $1100\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ et une densité de porteurs de charges de 10^{12}cm^{-2} .

Contrairement au graphène exfolié, l'absence de SiO₂ en dessous du graphène empêche l'utilisation d'une grille arrière, pour moduler la densité de porteurs du système. Ainsi il est ici obligatoire de construire une grille supérieure. Les dispositifs sont réalisés directement sur le substrat SiC. Celui-ci est un semi-conducteur dit « grand gap » donc le transport dans le film

de graphène peut être découplé du transport dans le SiC. Les auteurs démontrent la possibilité de doper le système 2D par effet de champ, ouvrant aussi la voie à de futurs dispositifs basés sur le graphène épitaxié. Dès 2004, les travaux de l'équipe de Georgia Tech montre qu'une modulation du courant par une grille supérieure est possible même sur du graphène multicouches. Cependant, la mobilité électronique observée en mesure de Hall ou effet de champ est bien plus basse que celle mesurée sur le graphène exfolié. Pour ce graphène aussi la modulation est très faible. A ce jour, la meilleure mobilité mesurée par Moon en 2010 est de $6000 \text{ cm}^2/(\text{V.s})$. [12]

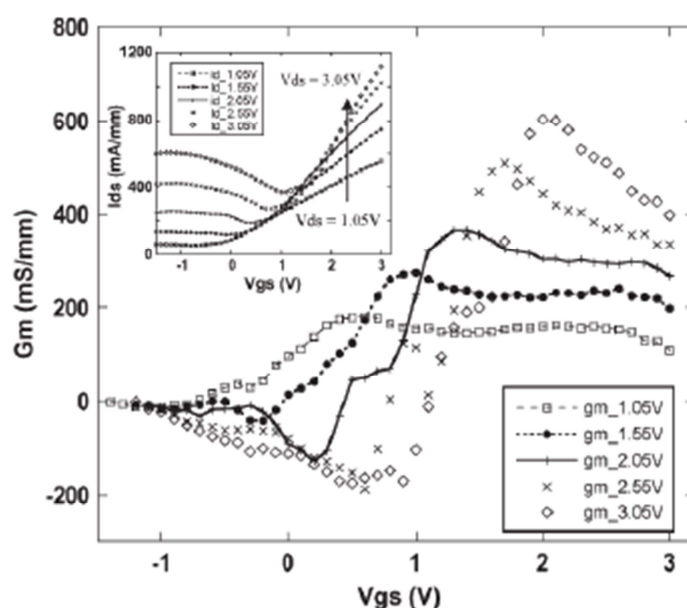


Figure III. 7:: $G_M(V_g)$ et $I_d(V_g)$ mesurés pour différentes valeurs de V_d . La transconductance atteint une valeur de 600 mS/mm pour $V_d=3,05\text{V}$. Le ratio $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ est de 19 pour $V_d=0,5\text{V}$.

3. Graphène CVD :

Le graphène CVD avec grille supérieure peut être intégré de la même manière que le graphène exfolié. La grille est généralement fabriquée via un procédé *lift-off*. De bonnes mobilités électroniques ont été obtenues sur cuivre ($4\,000 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$) et sur nickel ($2000 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$). Une autre intégration intéressante a été publiée en 2010. Les auteurs utilisent une couche de fer préalablement structurée pour obtenir du graphène. Après le dépôt de graphène et la définition des contacts source/drain, cette couche de fer est gravée chimiquement. Ensuite une grille supérieure est dessinée et déposée.. Cette intégration a l'avantage de ne pas nécessiter d'étape de transfert ce qui pourrait améliorer les performances des transistors fabriqués. [12]

II.2. Transistor avec grille inférieure BG (Back Gate) :

Une feuille de graphène est déposée sur un substrat composé d'une couche d'oxyde de silicium SiO_2 d'épaisseur de 300nm et de silicium très fortement dopé pour le rendre métallique et s'en servir par la suite comme électrode de grille

Des contacts métalliques source et drain permettent de mesurer la résistance du feuillet de graphène

1. Graphène exfolié :

Une ouverture aux dimensions de la grille est d'abord dessinée sur la résine par lithographie électronique puis le diélectrique et le métal de grille sont déposés; en suite la résine est éliminée laissant paraître uniquement la grille

La mobilité mesurée pour le graphène est largement plus grande que celle du silicium; il est possible d'extraire cette mobilité par deux moyens, soit par une mesure de l'effet Hall ou bien par effet de champ en utilisant le substrat en silicium comme grille arrière

En déposant du graphène exfolié sur du silicium, on obtient une structure MOS qui met en évidence l'effet de champ dans le graphène[12]

Comme c'est montré sur la figure :

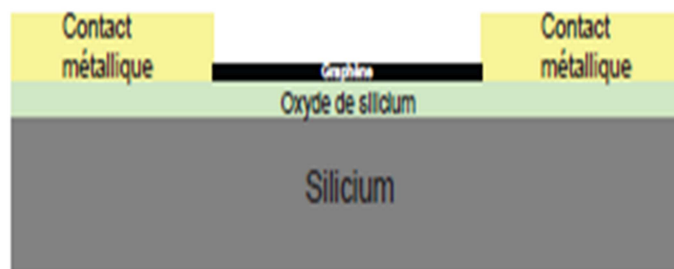


Figure III.8 : schéma d'une structure pseudo-MOS

Le substrat silicium dopé sert de grille arrière du transistor, l'oxyde de grille est l'oxyde de silicium, le graphène représente le canal et les contacts métalliques sont le drain et la source.

Chapitre III : transistors à effet de champ à base de graphène

L'équipe de Manchester et une équipe de Columbia ont montré un effet de champ ambipolaire, ainsi il est possible de moduler la densité de porteur dans le graphène avec une tension de grille mais aussi de changer le type de porteur en changeant le sens de V_g

il est donc important de noter que le graphène obtenu par cette méthode de synthèse est certainement la plus proche du graphène idéal pour les résultat physique que celui-ci peut offrir à la science notamment en terme de mobilité électronique qui dépasse largement celle du silicium, car dès l'arrivée de ce matériau sur la scène scientifique en 2004 on parlait déjà de mobilité atteignant les $10\,000\text{cm}^2/(\text{V.s})$, comme il fut aussi démontré par la même équipe que le graphène pouvait être dopé en électrons ou en trous avec des densité allant jusqu'à 10^{13}cm^{-2} et ainsi atteindre une mobilité de $15\,000\text{cm}^2/(\text{V.s})$

L'intégration du transistor se fait comme pour le graphène exfolié, des contacts métalliques sont dessinés par lithographie puis un empilement Titane/Or est déposé. La longueur de la grille est donc définie par l'espace laissée entre les deux contacts.

La lithographie électronique permet de créer une grille aux dimensions agressives [12]

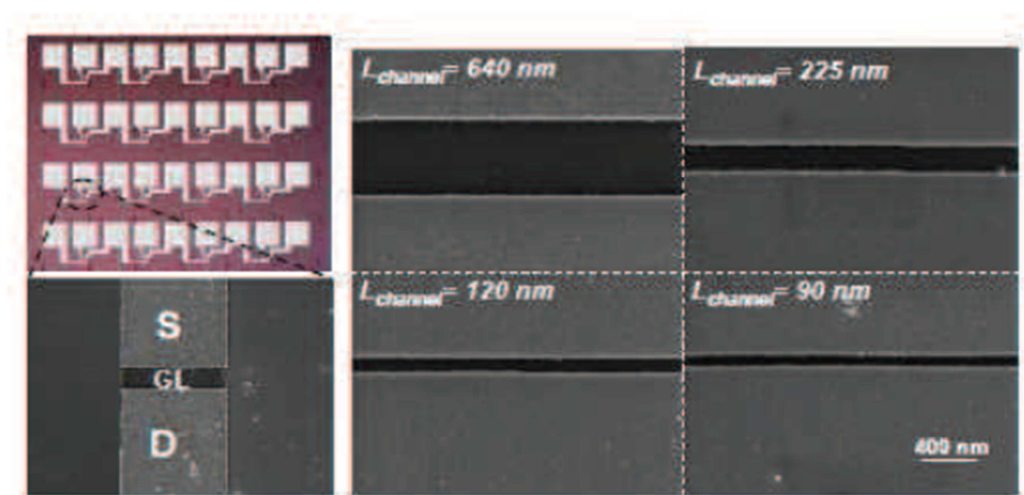


Figure III.9: transistor de type pseudo MOS avec canal en graphène CVD.

Le graphène ici est obtenu sur une feuille de cuivre puis transféré sur oxyde à l'aide de PMMA, les longueurs de canal obtenues sont de 90nm par lithographie électronique.

La courbe suivante présente une courbe $I_D(V_G)$ pour une longueur de grille de $2\mu\text{m}$ à $V_D=100\text{mV}$.

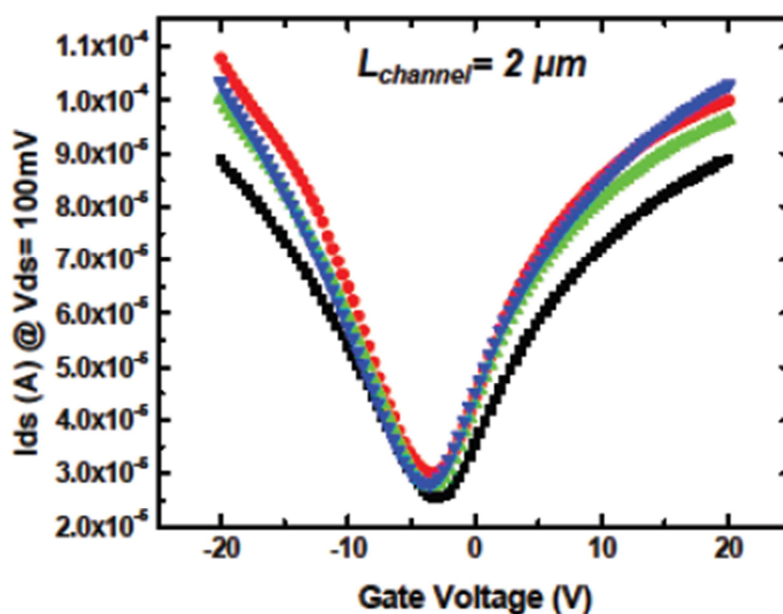


Figure III.10 : courbe $I_D(V_G)$ lorsque $V_d=100mV$ pour une longueur de grille $L_G=2\mu m$

Le graphène est ambipolaire comme dans le graphène exfolié sauf qu'ici le point de Dirac est décalé vers les valeurs de tension de grille négatives ce qui indique un dopage du film de graphène.

Dans cette étude, des mobilités électroniques de $700 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, à température ambiante, ont été extraites pour les longueurs de grille les plus grandes ($2 \mu m$). Pour les longueurs plus agressives (90 et 120 nm) la mobilité n'est plus que de $100 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. La mobilité est ici bien inférieure aux valeurs de mobilité obtenues sur graphène exfolié, ce qui indique que le graphène n'a pas la même qualité. Cette différence de qualité peut venir de plusieurs facteurs : soit la méthode de croissance elle-même fabrique du graphène de qualité médiocre avec notamment des défauts, soit la qualité est détériorée lors du transfert qui nécessite gravure et nettoyage.[12]

II.2. Transistor à double grilles au graphène DG-FET:

La structure du Gr FET double grille est similaire à celui du SOI MOSFET (Silicon On Insulator) qui est réalisé avec un film de silicium mince posé sur un oxyde (BOX : Buried Oxyde)

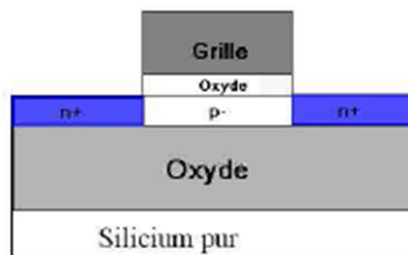


Figure III.11: structure d'un transistor (simple grille) SOI de type n

La couche active est déposée sur le dioxyde de silicium entre le drain et la source, si la porte arrière est utilisée le SOI est alors double grilles ; le courant circule du drain vers la source par la couche active mince de silicium et quand cette dernière est de l'ordre du nanomètre le courant circulera uniquement sur la feuille superficielle de silicium en dessous du dioxyde, le transport alors est quasi-balistique, quant au transistor au graphène la couche active de silicium est remplacée par une monocouche de graphène, et comme le dispositif devient plus petit alors soit de taille nanométrique, le transport est alors balistique et le déplacement de support sera régi par les variations du niveau de FERMİ du côté du drain et de la source

Si la couche de graphène est recouverte d'une couche de diélectrique sur laquelle est déposé un métal alors nous avons alors une configuration double grille DG GFET; cette configuration permet le contrôle adéquat et rapide du flux de courant dans les MOSFET en silicium, on suppose alors que ça soit le cas dans le FET graphène aussi

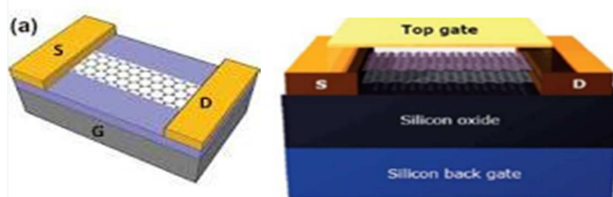


Figure III.12: (à gauche) structure du transistor à graphène, (à droite) configuration de transistor GFET double grille

Les FETs en graphène sont généralement fabriqués par synthèse de graphène épitaxial développé sur SiC, des pistes métalliques sont alors déposées pour servir de drain et de source, le graphène peut être soit monocouche; bicouche ou bien nano ruban

Chapitre III : transistors à effet de champ à base de graphène

Dans le SOI FET classique la tension de grille commande la conduction du canal et mobilité de support au niveau du drain et la source respectivement. Cependant, dans le cas du graphène FET la tension de grille est divisé par deux parties de grille /source et grille/drain ,ce qui est la polarisation conventionnelle du drain et de la source

Ici le transport de porteurs est modulé par les variations du niveau de fermi au drain et à la source causant le remplissage des région à faible niveau de Fermi par les régions à niveau de Fermi supérieurs d'où la symétrie du dispositif , le drain et la source ici sont des réservoirs qui échangent en fonction de la position des variations du niveau de fermi, le courant est exprimé en termes de densité de probabilités, les caractéristiques de commutation sont supérieures à celles du dispositif classique ce qui le rend utile pour des commutations de fréquences élevées à savoir des circuits intégrés plus performants

Comme la bande interdite est inexistante dans le graphène, une bande à effet de tunnel est susceptible d'être créée augmentant ainsi la vitesse de commutation

La diffusion qui se produit dans la couche de graphène a un effet négatif sur les performances des transistors diminuant le courant de drain et la conductance de sortie, des études plus approfondies sont donc nécessaire afin de rabaisser voir limiter ces effets

III. Techniques de fabrication du transistor à effet de champ :

Une fois les morceaux de graphène obtenus leur intégration est enfin possible dans des structures FET, pour se faire le graphène doit être contacté,

plusieurs méthodes sont possibles notamment la lithographie optique qui est une méthode de micro-fabrication couramment employée ainsi que la méthode du pochoir qui est plus limitée mais qui présente l'avantage de ne pas utiliser de résine, ou bien la lithographie électronique.

Dans tous les cas la contamination de l'environnement doit être au maximum évitée donc la fabrication doit se faire en salle blanche.

III.1. Lithographie optique :

Un film mince de résine est formé à la surface de l'échantillon par induction centrifuge puis est chauffé à 120°C pendant 2min, un masque en chrome est en suite créé reproduisant

Chapitre III : transistors à effet de champ à base de graphène

les motifs désirés à savoir drain, grille et source à l'aide d'un aligneur de masques qui va les aligner avec le feuillet de graphène repéré au préalable sur l'échantillon.

Une fois alignés, l'échantillon et le masque sont mis en contact tout en exposant les zones non protégées par le chrome à un rayonnement UV pendant 3,5s. L'échantillon est ensuite plongé sans agitations dans un développeur pendant 1min afin de dissoudre les parties exposées, les motifs deviennent progressivement visibles.

Après cela on place l'échantillon dans un évaporateur à canon d'électrons pour y déposer une couche d'or de 60nm et vu que celui-ci n'accroche pas la silice il est nécessaire de déposer une couche de titane de 2nm, et enfin vient l'étape de *lift-off* qui consiste à enlever la résine recouverte de métal en la trompant dans une solution d'acétone [4]

La figure suivante montre les étapes décrites dans ce paragraphe :

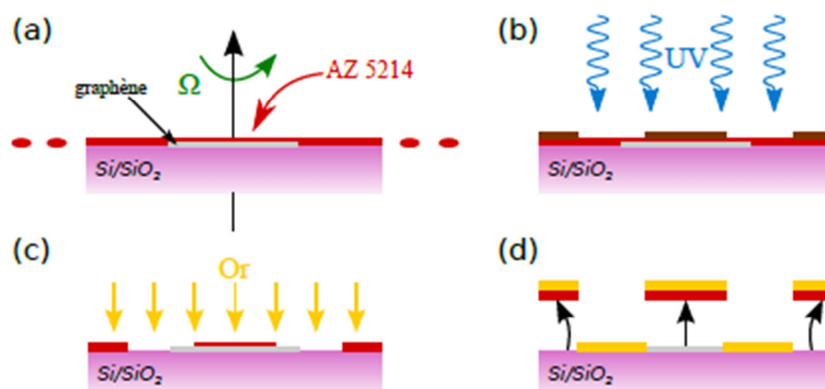


Figure III.13: schéma résumant les étapes principales du processus de lithographie optique, (a) spin-coating de la résine, (b) alignement des masques et exposition de la résine aux UV ; (c) dépôt d'une couche d'accroche de 2nm de titane et une couche de 60nm d'or, (d) lift-off de la résine

III.2. Technique du pochoir :

Cette technique comporte trois étapes essentielles et consiste à utiliser une grille de TEM comme pochoir en l'alignant manuellement sous microscope optique avec un morceau

Chapitre III : transistors à effet de champ à base de graphène

de graphène repéré auparavant, une fois alignés ils sont maintenu ensemble par un support comportant une languette.

Puis vient la deuxième étape ou le tout est placé dans évaporateur pour y déposer une couche d'accroches de 2nm de titane et une couche d'or de 60nm et enfin la grille est enlevée de la surface de l'échantillon [4]

Ces trois étapes sont décrites dans le schéma de la figure suivante de manière plus explicite :

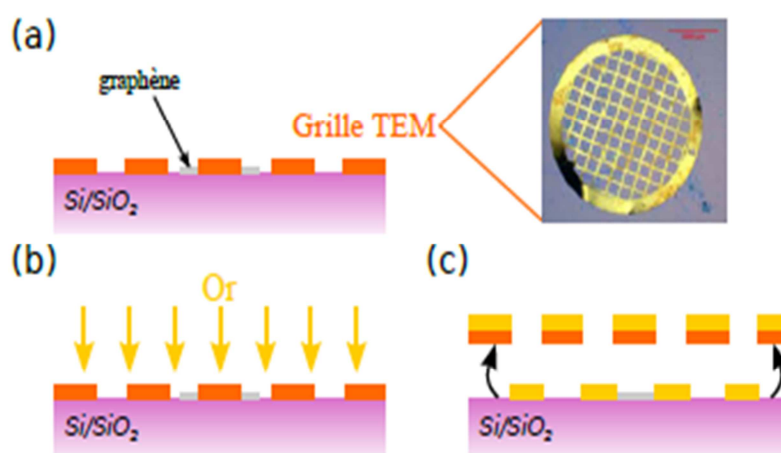


Figure III.14: Schéma résumant les trois étapes essentielles du pochoir (a)alignement de la grille TEM,(b)dépôt d'une couche d'accroche d'une couche d'or, (c) retrait de la grille TEM ; en haut à droite image optique de la grille TEM[4]

III.3. Lithographie électronique :

La lithographie électronique est une écriture directe sur la résine par balayage des motifs avec un faisceau d'électrons, elle ne nécessite donc pas de jeu de masque, en d'autres termes la lithographie électronique consiste à insoler séquentiellement la résine à partir d'un faisceau d'électrons focalisé comme le montre le schéma de la figure suivante :

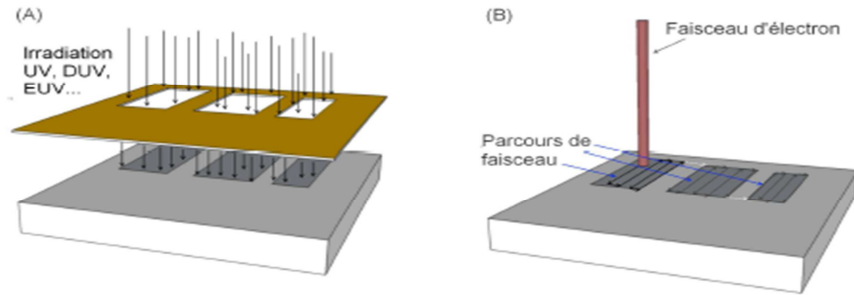


Figure III.15: comparaison de technique de lithographie optique en (a) et électronique en (b)

Cette technique permet d'aller à des dimensions très faibles qui peuvent être inférieures à 10nm, comparée à la lithographie optique, plus utilisée en industrie qui nécessiterai de complexes systèmes de focalisation et de sources de lumières pour atteindre la même résolution , cependant elle prend un temps d'écriture beaucoup plus long ce qui par rapport à l'optique lui vaut un rendement de production plus faible.[4]

IV. Etapes fabrication du GNR FET :

La structure du GNR FET de type haute fréquence se compose d'un canal de transmission qui est du graphène en forme de ruban en plus d'une grille séparée du canal par une couche d'oxyde ; ces dimensions sont représentées dans la figure suivante :

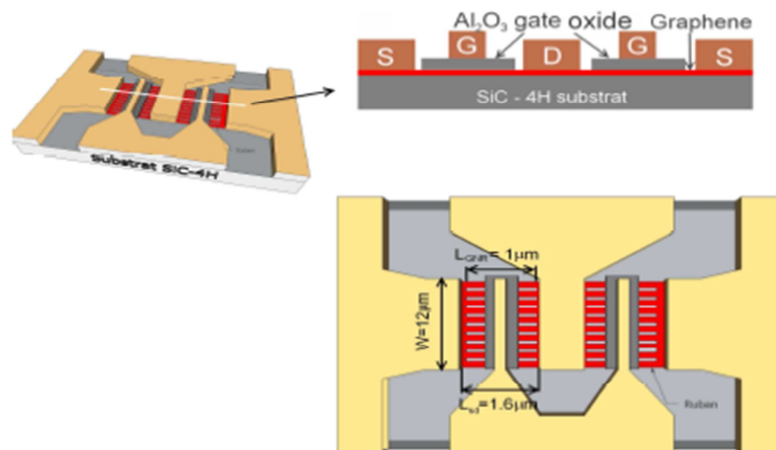


Figure III.16: illustration de la géométrie du GNR FET[5]

W : largeur du transistor 12µm

Chapitre III : transistors à effet de champ à base de graphène

L_{sd} : la distance entre le drain et la source $1,6\mu\text{m}$

L_{GNR} : longueur du ruban $1\mu\text{m}$

Afin de réaliser un transistor GNR FET, plusieurs étapes sont à suivre

Les principales étapes de fabrication sont définies comme suit :

1. Nettoyage et élimination des contaminations potentielles de la surface :

Se fait en plongeant la surface dans de l'acétone pendant 2 minutes et l'agiter, puis une observation des défauts au microscope optique est réalisée

2. Réalisation de marque d'alignement :

Consiste à réaliser des marques identifiables soit par lithographie optique ou électronique, qui sont des petit carrés de quelques micromètres puis une fois la résine développée, une couche de titane est déposée par évaporation sous vide et les métaux indésirables libérés « lift-off » dans un bain d'acétone



Figure III.17: marques d'alignement de 8 micromètre

3. Réalisation de zones d'accrochage :

Pour se faire il faut reprendre l'étape de nettoyage et déshydrater pendant 1 minute, puis revêtir d'une couche de résine électronique négative puis la désinfecter dans le plasma O_2 puis déshydrater à 200°C pendant 12 secondes et passer à la lithographie électronique, développer la résine, graver le graphène[5]

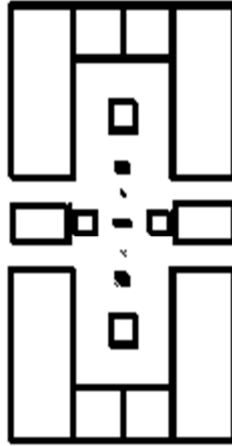


Figure III.18 : zones d'accrochages

4. Réalisation de contacts métalliques :

Même processus que la réalisation de marques d'alignement

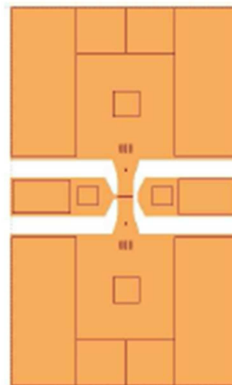


Figure III.19 : Contacts métalliques

5. Lithographie pour la zone active dont les GNR :

Pour se faire il faut d'abord reprendre l'étape de nettoyage encore une fois puis passer au revêtement d'une épaisseur de 55nm de résine pendant quelques secondes ; puis vient lithographie électronique , développement et séchage et vérification de la précision des rubans puis graver le graphène et vérifier à l'AFM que les rubans soient transférés avec succès [5]

6. Croissance de l'oxyde de grille :

Cette étape aussi nécessite un nettoyage de l'échantillon ainsi que la réalisation de marques d'alignement avec un niveau de masque différent, évaporation en deux fois de 2nm d'aluminium oxydé pendant 4h à l'air libre, puis plonger dans l'acétone pour l'étape de « lift off » [5]

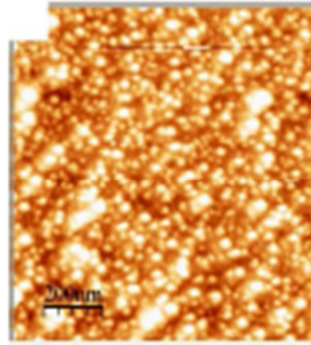


Figure III.20: réalisation de l'oxyde de grille

7. Réalisation de la grille :

Après nettoyage une évaporation de 50nm de Ni et 300nm de Au est réalisée puis plonger dans l'acétone afin d'enlever tous ce qui est indésirable et vérifier au microscope électronique la précision de la grille réalisées:

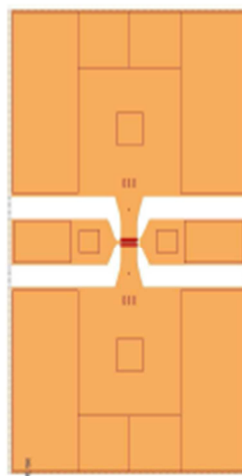


Figure III.21: réalisation de la grille

Chapitre III : transistors à effet de champ à base de graphène

Les étapes de fabrication achevées, la structure finale du transistor nano-ruban est montrée dans la figure qui suit :

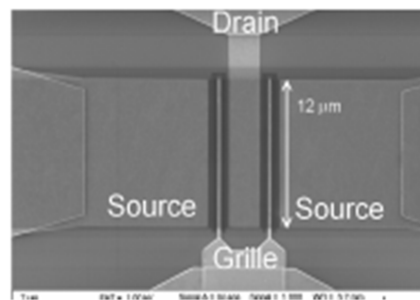


Figure III.22: structure finale du GNRFET[5]

Conclusion :

Une fois les échantillons de graphène identifiés, il faut alors les contacter, plusieurs méthodes sont alors possibles dont la lithographie optique et électronique dont on a vu un exemple de fabrication d'un transistor nano-ruban (GNR FET) dans ce chapitre.

L'apparition d'un gap dans le graphène peut se faire de différentes manières, une fois cette bande interdite générée il a été démontré que les transistors à canal au graphène sont tout à fait intégrables dans la technologie MOS, leur intégration est un pas considérable pour l'industrie de la micro-électronique, il s'agirait d'un point crucial qui devrait assurer un essor rapide de la technologie MOS.

Modélisation des transistors FET à base de graphène

Introduction :

le graphène, depuis sa découverte en 2004, fait l'objet de nombreuses études faisant connaître au monde les nombreuses propriétés que celui-ci peut assurer, il présente notamment une grande mobilité de porteurs qui en principe est la conductance par la charge élémentaire et détermine ainsi la vitesse de déplacement des porteurs dans le semi-conducteur, d'après les études menées sur le graphène celui-ci présentera une mobilité électronique intrinsèque exceptionnelle défiant toutes celles des autres matériaux utilisés en micro-électronique jusque là, c'est pourquoi il semble être un candidat compétitif pour la haute intégration de demain, néanmoins le graphène demeure un semi-conducteur à bande interdite nulle.

L'exploitation du graphène pour des applications technologiques avancées nécessite une compréhension de ses modèles mathématiques adéquats aux transistors à effet de champ à base de graphène qui feront l'objet de ce chapitre, et ainsi voir les caractéristiques de transfert et de sortie de ces transistors lors de l'application d'un champ électrique sur ces derniers et voir l'importance des dimensions notamment la longueur et largeur du canal pour ce type de dispositifs.

I. Modèles des transistors à effet de champ à base de graphène GFET:

Ces dernières années les performances RF qui requièrent l'utilisation des transistors FET à base de graphène demande une modélisation mathématique de ces dispositifs, leur modèle analytique peut prédire ses caractéristiques électriques

La possibilité de réaliser des mobilités électroniques, qui sont d'ordre de grandeur supérieures à celles obtenues en technologie silicium, rend l'application de l'effet de champ sur les dispositifs à base de graphène (GFET) excellents candidats pour remplacer le transistor à l'échelle nanométrique

Ce travail présente le développement des modèles avancés de FET à base de nanomatériaux et une étude comparative entre graphène FET (GFET), double grille GFET (DG-GFET) et nano-ruban

Chapitre IV: Modélisation des transistors FET à base de graphène

Pour mettre en évidence la transconductance et les valeurs de fréquence de transition pour permettre la caractérisation électronique des appareils avec un objectif futur de développement de circuits pour application Radio Fréquences.

I. transistor GFET :

L'équation du courant de drain I_d du dispositif se traduit en une seule équation qui est décrite ici [7] :

$$I_d = \frac{\mu W C_{ox} V_{tot}}{\frac{L}{V_{ds}} + \frac{\mu}{\omega} \sqrt{V_{tot}} \sqrt{\frac{\pi C_{ox}}{e}}} \dots \dots \dots \text{Eq (IV.1)}$$

Où : $V_{tot} = V_{eff} - V_{ds}/2$

C_{ox} : capacité de l'oxyde

e : charge élémentaire $1,6 \cdot 10^{-19}$ Colomb

ω : dérivé de l'énergie du phonon $\hbar\omega$

Model à petit signal :

Le but ici est de développer des équations pour avoir les paramètres importants qui sont la transconductance et la fréquence de transition, ces paramètres découlant de ce model sont utilisés pour l'analyse du comportement de l'amplificateur.

La transconductance a une importance considérable pour obtenir le gain.

I.1. La transconductance g_m :

La transconductance est obtenue en dérivant l'équation du courant de drain cité plus haut :

$$g_m = \left(\frac{I_d}{V_{tot}} \right) \times \left(1 - \frac{I_d}{2W\omega} \sqrt{\frac{\pi}{eC_{ox}}} \times \frac{1}{\sqrt{V_{tot}}} \right) \dots \dots \dots \text{Eq (IV.2)}$$

Chapitre IV: Modélisation des transistors FET à base de graphène

Ce model est aussi efficace lorsque $V_{eff} > V_{ds}/2$, la meilleure performance de g_m est enregistré lorsque V_{eff} faible.

Le rapport g_m/I_d donne la valeur du courant maximal obtenu en absence de tension ce qui donne une idée sur la consommation d'énergie du dispositif.

La caractéristique de cette transconductance g_m est démontrée ici-bas :

Les figures qui suivent montre la variation de g_m en fonction de V_{gs} , avec une longueur L de 100 nm (à gauche) et de 440nm (à droite).

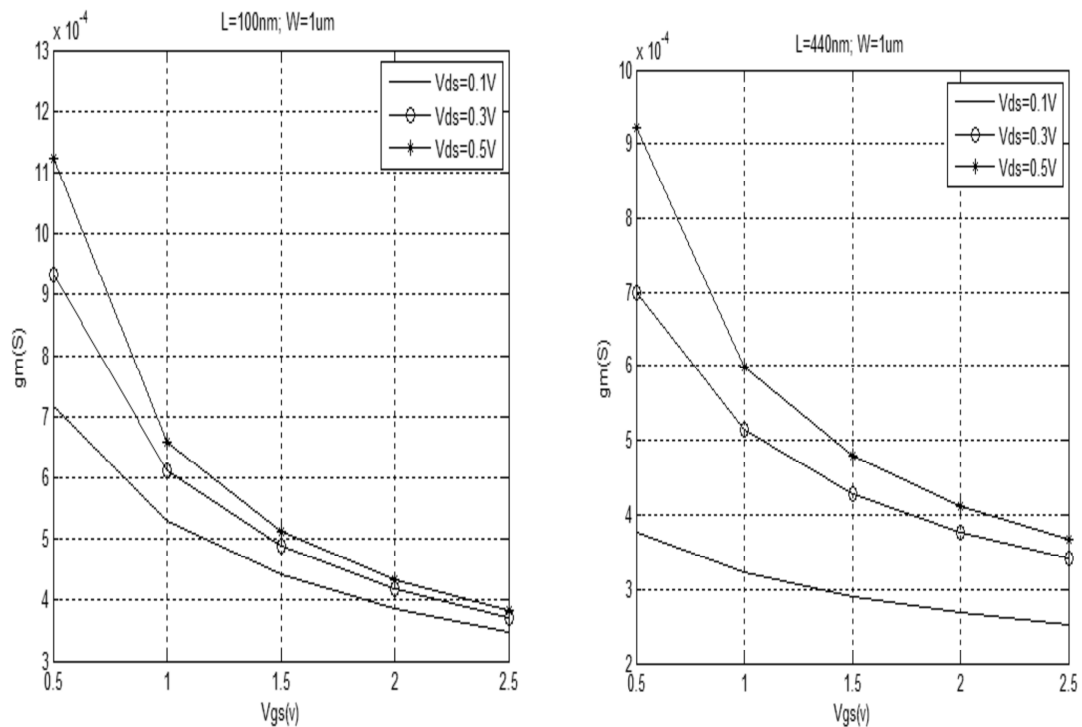


Figure IV.1: variation de la transconductance g_m suivant V_{gs} avec $C_{ox} = 3.6 \times 10^{-3}$

$$\text{F/m}^2, \mu = 7000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}, \text{ and } \omega = 8.5 \times 10^{13} \text{ Hz}$$

L=100nm (à gauche) et L=440nm (à droite) [7]

A $V_{ds}=0,1\text{V}$ $V_{gs}=0\text{V}$ la transconductance $g_m = 11 \cdot 10^{-4}$ S pour $L=100\text{nm}$ alors que pour $L=440\text{nm}$ celle-ci est égale à $9 \cdot 10^{-4}$ S mais ces valeurs baissent en augmentant la tension de grille V_{gs} .

Chapitre IV: Modélisation des transistors FET à base de graphène

La courbe montre réellement que g_m baisse considérablement pour les tensions de polarisation de la grille élevées, principalement en raison de l'effet de V_{sat} . Par conséquent, la meilleure transconductance enregistrée est réellement atteinte à des tensions V_{eff} faibles. Pour ce qui est de la longueur du canal il est utile de noter qu'on a une meilleure conductance pour $L=100nm$ pour la même tension de grille appliquée sur le dispositif à $L=440nm$.

I.2. Fréquence de transition :

Le but des travaux effectués sur les FETs à base de nanomatériaux est de caractériser les nouveaux dispositifs 100nm et ainsi déterminer la fréquence de transition [7]

$$f_T = \frac{I_d/V_{tot}}{2\pi(1.5C_{ox}WL)} \times \left(1 - \frac{I_d}{2W\omega} \sqrt{\frac{\pi}{eC_{ox}}} \times \frac{1}{\sqrt{V_{tot}}}\right) \dots \dots \dots \text{Eq (VI.3)}$$

f_t Définit la fréquence où le gain en courant est égale à 1, permet aussi de connaître la vitesse et la largeur de bande que peut atteindre le dispositif

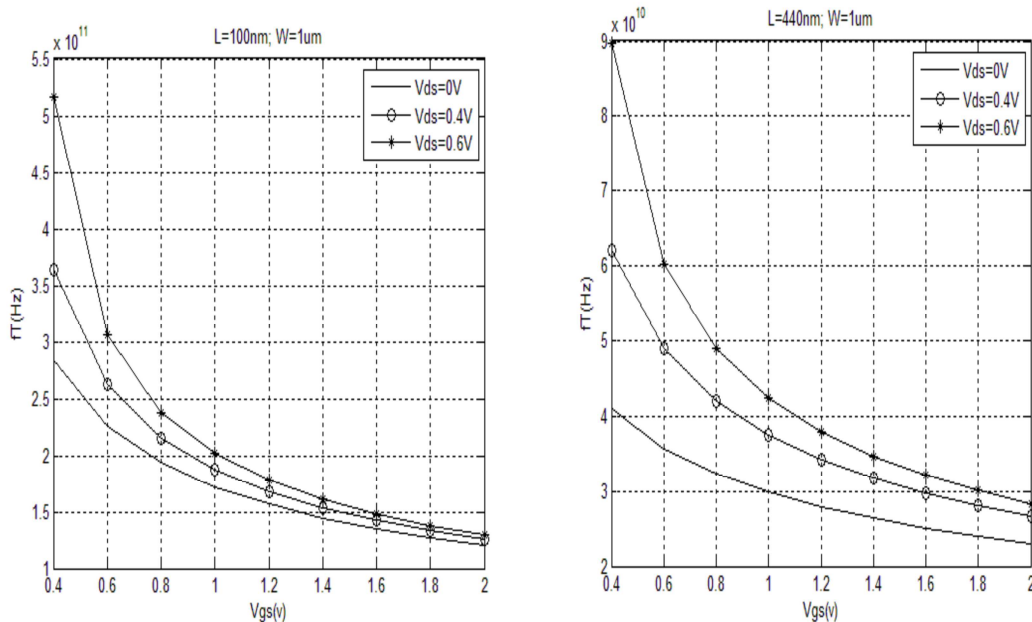


Figure IV.2 : variation de la fréquence en fonction de V_{gs} pour $C_{ox} = 3.6 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2$, $\mu = 7000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, and $\omega = 8.5 \times 10^{13} \text{ Hz}$.

$L=100nm$ (à gauche) et $L=440nm$ (à droite)[7]

Chapitre IV: Modélisation des transistors FET à base de graphène

Lorsque la tension de grille est minimale :

Pour $L=100\text{nm} \Rightarrow f= 5,3 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$

Pour $L=440\text{nm} \Rightarrow f= 9 \cdot 10^{10} \text{ Hz}$

Les courbes obtenues des deux figure montre que les fréquences enregistrées sont plus grandes lorsque la longueur du canal est de $L=100\text{nm}$ et pour des valeurs de V_{gs} faibles, bien que ces fréquences soient décroissantes quand V_{gs} augmente, néanmoins elles restent supérieures à celles enregistrées pour $L=440\text{nm}$

Les courbes montrent donc que les fréquences de transition les plus élevées sont enregistrées pour les faibles tensions de grille ce qui rend donc ce modèle utile pour des applications à faible tensions et qui requièrent de hautes fréquences [7].

II. Caractéristiques de transfert et de sortie du GFET :

II.1. Caractéristiques $I_d(V_{ds})$:

Pour vérifier le bon fonctionnement du transistor il est nécessaire d'envisager certaine caractéristique

Les courbes ci-dessous montrent la variation du courant I_d en fonction de la tension de drain V_{ds} pour différentes valeurs de V_{gs} fixes [7]

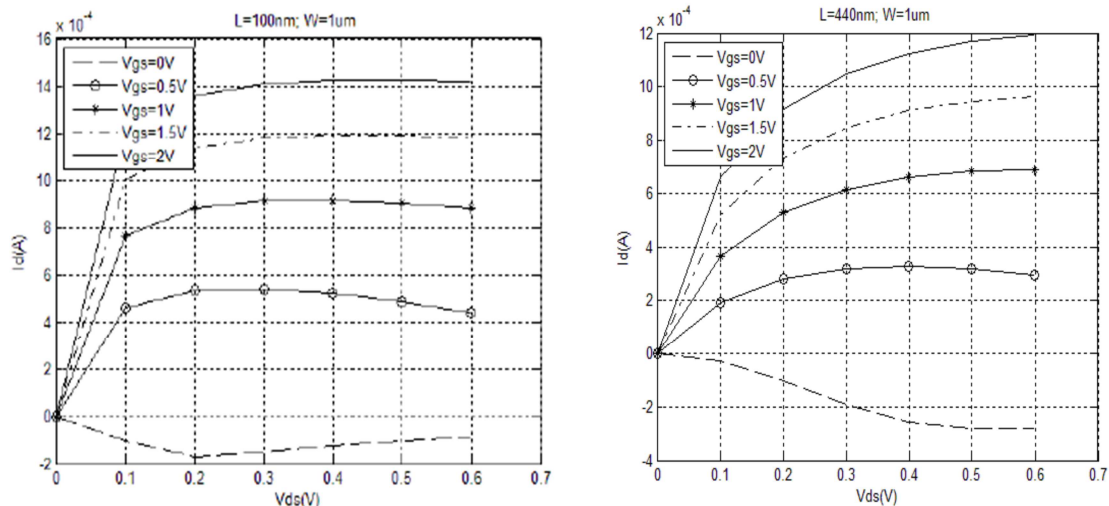


Figure IV.3: variation courant de drain I_d suivant la tension V_{ds} avec $C_{ox} = 3.6 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2$, $\mu = 7000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, and $\omega = 8.5 \cdot 10^{13} \text{ Hz}$. $L=100\text{nm}$ (à gauche) et $L=440\text{nm}$ (à droite)[7]

En observant les courbes on remarque une zone de linéarité en plus d'une zone de saturation, la zone linéaire peut être utilisée dans les transistors ou les commutateurs, la zone de saturation elle, peut être utile pour l'exécution de tension pour le contrôle du courant de la source, il est aussi important de noter qu'on a une saturation plus grande pour le dispositif à canal réduit.

Comme elles montrent aussi que lorsque la tension de grille V_{gs} est nulle, le courant de drain est minimal malgré que V_{ds} augmente.

II.2. Caractéristique de transfert $I_d(V_{gs})$:

La mesure du courant entre la grille et la source est faite pour évaluer les fuites entre la grille et le canal c'est pourquoi il est utile de comprendre les courbes obtenues de notre modèle.[7]

Les courbes ci-dessous représente la variation du courant de drain en fonction de V_{gs} pour différentes valeurs de V_{ds} et pour une longueur de canal $L=100\text{nm}$ (à gauche) et $L=440\text{nm}$ (à droite).

Le graphène est un semi-conducteur à bande interdite nulle, les courbes de la figure ci-dessous montre bien le caractère ambipolaire du graphène et la présence des points de Dirac.

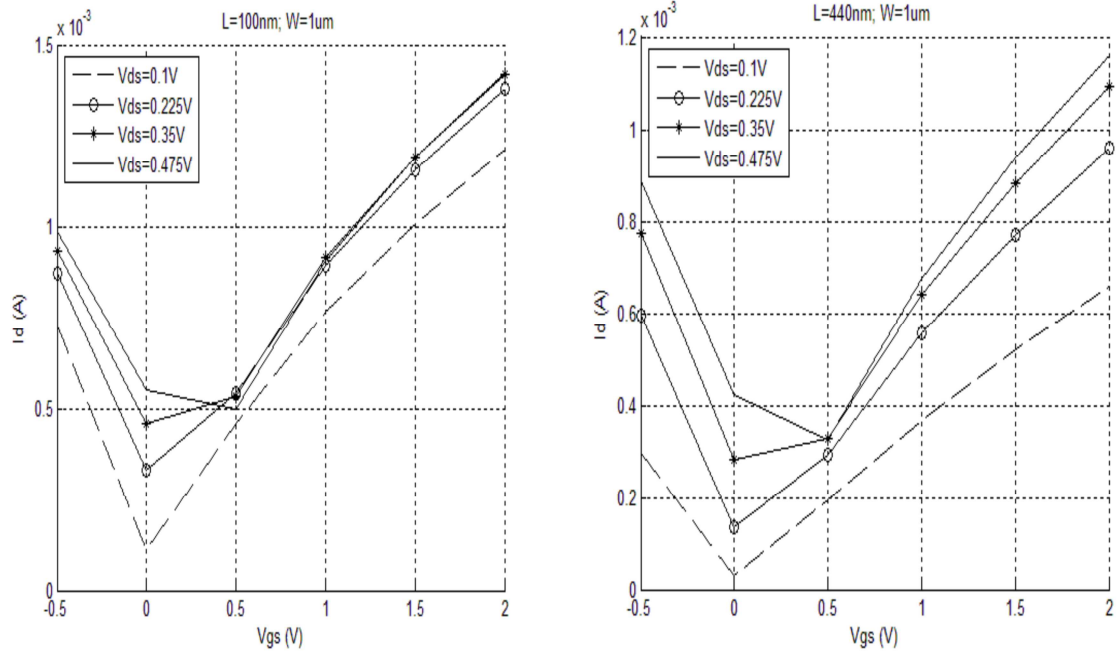


Figure IV.5: variation du courant I_d en fonction de V_{gs} , avec $C_{ox} = 3.6 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2$, $\mu = 7000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, and $\omega = 8.5 \times 10^{13} \text{ Hz}$.

$L=100\text{nm}$ (à gauche) et $L=440\text{nm}$ (à droite) [7]

Les courbes montrent que le courant I_d augmente pour les valeurs positives de V_{gs} alors qu'il diminue pour $V_{gs} < 0$.

Lorsque $V_{gs} > 0$: La conduction dans le dispositif est due à la vitesse de diffusion des électrons tant-dis-que pour les valeurs négatives celle-ci est due aux trous.

Comme elles montrent aussi l'importance de la longueur du canal car pour $L=100\text{nm}$ on obtient des valeurs I_d supérieures à celles obtenues pour le dispositif à $L=440\text{nm}$

Tableau IV.1 . : Comparaison des paramètres pour différentes longueurs

Parameter \ length	$3\mu\text{m}$	$1\mu\text{m}$	440nm	100nm
$I_{d\text{max}}(\text{mA})$	0.68	10.4	12.1	14.1
$g_m(\text{mS})$	0.33	0.68	0.92	11.2
$f_T(10^{10})\text{Hz}$	41	2.6	9	52

Chapitre IV: Modélisation des transistors FET à base de graphène

De ce tableau on peut observer que les valeurs maximales du courant de drain de la transconductance et de la fréquence dans les GFET est obtenu pour les longueurs de canal réduites soit pour $L=100\text{nm}$.

III. Modèle du transistor FET double grille à base de graphène DG-GFET:

Plusieurs modèles physiques sont possibles pour calculer le courant de drain généré par les transistors DG-GFET tenant compte de la charge électrique présente dans le canal et la structure de bande spécifique au graphène, ces modèles sont généralement complexes

Ici le courant de drain est obtenu en prenant compte de la vitesse des porteurs et de leur concentration dans le canal puis donné par l'équation suivante[7] :

$$I_d = q \frac{W}{L} \int_{V(x=0)}^{V(x=L)} \overline{n(x)} V_{drift,eff}(x) dx \dots\dots \text{Eq IV.4}$$

La moyenne de la concentration des porteurs dans le canal est donnée comme suit :

$$\overline{n(x)} = \frac{1}{V_c} \int_{V(x=0)}^{V(x=L)} \sqrt{n_0^2 + \left(\frac{C_{top}(V_{tg} - V(x) - V_{tg,0})}{e} \right)} \dots\dots \text{Eq IV.5}$$

Où :

n_0 : Concentration intrinsèque des porteurs.

V_{tg} : Tension appliquée sur la grille avant (top gate).

$V(x)$: la tension dans le canal à la position x .

$V_{tg,0}$: Tension de neutralité de la charge.

L'équation de la tension dans le canal est :

$$V_c = \frac{C_{top}}{C_q + C_{back} + C_{top}} (V_{tg} - V_{tg,0} - V(x)) + \frac{C_{back}}{C_q + C_{back} + C_{top}} (V_{bg} - V_{bg,0} - V(x)) \dots\dots \text{Eq IV.6}$$

Chapitre IV: Modélisation des transistors FET à base de graphène

C_q : Capacité du quantum

V_{bg} : Tension appliquée sur la grille arrière (back gate)

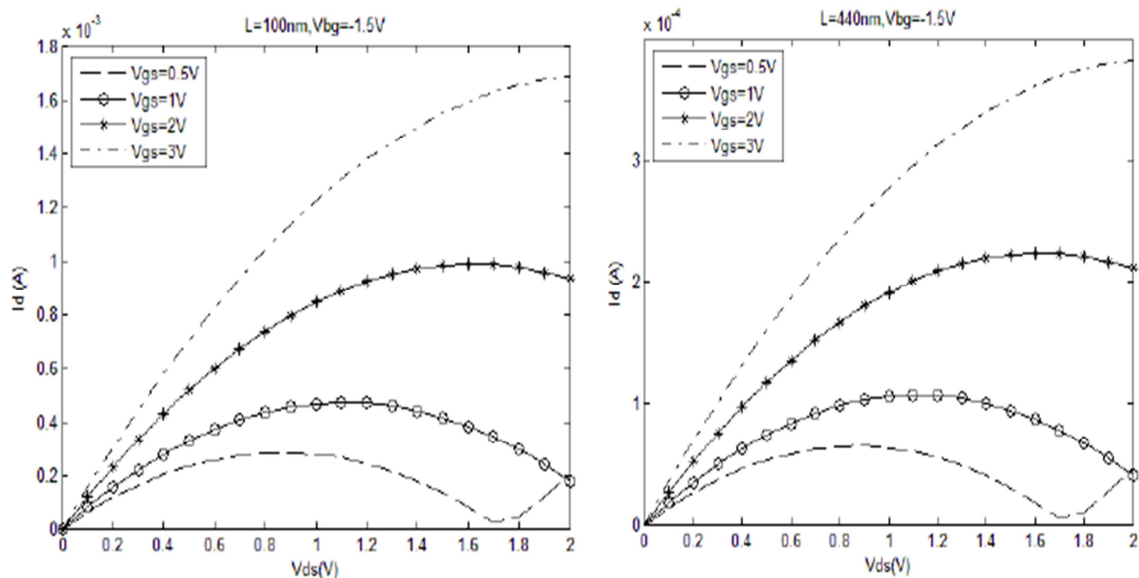
$C_{top}C_{back}$: Capacité de la grille avant et arrière

La vitesse de transport effective est alors donnée :

$$V_{drift,eff} = \sqrt{V_{drift,h}^2 + V_{drift,e}^2} \dots\dots\dots \text{EqIV.7}$$

$V_{drift,e}V_{drift,h}$: Respectivement vitesse des électrons et des trous

III.1.Caractéristique de transfert $I_d(V_{ds})$:



**Figure IV.6.: Variation du courant de drain en fonction de V_{ds} , avec $C_{top} = 209 \times 10^{-9} \text{FC}_{back} = 11.5 \times 10^{-9} \text{F}$, $V_{bg} = -1,5 \text{V}$
 $L=100\text{nm}$ (à gauche) et $L=440\text{nm}$ (à droite) [7]**

En comparant les valeurs de I_d obtenues On remarque que la valeur du courant de drain augmente lorsque la longueur du canal est réduite

Les courbes obtenues en changeant la valeur de la tension de grille arrière V_{bg} de -1,5V à -5 V sont montrées dans la figure suivante :

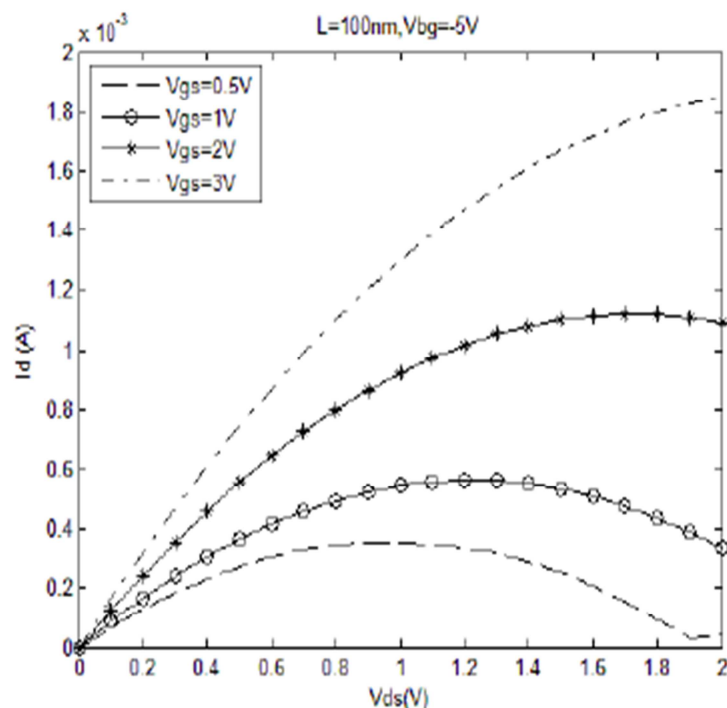


Figure IV.7: Variation du courant de drain en fonction de V_{ds} , avec $L=100\text{nm}$ et

$$C_{top} = 209 \times 10^{-9} \text{F}, C_{back} = 11.5 \times 10^{-9} \text{F}, V_{bg} = -5\text{V}$$

Dela comparaison des deux figures à $V_{bg} = -1,5\text{V}$, $V_{bg} = -5\text{V}$ et on remarque que pour une certaine valeur de $V_{gs} = 0,5\text{V}$, lorsque on réduit la valeur de la tension de grille arrière $V_{bg} = -5\text{V}$ le courant de drain lui augmente

Tableau IV.2. : Comparaison des paramètres des transistors GFET et DG-GFET[7]

Parameter \ device	GFET(100nm)	DG-GFET(100nm)
I_{dmax} (mA)	14.1	1.18
g_m (mS)	11.2	0.89

Chapitre IV: Modélisation des transistors FET à base de graphène

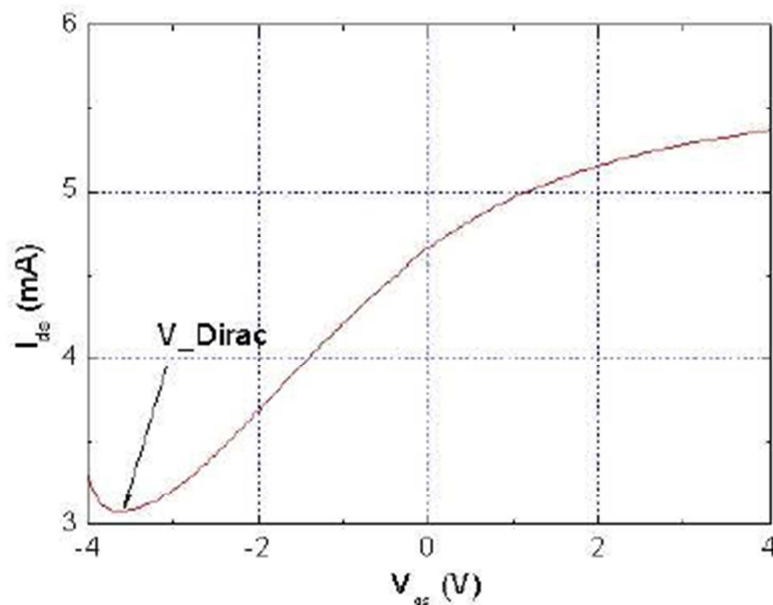
De ce tableau on observe que le courant maximal I_{dmax} et la plus grande valeur de la transconductance g_m sont obtenus pour les transistors GFET il est donc possible de déduire que le GFET est nettement préférable au DG-GFET puisque ils sont les critères de sélection

IV. Modèle du transistor FET à base nano-ruban :

Avant toute chose il est important de noter que les propriétés de transport dans les nano-rubans sont différentes du graphène non structuré ce qui vaudra donc que les caractéristiques de transistors à base de GNR soient elles aussi différentes des caractéristiques des Gr FET vus précédemment. [5]

VI.1 caractéristique de transfère $I_{ds}(V_{gs})$:

La première caractéristique du GNR FET repose sur le fait qu'il ait un courant I_{ds} pour une tension V_{gs} appelée tension de Dirac lorsque V_{ds} est constante ce minimum de courant traduit le fait que le niveau de FERMİ passe par les points de Dirac dans la structure de bande du graphène , l'existence de cette relation définit donc le pouvoir de contrôle de charge dans le canal



FigureIV.8 : Caractéristique de transfert $I_{ds}(V_{gs})$ d'un GNR FET avec $W=100$ nm ;

$N_{ruban}=40$ et $L_g=150$ nm[5]

Chapitre IV: Modélisation des transistors FET à base de graphène

La figure montre que la tension de Dirac dépassée le courant I_{ds} augmente ce qui prouve le caractère ambipolaire de notre matériau lié à sa structure de bande

Lorsque on utilise le graphène exfolié ce courant est symétrique ce qui n'est pas le cas lorsque il est dopé comme ici.

IV.2. Influence des effets de bord sur le courant :

Une mesure du courant par unité de largeur du ruban a donné la courbe de la figure; on remarque le courant est nul en dessous de 32nm, ceci est dut aux effets de bord lié à au processus de gravure des rubans ce qui entraînent inévitablement des défauts dans les mailles hexagonales du graphène [5].

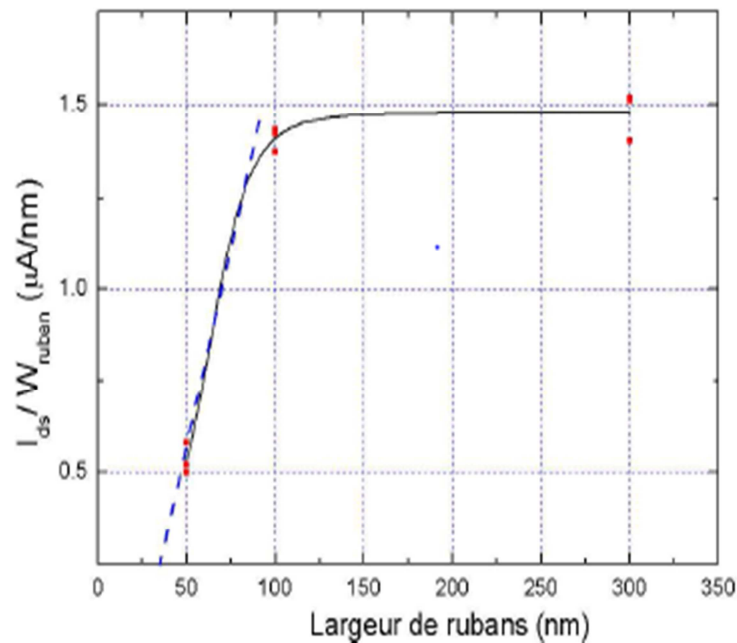


Figure IV.9. : Influence des effets de bords sur le courant [5]

La courbe ci-dessus montre que arrivé à une certaine largeur de bande le courant I_{on} ne suit plus l'évolution, car plus le ruban est large moins il est résistif.

Chapitre IV: Modélisation des transistors FET à base de graphène

IV.3. caractéristique de sortie $I_{ds} = f(V_{ds})$ et $I_{gs} = f(V_{gs})$ du GNR FET:

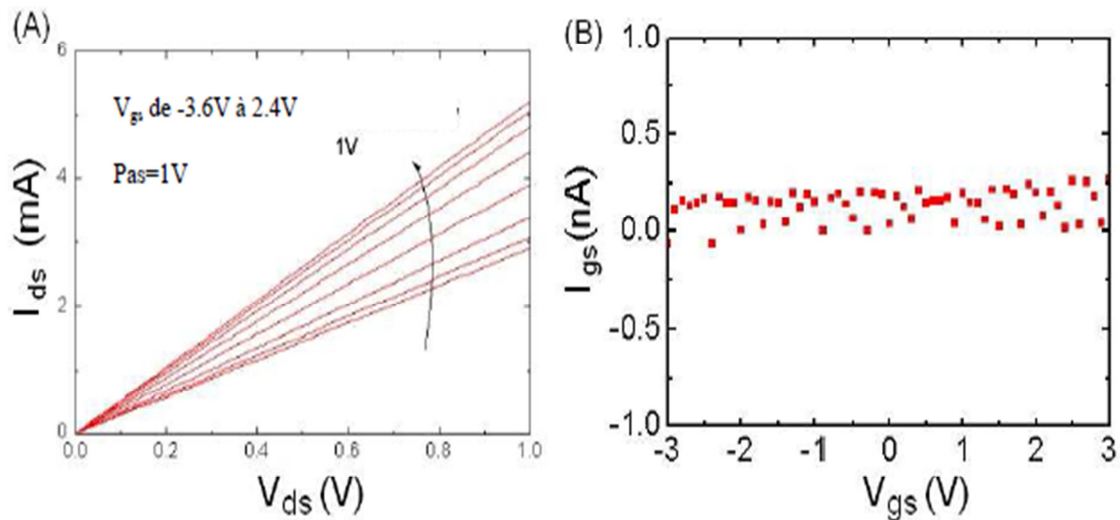


Figure IV.10. :(A) caractéristique $I_{ds} = f(V_{ds})$, (B) caractéristique $I_{gs} = f(V_{gs})$

La courbe (A) montre que la relation entre le courant et la tension V_{ds} est linéaire. Le courant entre la grille et la source est très faible $I_{gs} < 0, 25 \text{ nA}$, ce qui signifie une bonne isolation entre les deux.

IV.4. Transconductance dans GNR FET :

La transconductance G_m est un facteur qui révèle le contrôle dans le graphène par la tension de grille et peut être calculée avec la relation suivante [5] :

$$G_m = \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} \right|_{V_{ds}} = \text{constant} \dots \dots \text{Eq(IV.8)}$$

La courbe suivante calculée à partir de la caractéristique de transfert du GNR FET montre que la valeur maximale de G_m est $590 \mu\text{s}$ pour $V_{gs} = -2$ et nulle au point de Dirac et change de signe au dessus :

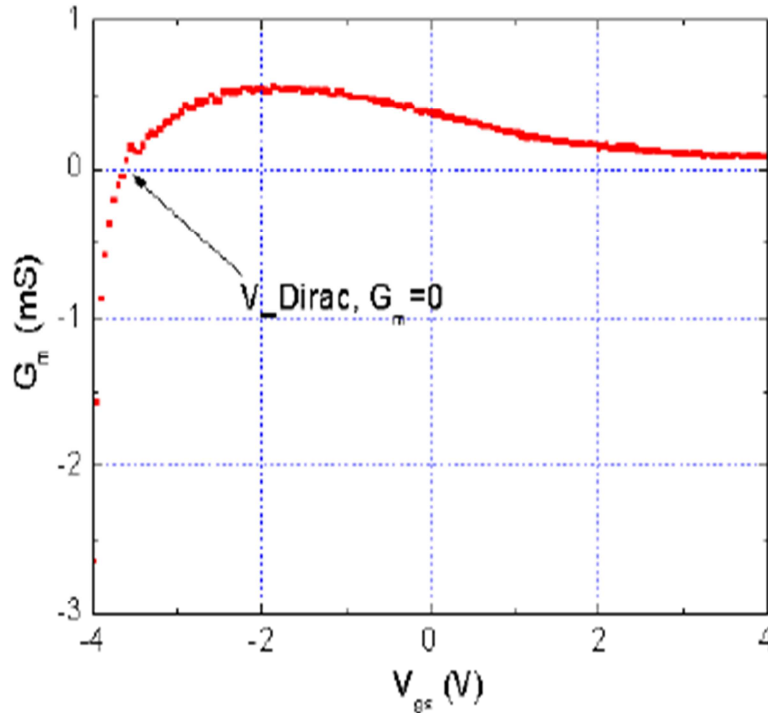


Figure IV.11. : Transconductance G_m calculée à partir $I_{ds}=f(V_{gs})$.

IV.5. Gain en courant :

Avec l'augmentation de la fréquence du signal engendre la diminution du gain en courant noté h_{21} et la fréquence de coupure du gain f_T déduite de la fréquence de transition pour laquelle $|h_{21}|$, le gain peut alors s'écrire ainsi :

$$h_{21} = \left| \frac{2 \times S_{21}}{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12} \times S_{21}} \right| \dots \dots \dots \text{Eq(IV.9)}$$

Application Radiofréquence :

Du fait de la très faible bande interdite du graphène (quelques centaines de meV), le rapport I_{ON}/I_{OFF} du transistor est faible. Il est donc difficile d'imaginer pour l'instant des transistors en graphène pour applications logiques. Par contre grâce aux bonnes mobilités électroniques le transistor en graphène se dédie plutôt à des applications radiofréquence.

Pour ce type d'applications, le courant I_{OFF} du transistor n'a pas besoin d'être très faible.[12]

Chapitre IV: Modélisation des transistors FET à base de graphène

Les transistors au graphène à effet de champ sont considérés la clé des dispositifs en de communication car ces derniers amplifient les signaux et augmentent le gain à très haute fréquence.

Le GFET le plus rapide enregistré jusque là a une fréquence de coupure de $f_t=170$ gigahertz pour des longueurs de canal $L=90$ nm.

Le progrès constant de ces dispositifs RF peut-être amélioré à 350 gigahertz en réduisant les résistances de série :

$$R_{total}=R_S+\left[\frac{e\mu W}{L_G}\sqrt{n_0^2+\left(\frac{C_{tot}}{e}\times(V_{TG}-V_{DRC})\right)^2}\right]^{-1}\dots\dots\dots Eq (IV.10)$$

La fréquence de coupure est donnée comme suit :

$$f_T = \frac{g_m}{(2\pi C_g)} \dots\dots\dots Eq (IV.11)$$

Avec C_g : la capacité de la grille

L'intégration des transistors est réalisée pratiquement de la même manière que pour un transistor classique. Quelques règles de géométrie sont à respecter pour les contacts source et drain. Pour ces technologies, l'intégration avec grille supérieure est obligatoire. Les meilleurs résultats de fréquence de coupure ont été publiés par IBM d'abord sur graphène exfolié puis sur graphène épitaxié et dernièrement sur graphène obtenu par CVD catalytique (le graphène CVD est obtenu sur cuivre ce qui assure un faible nombre de couche). A chaque fois, les longueurs de grille dessinées sont de plus en plus agressives ce qui résulte en des fréquences de coupure de plus en plus élevées.[12]

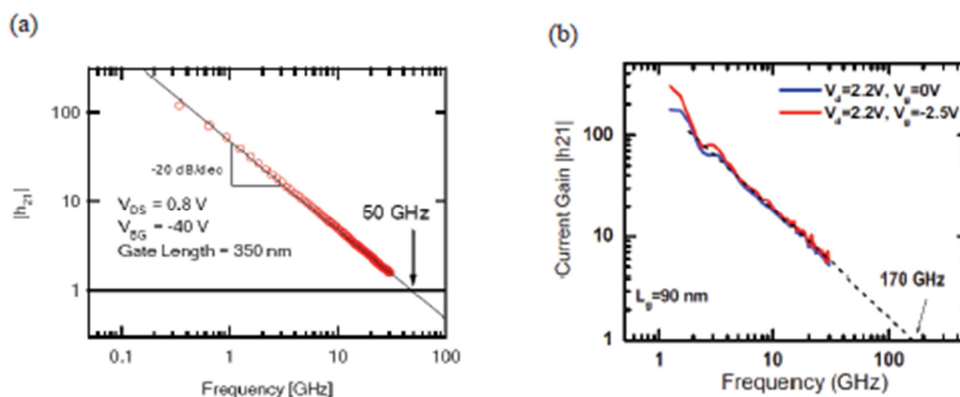


Figure IV.12 : (a) Gain en courant d'un transistor en graphène obtenu à partir de graphène exfolié. (b) Gain en courant d'un transistor en graphène obtenu à partir de graphène épitaxié..

Chapitre IV: Modélisation des transistors FET à base de graphène

Pour le graphène exfolié : Les courbes de la figure montrent que La fréquence de coupure mesurée est de 50 GHz pour une longueur de grille de 350 nm.

Pour le graphène épitaxié : La fréquence de coupure mesurée est de 170 GHz pour une longueur de grille de 90 nm.

IBM a pu fabriquer des transistors avec du graphène CVD avec une fréquence de coupure de 155gigahertz avec la longueur de canal la plus courte jusque là $L=40\text{nm}$

Cette fréquence de coupure a pu être réalisée en remplaçant le diélectrique SiO_2 par du diamant.

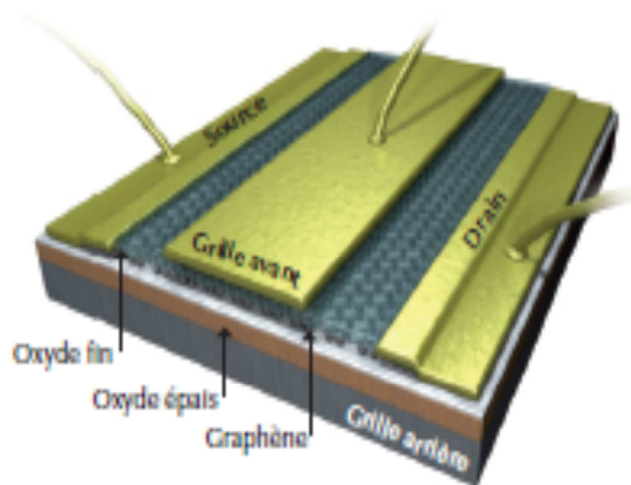


Figure IV.13 : vu d'artiste d'un transistor au graphène

Du graphène mono-layer a été développé sur du cuivre à 1000°C puis déposé sur du diamant, une rangée de transistor a été alors réalisée avec un processus de haut en bas conventionnel.

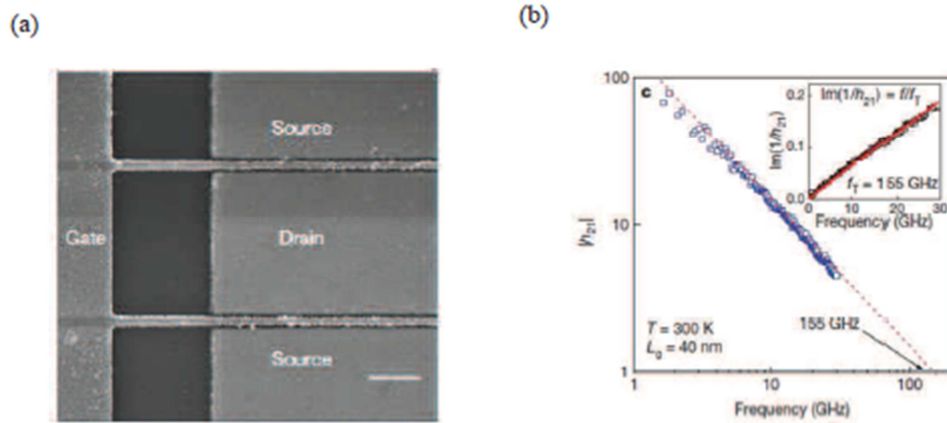


Figure IV.14 : (a) Photographie SEM du transistor RF avec canal en graphène obtenu sur cuivre par dépôt et transféré sur diamant. La longueur de grille du transistor est de 40 nm et une distance de 20 nm est assurée entre la grille et les contacts permettant des résistances séries faibles. (b) Performance du transistor RF, une fréquence de coupure de 155 GHz est mesurée.

Conclusion :

L'émergence de la microélectronique pour surmonter les défis physiques auxquelles est soumise la technologie d'aujourd'hui a conduit à l'étude de nouveaux matériaux pouvant surmonter les limites qui peuvent survenir dans les transistors conventionnels.

Les modèles cités dans ce travail ont été développés pour convenir à des transistors FET à base de graphène comme il présente également une étude détaillée de la variation de la transconductance et la fréquence de transition avec une longueur de canal de 100 et 440 nm. Comme il a été démontré que les meilleurs résultats obtenus et pour la fréquence de transition, courant de drain ou transconductance ont été obtenus pour des longueurs de canal réduites.

Comme il a été prouvé que la modélisation de ces FETs à base de graphène donne un large terrain d'exploitation dans des applications nouvelles notamment radiofréquences dont les efforts à fournir seraient de réduire les résistances de contacts et d'optimiser la structure du FET pour la réalisation du but de fréquences élevées.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le Graphène ce matériau tant étudié, a été pendant longtemps purement conceptuel il s'avère aujourd'hui que c'est un des matériaux les plus prometteurs pour l'électronique du futur. Le graphène est donc de nos jours un candidat idéal pour son intégration dans des circuits flexibles tel que des smart phones, téléviseurs à écran flexible, ... Ses propriétés structurales, électroniques et chimiques ont été longtemps étudiées et décrites théoriquement depuis les années 1940, Mais le véritable essor le graphène ne l'a vu qu'en 2004 avec l'isolation pour la première fois d'un feuillet unique de graphène depuis du graphite, on a alors mis à disposition des chercheurs le premier matériau bidimensionnel qui a rapidement inspiré la communauté scientifique internationale.

Effectivement ce matériau carboné bidimensionnel dont les propriétés intrinsèques sont tout à fait exceptionnelles comme on a pu le voir dans ce travail, à la fois robuste, flexible; transparent avec des fréquences de coupures élevées ; Il est démontré qu'il n'est pas convoité que pour ses qualités électronique, il possède aussi des qualités mécanique, on peut le voir comme rigide dans un plan mais tout à fait flexible or du plan ainsi dans le but d'une commercialisation rapide de ces dispositifs, des équipes de recherches mettent au point des wafers recouvert de transistor en vu de réaliser des puces qui pourraient vite déboucher sur des processeurs ultra rapides et des systèmes de transmission sans fil offrant une bande passante ultra élevé.

Les transistors à base graphène devraient donc être des milliers de fois plus rapides, plus performant que leur équivalents en silicium, le matériau présentant une mobilité de $200\,000\text{ cm}^2\text{ v}^{-1}\text{ s}^{-1}$ est synonyme de fréquences de transition élevées pour les transistors et applications dans les domaines du gigahertz voir terahertz qui sont maintenant visées.

D'autres applications sont envisageables avec le graphène. La plus prometteuse est l'électrode transparente. Samsung a fabriqué de larges panneaux de graphène sur polymère. Ce graphène peut être intégré sur une cellule photovoltaïque ou un écran tactile. [12]

Bibliographie :

- [1] M.BERD, thèse de doctorat, synthèse, comportement et caractérisation de nanostructures carbonées composites nanotubes/fullerènes (peapods), UMMTO,2013.
- [2] J.CHAST, , thèse de doctorat transistors à nanotubes de carbone unique : propriétés dynamique et résolution d'électrons uniques, Université PARIS 6, 2009.
- [3] J.N.FUCHS, M.O.GOERING, B. PLACAIS, revue scientifique, Le graphène, laboratoire de physique des solides, Université de PARIS SUD et CNRS, 2010.
- [4] G. FROEHLICHER, rapport de stage, Etude par spectroscopie Raman de monocouches de transistors à effet de champ, Ecole normale supérieure de Cachon, juillet 2013.
- [5] N.MENG, thèse de doctorat, Fabrication et caractérisation de transistors à base de graphène nano-ruban en vue d'application haute fréquence, Université de sciences et technologies LILLE 1,2011.
- [6] B.J.M.POUMIROL, thèse de doctorat, Etude des propriétés électroniques du graphène sous champ magnétique intense,INSA Toulouse, 2011.
- [7] R.SREENA, B.BALA, Modelling and performances comparison of graphen and carbone nanotube based FETs, Coimbatore,INDIA, Mai 2015.
- [8] J.A.MORAN, thèse de doctorat, propriétés structurales et électroniques du graphène sur siC étudié par microscopie STM,AFM, PARIS SUD,2013.
- [9] B.SZELAG, thèse de doctorat,Etude des propriétés physiques et électriques de transistors MOS fortement submicronique, Institut national de GRENOBLE, janvier 1999.
- [10] M.CLAVEL; article, Fabrication et caractérisation électrique de transistors à canal en Graphène : Influence de la température de recuit sur les performances des dispositifs, CEA,LETI , GRENOBLE
- [11] G.VINCENZI; these de doctorat , Graphene: FET and Metal Contact Modeling. Graphene, Université PAUL SABATIER TOULOUSE III; 2014
- [12] M.CLAVEL, thèse de doctorat, Etude de l'intégration de transistors à canal en graphène épitaxié par une technologie compatible CMOS

Résumé :

Le graphène : descendant du carbone c'est le premier système bidimensionnel jamais obtenu, isolé pour la première fois en 2004 par une équipe de chercheurs de l'université de Manchester ce qui leur a valu le prix Nobel de physique de l'année 2010, au-delà de sa structure cristallographique hors normes celui-ci présente des propriétés fascinantes notamment une mobilité intrinsèque qui dépasse toutes celles enregistrés sur les matériaux utilisés en technologie jusque-là , 200 fois celle du silicium et pas que , le graphène est aussi un matériau très léger ; flexible.....

C'est alors un matériau très convoité et donne suite à nombre d'applications qui pourraient révolutionner le monde de la technologie.

Mots clés :

Carbone ,Graphène, GNR, GFET, GNR FET, DG FET.....