

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master II

Spécialité : Electronique

Option : Matériaux et Dispositifs Electroniques et Photovoltaïques

Thème :

Le Poly Vinyl Phenol (PVP) et l'oxyde de silicium (SiO_2) comme isolants de grille pour des transistors organiques à effet de champ

Proposé par :

Mme O. BOUGHIAS

Réalisés par :

ZAID Tassadit
REBAH Ouardia

Remerciement

*Nous remercions notre DIEU qui nous a aidé à faire
ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier vivement notre dévoué
promotrice M^{me} O. BOUGHIAS pour son encadrement, pour sa
contribution à travers sa disponibilité, son temps, son expérience et ses
conseils qu'elle nous a prodigués qui nous ont beaucoup éclairés et à
travers lesquels nous avons apprécié l'utilité de notre mémoire*

*Nous remercions vivement les membres de jury qui nous feront
l'honneur d'évaluer notre travail.*

*Nos remerciements les plus chaleureux s'adressent à tous (tes) nos
amis (es) et tous ceux qui ont contribué de près et de loin à la
réalisation de ce travail.*

*Nous remercions tous ceux qui croient à la science et au
Savoir.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents

A mes frères et sœurs

A ma famille

A mes Ami(e) s

A tous ceux et celles qui me sont chér (e) s.

Tassadit

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents

A mes sœurs

A ma famille

A mes ami (e) s

A tous ceux et celles qui me sont chér (e) s.

Ouardia

Table de Matière

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les transistors MOSFETs

Introduction	
I.1 Description de MOSFET.....	3
I.2 Différents types de transistors MOSFET.....	4
I.2.1 MOSFET à enrichissement.....	4
I.2.2 MOSFET à appauvrissement	5
I.3 Principe de base d'un transistor MOSFET.....	6
I.4 Différents types de canal pour un transistor MOSFET	7
I.5 Régimes de fonctionnement d'un transistor MOSFET.....	8
I.6 Caractéristiques électriques d'un transistor MOSFET.....	11
Conclusion	

Chapitre II : les propriétés physiques des matériaux organiques

Introduction	
II.1 Matériaux organiques.....	13
II.1.1 Les différents types des matériaux organiques semi-conducteurs.....	13
II.2 Définition d'un semi-conducteur organique.....	16
II.2.1 Molécules conjuguées.....	16
II.3 Origine de la conductivité.....	17
II.4 les polymères et les petites molécules.....	18
II.5 Conduction dans les semi-conducteurs organiques	23
II.6 Transport de charges	23
II.7 Origine des porteurs de charges.....	24
II.8 Propriétés des polymères π -conjugués	24
II.10 Applications.....	25
Conclusion	

Table de Matière

Chapitre III : Etude comparative entre les transistors organiques & inorganiques

Introduction	
III.1 Différentes géométries des transistors organiques.....	27
III.1.1 La structure Bottom Contact (BC).....	29
III.1.2 La structure Top Contact (TC).....	30
III.1.3 La structure Top Gate (TG).....	31
III.2 Les avantages et les inconvénients des quatre géométries.....	33
III.3 Paramètres essentiels pour caractériser un OTFT.....	33
III.3.1 La mobilité	33
III.3.2 Le rapport Ion/Ioff.....	34
III.3.3 La tension de seuil	35
III.4 Différentes étapes pour réaliser un transistor organique de type BottomGate Top Contact (BGTC).....	35
III.4.1 Gravure de l'ITO.....	36
III.4.2 Dépôt de la couche isolante.....	37
III.4.3 Dépôt d'une couche active de pentacène par évaporation sous vide.....	39
III.4.4 Dépôt des électrodes source et drain.....	41
III.5 Matériaux utilisés.....	41
III.5.1 Les substrats.....	41
III.5.2 Les contacts Grille, Source et Drain.....	41
III.5.3 semi- conducteur.....	42
III.5.4 Les isolants des Grille.....	43
III.6 Etude de deux structures de transistors organiques de type BGTC avec ITO/PVP/Pn et Si ⁺⁺ /SiO ₂ /Pn.....	45
III.7 Comparaison des deux séries de transistors.....	48
III.8 Comparaison entre les transistors organiques et les transistors inorganiques avec le Pentacène comme couche active pour les deux séries	52
Conclusion	
Conclusion générale	54
Bibliographie	62

Table des figures

Chapitre I

Figure I.1 :structure schématique de base de transistor Métal-Oxyde-Semi-conducteur	4
Figure I.2 :différents types des transistors MOSFET.(a) :PMOS , (b) :NMOS.	6
FigureI.3 :Effet de champ dans un transistor MOSFET.....	7
FigureI.4 :différents types de canal pour un transistor MOSFET à canal surfacique ; b) à canal enterré.....	8
FigureI.5 :Différents régimes de fonctionnement en fonction de V_{DS}	10
FigureI.6 :Réseau de caractéristique $I_{DS}=f(V_{DS})$ d'un transistor MOSFET.....	11

Chapitre II

Figure II.1 :différents types de semi-conducteurs organiques	14
FigureII.2 :différents pigments utilisés dans les cellules solaires organiques.....	15
FigureII.3 :exemple de polymère conducteur, le PPV (poly-phénylvénylène).....	16
FigureII.4 :représentation de la molécule d'éthylène. A : molécule d'éthylène,B:représentation des orbitales sp ² et pz du carbone et des orbitales 1s de l'hydrogène.....	17
Figure II.5 :structure de bandes des polymères conducteurs.....	17
Figureii.6 :représentation des deux modèles de base des structures moléculairesfonctionnalisées.....	18
Figureii.7 : formation d'un polymère à partir d'un monomère.....	19
Figure II.8 : exemples des petites molécules et les polymères.....	20
Figure II.9 : dopage de semi-conducteur inorganique.....	22
Figure II.10 : dopage des polymères conjugués.....	22
Figure II.11 : Transistor organique à effet de champ (OFET).....	26

Chapitre III :

Figure III.1 :les différentes structures d'un transistor organique.....	28
Figure III.2 : Structure Bottom Gate Bottom Contact d'un transistor organique.	29
Figure III.3 : Structure Bottom Gate Top Contact d'un transistor organique.....	30
Figure III.4 : Structure grille au-dessus d'un transistor organique.....	32

Table des figures

Figure III.5: les étapes de gravure de l'ito.....	37
Figure III.6: schéma de principe d'un dispositif expérimental de dépôt à la tournette.....	38
Figure III.7 : schéma de principe d'un évaporateur sous vide.....	39
Figure III.8 : procédé de dépôt par évaporation sous vide.....	40
Figure III.9: structure chimique du pentacene.....	42
Figure III.10: formule semi-développée du PVP.....	43
Figure III.11 motif de base de la silice.....	45
Figure III.12: représentation plane du réseau de la silice (a) cristalline et (b) amorphe.....	45
Figure III.13 : gravure et nettoyage de l'ito.....	46
Figure III.14: dépôt de la solution d'un polymère isolant sur le substrat verre/ITO.....	47
Figure III.15: dépôt de la couche active par évaporateur sous vide.....	47
Figure III.16 : dépôt des électrodes source et drain par évaporation à vide.....	48
Figure III.17 : Structure du transistor à effet de champ de type BGTC, (a) avec isolant de grille le PVP et (b) l'oxyde de silicium comme isolant de grille.....	48
Figure III.18 : Caractéristiques de transfert des deux séries de transistor à effet de champ avec (a) isolant de grille l'oxyde de silicium (Si avec une couche $\text{SiO}_2 \sim 20 \text{ nm}$), longueur du canal $\sim 100 \mu\text{m}$ pour $V_{DS} = -40 \text{ V}$ et (b) couche isolante PVP $\sim 1 \mu\text{m}$, longueur du canal $\sim 100 \mu\text{m}$ à $V_{DS} = -15 \text{ V}$	49
Figure III.19 : caractéristiques de sortie d'un transistor à effet de champ avec une couche isolante le PVP $\sim 50 \text{ nm}$, longueur du canal $\sim 100 \mu\text{m}$ et $W=4 \text{ mm}$ [14].....	49
Figure III.20 : caractéristique de sortie d'un transistor à effet de champ avec du silicium (Si avec une couche de $\text{SiO}_2 \sim 20 \text{ nm}$), longueur du canal $\sim 100 \mu\text{m}$ et $W=4 \text{ mm}$	50
Figure III.21 : caractéristique de sortie pour la première série de transistor et la deuxième série, avec le pentacene comme couche active pour les deux séries de transistors organiques à effet de champ, avec une tension de grille $V_{GS} = -30 \text{ V}$	51

Tableaux :

Tableau III.1 : récapitulatif des avantages et des inconvénients de chaque géométrie	33
Tableau III.2 : comparaison entre les deux séries de transistors.....	51

ABRÉVIATION :

MIS	Métal-Isolant-Semi- conducteur	PS	polystyrène
MOSFET	Métal-oxyde- Semi- conducteur-Field Effect- Transistor	PET	polyéthylène téréphtalate
FET	Field Effect Transistor	PE	Polyéthylène
MOS	Métal- oxyde- Semi- conducteur	OM	orbitales moléculaires
W	La largeur du transistor	N	Electrons
L	La longueur du transistor	P	Trous
LDD	Light Doped Drain	Li	Lithium
Si₃N₄) :	nitruire de silicium	Pt	platine
NiSi) :	siliciure de nickel	SCO	Semi-conducteur Organique
G	La grille	SCI	Semi-conducteur intrinsèque
S	La source	OLED	Diode électroluminescente organique
D	Le drain	OFET	Transistors organiques à effet de champs
V_{GS}	La Tension de grille	OPVs	les cellules photovoltaïques organiques
V_{DS}	La Tension de drain	ITO	Indium Tin Oxyde
X_j :	La profondeur des jonctions source et drain	Si	silicium
T_{ox} :	Oxyde de grille	SiO₂	Oxyde de silicium
L_{eff}	Langueur effective du canal	PMMA	poly (méthacrylate deméthyle)
V_{th}	La Tension de seuil	TC	Top Contact
I_{DS}	Le Courant de drain	BC	Bottom Contact
PCBM	phenyl-C61-butyric acid methyl ester.	TG	Top Gate
PVP	poly (4-vinyl-phénol)	BGTC	BottomGate Top Contact
HOMO	HighestOccupiedMolecular Orbital	TCO	Oxydes transparents conducteurs
LUMO	LowestUnoccupiedMolecular	THF	(Tétra Hydro Furane)

P3HT	poly (3-hexylthiophène)	μFET	La mobilité des porteurs de charge à effet de champ
OTFT	OrganicThin Film Transistor	TFT	thinfield transistor
(AlO_x)	l'oxyde d'Aluminium	C_i	est la capacité par unité de surface de l'isolant de grille
PET	Poly Ethylène Téréphtalate	Pn	Pentacène
PPC	Poly Phényle Carbonate	HCL	Acide chlorhydrique
δ	liaison simple de carbone	(δ+π)	double liaison

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction Générale

Le besoin de nouveaux dispositifs plus fiables et plus puissants pousse le développement de la microélectronique. Parmi les différentes façons de ce développement, l'utilisation de matériaux organiques, qui prend une place importante dans la technologie de la recherche actuelle.

L'électronique organique présente plusieurs avantages par rapport à l'électronique inorganique, parmi ces avantages, le faible coût du processus de fabrication et la flexibilité de son support de fabrication. La nouvelle technologie ne cherche pas à compléter l'électronique à base de silicium. Cependant, cela peut être une alternative pour certaines applications. L'objectif est d'améliorer les performances des composants électroniques à base de matériaux organiques.

La plupart des dispositifs électroniques sont basés sur la technologie de silicium, qui est un matériau très efficace mais coûteux à produire, il est alors important de remplacer ce matériau semi-conducteur par des matériaux organiques qui sont moins coûteux, légers et flexibles pour développer les dispositifs électroniques et optoélectroniques.

Les transistors organiques à effet de champ sont apparus à la fin des années 80, ils présentent une alternative aux transistors inorganiques pour quelques applications comme les circuits logique/mémoire bistable pour la réalisation d'étiquettes intelligentes de type RFID (Radio Frequency Identification), les circuits de commande pour, les capteurs de gaz et les détecteurs optique (phototransistors). Ces applications nécessitent que ces composants soient performants, ils doivent présenter une bonne stabilité à l'air libre et une durée de vie acceptable. Alors le challenge technologique qui doit être résolu au cours des années qui viennent est la durée de vie de ces dispositifs car les matériaux organiques semi-conducteurs sont sensibles à l'oxygéné et à l'humidité, mais ils peuvent présenter des avantages incontestables sur les technologies classiques comme par exemple : la souplesse, la transparence et les procédés d'élaboration à bas coût sur des grandes surfaces.

L'électronique organique est devenue un sujet de recherche très important. Cette matière organique appelée Polymères présentent la possibilité d'être déposés en couche minces dans des conditions bas coût afin de réaliser des composants élémentaires comme les cellules photovoltaïques (OPV), les diodes électroluminescentes ou encore les transistors à effet de champ (OFET). Les transistors organiques sont intéressants car leurs procédés de

Introduction Générale

fabrications sont moins complexes et moins coûteux que leurs équivalents à base de matériaux inorganiques.

L'objectif de ce travail consiste à faire une étude comparative entre deux séries de transistors organiques à effet de champ avec deux isolants différents, à savoir le poly (4, vinylphénol) (PVP) et l'oxyde de silicium (SiO_2). Une comparaison des propriétés électriques et physiques des deux structures de transistors à effet de champ va se faire.

Le travail est organisé de la manière suivante :

Nous avons consacré le premier chapitre à une étude approfondie des transistors classiques à effet de champ de type Métal/Oxyde/Semi-conducteur (MOSFETs). Nous présentons la structure de base des transistors à effet de champ les MOSFETs, ainsi que leur principe de fonctionnement. Nous avons étudié les caractéristiques électriques d'un transistor à effet de champ.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les matériaux organiques et les différents types des matériaux organiques semi-conducteurs, isolants et conducteurs. Ensuite nous présentons les propriétés électriques et physiques des polymères- π -conjugués et l'origine des porteurs de charges. Nous avons défini les matériaux organiques qui feront l'objet de cette étude.

Le dernier chapitre, est consacré à une étude comparative entre deux séries de transistors organiques à effet de champ, la première série nous avons le polyvinylphenol(PVP) comme isolant de grille et la deuxième série nous avons utilisé l'oxyde de silicium (SiO_2) comme isolant de grille. Nous avons cité les différentes étapes de réalisation d'un transistor organique à effet de champ. Ensuite, nous avons comparé les caractéristiques électriques des deux séries de transistors.

Nous terminons par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Introduction :

Les transistors inorganiques à effet de champ sont basés sur la structure MIS (Métal-Isolant-Semi-conducteur) dans leur fabrication.

Le transistor MOSFET a la particularité de contrôler la densité de porteurs de charges, dans le canal de conduction, par l'effet d'un champ électrique à travers l'oxyde de grille. Le canal est relié de part et d'autre part à deux régions fortement dopées par implantation ionique ou par diffusion thermique appelées Source et Drain. Les deux contacts sont formés dans le substrat de chaque côté de la grille, entre lesquelles est appliquée une tension donnant lieu à la circulation d'un courant électrique. Ce transistor n'est qu'un élément d'une famille très vaste de composants dits FET (Field Effect Transistor), utilisant l'effet de champ pour moduler l'intensité du courant dans le canal de conduction. A la différence des transistors bipolaires le courant n'est constitué que d'un seul type de porteurs de charges (électrons ou trous). Ils sont appelés transistors unipolaires.

I.1 Description d'un MOSFET:

Le transistor MOSFET est un dispositif quadripolaire constitué d'une grille (G), d'une source (S), d'un drain (D) et d'un substrat appelé aussi Bulk (B) (voir la figure 1.1).

La longueur du transistor, notée L correspond à la longueur de sa grille et sa largeur est notée W . Nous considérerons par la suite un transistor à canal surfacique, c'est-à-dire dont la conduction est assurée par les porteurs minoritaires du substrat (électrons dans le cas d'un nMOSFET et trous dans le cas d'un pMOSFET), la conduction se fait à l'interface entre le diélectrique de grille et le substrat[1].

Le MOSFET est constitué Schématiquement du substrat recouvert d'une très fine couche d'oxyde ($0.1 \mu\text{m}$) sur laquelle est déposée l'électrode de grille (qui va commander la quantité de charges dans la région sous grille, c'est-à-dire le canal de conduction), il est constituée de silicium polycristallin, souvent appelé polysilicium, cette électrode est isolée du substrat par un diélectrique. Deux régions dites source et drain sont réalisées de part et d'autre de la grille, qui sont les électrodes latérales elles sont réalisées par dopage à dégénérescence du substrat, qui est dopée N^+ ou P^+ .

Une différence de potentiel appliquée entre la grille et le substrat, crée dans le semi-conducteur un champ électrique perpendiculaire à l'interface oxyde/semi-conducteur, ce champ électrique va repousser les porteurs majoritaires de la proximité de l'interface et attire les minoritaires. Il se crée alors un canal sous la grille qui couvre tout l'espace entre le drain et la source entre les quels est appliquée une différence de potentiel (V_{DS}).

La grille et le drain sont polarisés positivement par rapport à la masse contrairement à la source qui est connecté à la masse, comme le montre la figure 1[1]:

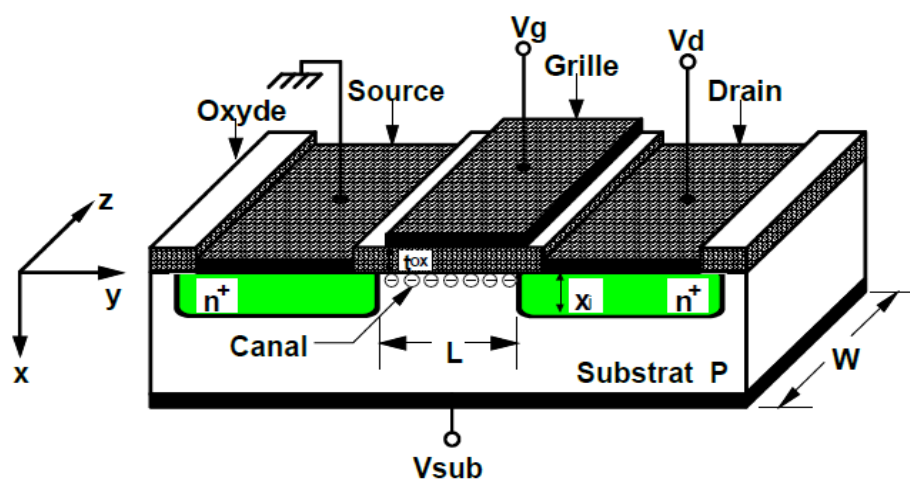


Figure I.1 : structure schématique de base du transistor Métal-Oxyde-Semi-conducteur [2].

I.2 Différents types de transistors MOSFET :

Les deux types fondamentaux de MOSFET sont :

les MOSFET à appauvrissement (déplétion) dit D-MOSFET, et les MOSFET à enrichissement (Enhancement) dit E-MOSFET. Dans chaque type de MOSFET, on peut distinguer le MOSFET à canal N (le courant provient du déplacement des électrons) et le MOSFET à canal P (le courant provient du déplacement des trous).

I.2.1. MOSFET à enrichissement :

Lorsqu'on applique une tension positive à la grille elle donne naissance à un champ électrique perpendiculaire à l'interface, ce champ va chasser les trous au voisinage de ce dernier, les électrons de la région 'n' vont diffuser au niveau de la surface du substrat et ils formeront un canal 'n' entre la source et le drain, il y'a création d'un canal par

enrichissement. On a chassé les trous qui sont les porteurs majoritaires dans le substrat, en les a remplacer par des porteurs minoritaires qui sont les électrons, inversion de la nature des porteurs.

Le canal qui est peuplé de porteurs négatifs, va permettre le passage d'un courant de la source vers le drain lorsqu'on applique une tension de drain $V_{DS} > 0$.

Plus la tension de grille (V_{GS}) augmente, plus l'épaisseur de la couche d'inversion devient importante, mais la couche d'inversion ne prend naissance que lorsque la tension de grille est supérieures à la tension de seuil ($V_{GS} > V_T$).

Les transistors MOS à enrichissement sont bloqués sans tension de commande sur la grille (NORMALLY OFF), ils deviennent passants à partir d'une certaine tension de grille V_{th} [1].

I.2.2. MOSFET à appauvrissement :

On considère qu'on travaille avec un transistor à canal 'n', si $V_{GS}=0$, $V_{DS} > 0$, le courant I_{DS} est passant, lorsque on applique une tension ($V_{GS} < 0$) elle va créer un champ électrique perpendiculaire à l'interface. Ce champ va induire des charges positives (trous) dans le canal ce qui le rendra moins conductible.

Plus la tension de grille (V_{GS}) est négative, plus le courant de drain (I_{DS})diminue, ce qui fait que les électrons disparaissent du canal par recombinaison avec les trous induit par (V_{GS}).

La chute de tension dans le canal est plus forte quand on s'éloigne de la source, ce qui explique que l'appauvrissement du canal est plus prononcé côté drain.

Les transistors MOS à appauvrissement sont passants sans tension de commande sur la grille (NORMALLY ON), ils deviennent de moins en moins conducteurs au fur et à mesure que la tension de commande augmente pour finalement se bloquer au-delà d'une tension de blocage V_{Gsoff} [1].

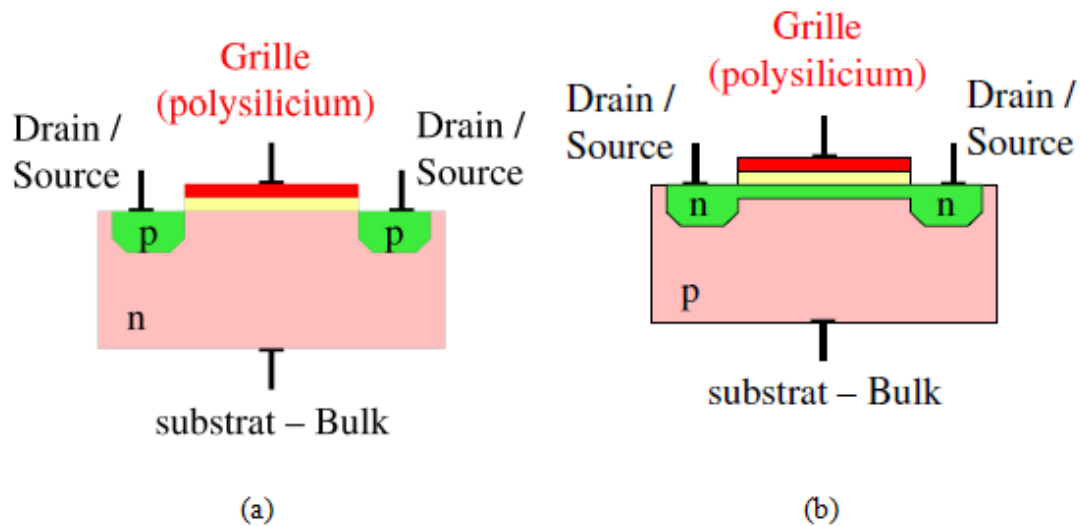


Figure 1.2 :différents types des transistors MOSFET : (a) PMOS, (b) NMOS

Remarque :

Le MOSFET à appauvrissement peut fonctionner en mode enrichissement, il suffit de changer la polarité de (V_{GS})c'est-à-dire la rendre positive, ce qui fait que le champ électrique appliqué changera de sens et il poussera les électrons du canal .

I.3Principe de base d'un transistor MOSFET :

- **Effet de champ :**

Le principe de base d'un transistor MOSFET repose sur l'effet de champ, qui consiste à moduler de façon électrostatique une densité de charges mobiles dans un semi-conducteur. Cette modulation est provoquée par un champ électrique perpendiculaire (transversal) à la direction du mouvement des porteurs de charges, et agissant entre deux électrodes séparées par un diélectrique, comme dans une capacité plane. La grille (G) commande l'intensité du champ électrique et par conséquent la densité de charges électriques mobiles. Sur les deux contacts source et drain est appliquée une différence de potentiel pour drainer les porteurs de charges minoritaires. La région sur laquelle le potentiel appliqué est le plus élevé est le drain (D), l'autre région la source (S) est généralement reliée à la masse. Le canal conduit plus ou moins de courant en fonction de son niveau de remplissage en charges mobiles. De ce fait,

le transistor MOS peut aussi être considéré comme une résistance modulable électrostatique et reliant deux contacts (source et drain).

En résumé, un transistor MOS peut être considéré comme une capacité plane, à la différence près que les charges l'une des faces sont mises en mouvement latéral. Dans cette structure, la tension de grille (V_{GS}) commande la quantité de charges dans le canal et la tension de drain (V_{DS}) les met en mouvement[3].

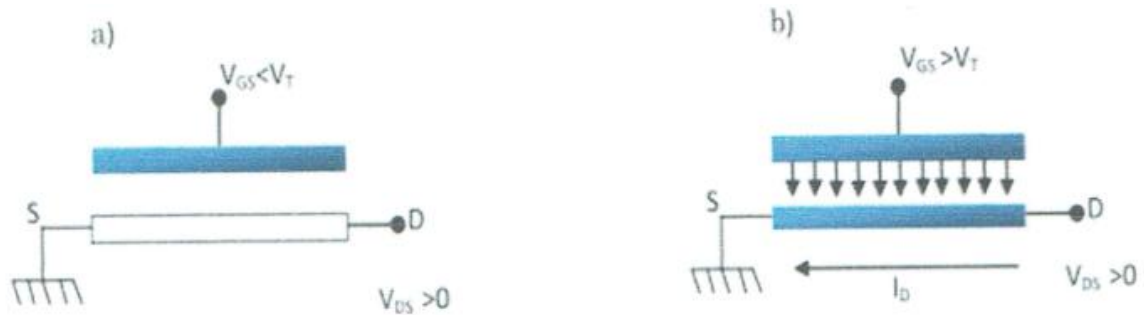


Figure 1.3 :effet de champ dans un transistor MOSFET [1].

Si, la grille est polarisée avec une tension V_{GS} (grille-source); les charges sont mises en mouvement par l'intermédiaire d'un champ électrique longitudinal lié à l'application d'une tension entre le drain et la source (V_{DS}). La source sert de référence de potentiel, elle est reliée à la masse. Les tensions V_{GS} et V_{DS} permettent de contrôler le courant qui passe dans le canal. Les paramètres qui caractérisent un transistor MOSFET conventionnel sont : le dopage du canal N_A , la profondeur X_j des jonctions source et drain, la longueur de masque L entre drain et source, la largeur de masque W et l'épaisseur T_{ox} de l'oxyde de grille [1].

I.4 Différents types de canal pour un transistor MOSFET :

Chacun des deux transistors (pMOS et nMOS) peut avoir une construction à canal « surfacique » ou à canal « enterré ».

Le canal surfacique (aussi appelé canal d'inversion) est induit électro-statiquement par l'effet de champ, il est de type des porteurs minoritaires du substrat, N ou P donc opposé à la nature du substrat d'où le nom d'inversion. Il est de même type que les régions source et drain, pour rendre le passage du courant possible. Notons que si, la couche d'inversion n'est pas créée par l'effet de champ, la structure se réduit à deux diodes en tête-bêche (jonction N^+PPN^+)

pour un NMOS ou P^+NNP^+ pour un PMOS; aucune conduction n'est alors possible (voir la figure I.6).

Le canal enterré (aussi appelé canal d'accumulation) est un canal constitué par une fine couche fixe (dite enterrée) du semi-conducteur dopé, du même type de conduction que les régions source et drain. Si cette couche est suffisamment épaisse, le passage du courant est autorisé même sans l'effet de champ, car le canal représente une résistance (N^+NN^+). Une polarisation positive de la grille pour le NMOS (négative pour le PMOS) induit une accumulation de porteurs dans le canal, augmentant ainsi le niveau de conduction. Une polarisation contraire, négative pour le NMOS (positive pour le PMOS), appauvrit le canal de porteurs libres, le rendant ainsi bloqué pour la conduction (voir la figure I.4) [3].

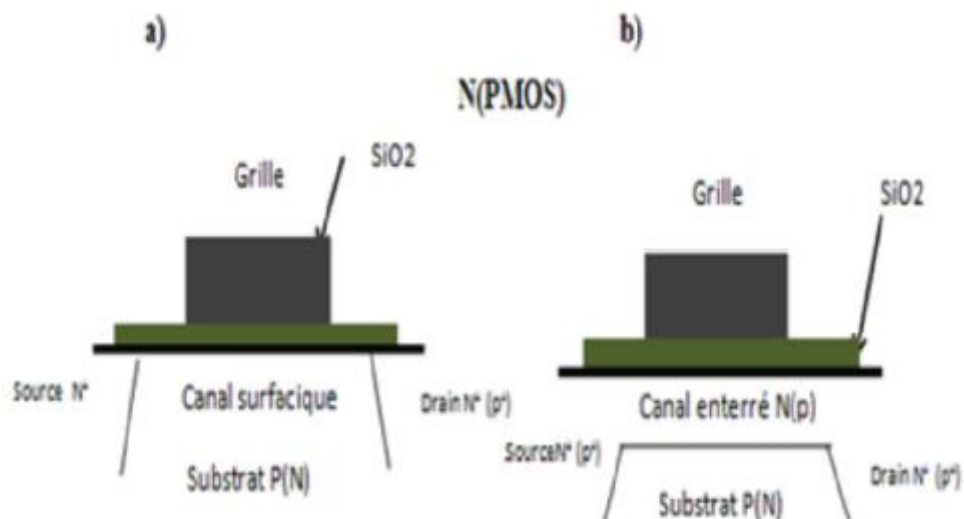


Figure I.4 : différents types de canal pour un transistor MOSFET

a) à canal surfacique ; b) à canal enterré.

I.5 Régimes de fonctionnement d'un transistor MOSFET :

Une fois les porteurs mobiles induits dans le canal de conduction par effet de champ, le flux de courant I_{DS} peut survenir. Pour comprendre le fonctionnement d'un Transistor MOS, il est indispensable de remarquer qu'à la modulation de la résistance du canal par l'effet de champ (appliquer une tension V_{GS}), s'additionne une autre modulation provenant de la polarisation du drain, d'où la polarisation du canal entre la source et le drain. Apparition d'un potentiel variable en chaque point de sa longueur. Tenant compte du fait que la grille est

équipotentielle, cela implique que la tension à travers le diélectrique de grille est non uniforme, ce qui signifie une résistivité du canal variable en chaque point.

En fonction de l'importance de la polarisation de drain, nous pouvons distinguer trois régimes d'opération du transistor MOSFET [3] :

❖ Régime linéaire

Quand V_{DS} est faible et négligeable devant V_{GS} , l'effet de champ est quasi uniforme le long du canal, qui se comporte comme une résistance indépendante de la polarisation du drain. Par conséquent, la caractéristique ($I_{DS} - V_{DS}$) est linéaire, le canal se comporte comme une résistance. Le MOSFET fonctionne en régime ohmique ou linéaire. Dans cette zone, le courant reste linéaire avec la tension de drain appliquée :

$$I_{DS} = \frac{\mu W C_{ox}}{L} (V_{GS} - V_{DS}) V_{DS} \quad (1-1)$$

I_{DS} : courant de drain

V_{GS} : tension de la grille

V_{DS} : tension de drain

W : la largeur de la grille

L : la longueur de la grille

On Remarque que le courant I_{DS} croit linéairement avec les tensions V_{GS} et V_{DS} [3].

❖ Régime de pincement

Quand V_{DS} n'est plus négligeable devant V_{GS} , le potentiel le long du canal est considérable du côté drain, ce qui entraîne une réduction de la densité de porteurs libres dans la couche d'inversion, cette dernière peut disparaître complètement quand :

$$V_{DS} = (V_{GS} - V_{TH}) = V_P \quad (1-2)$$

V_{DS} : tension de drain

V_{GS} : tension de la grille

V_{TH} : tension de seuil

V_P : tension de point de pincement

Le canal devient, par conséquent, de plus en plus résistif. Cela se produit par une augmentation de I_{DS} rapide jusqu'à une saturation complète au point de pincement. La zone entre le régime linéaire et le point de pincement est appelée zone de raccordement ou zone de transition [3].

❖ Régime de saturation :

Quand V_{DS} est plus grand devant $(V_{GS}-V_{TH})$, le champ électrique côté drain change d'orientation et le point de pincement se déplace légèrement vers la source. Le potentiel au point de pincement est constant et indépendant de V_{DS} . Cette saturation est due au pincement du canal qui se crée proche de l'électrode de drain.

En effet, une zone de déplétion apparaît du côté de l'électrode de drain jusqu' au point de pincement et empêche la conduction du canal. Ainsi les porteurs sont de plus en plus repoussés du côté de la source lorsque la tension de drain augmente [3].

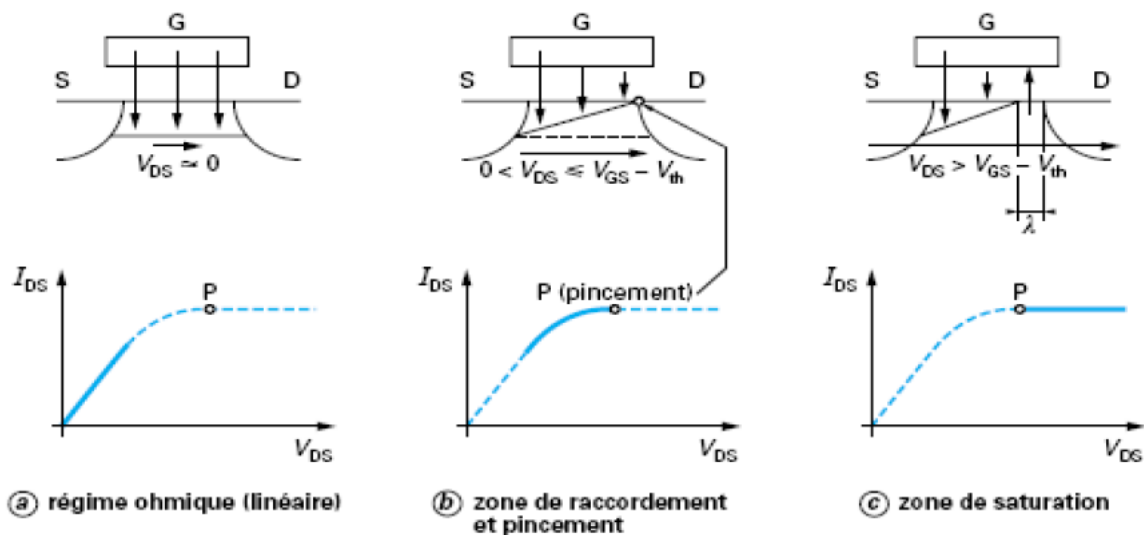


Figure I.5 : différents régimes de fonctionnement d'un MOSFET en fonction de V_{DS} .

I.6 Caractéristiques électriques d'un transistor MOSFET :

Un transistor MOSFET est caractérisé par deux courbes principales : la courbe de sortie et la courbe de transfert. La caractéristique de sortie ($I_{DS} = f(V_{DS})$) nous renseigne sur l'existence des trois régimes de fonctionnement d'un transistor MOSFET, donc le bon fonctionnement du transistor. La caractéristique de transfert ($I_{DS} = f(V_{GS})$), nous permet d'extraire les paramètres électriques d'un transistor MOSFET. Citons par exemple : la tension de seuil, le rapport I_{ON}/I_{OFF} , la mobilité des porteurs de charges dans le canal de conduction, la vitesse de commutation...etc.

Pour étudier la réponse en courant de notre dispositif MOSFET sous une tension de drain, il faut tracer la caractéristique I_{DS} en fonction de V_{DS} , selon la valeur de l'amplitude de cette tension appliquée au niveau de drain, deux régimes de fonctionnement sont distingués [3]:

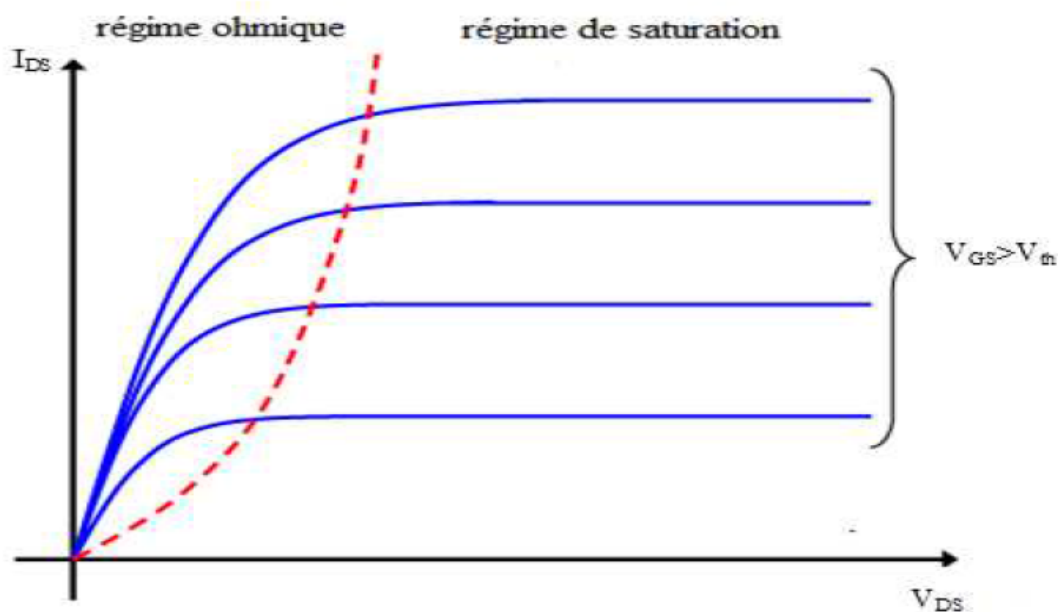


Figure I.6:réseau de caractéristique $I_{DS}=f(V_{DS})$ d'un transistor MOSFET.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons rappelés les notions de base des transistors inorganiques à effet de champ. Ainsi étudié la structure de base d'un transistor MOSFET, son principe de

Chapitre I Généralités sur les transistors MOSFETs

fonctionnement et les différents types de transistor. Nous avons étudié les caractéristiques électriques d'un transistor MOSFET.

CHAPITRE II

Introduction :

Les matériaux organiques, appelés aussi matières plastiques, à la différence des métaux sont réputés ne pas conduire un courant électrique. A la fin de l'année 1970, Alan J Heeger, Alan GMacDiannid et HidekiShiraka ont montrés qu'après des modifications, le plastique peut devenir conducteur d'électricité « métal synthétique »[4].

Les matériaux organiques peuvent se classer en deux catégories : les petites molécules (oligomères) et les polymères. Ils sont déposés en films minces, le plus souvent par évaporation sous vide pour les premières, et par spin coating pour les seconds. La différence entre ces matériaux se situe au niveau de la taille de la molécule.

II.1 Matériaux organiques :

Un semi-conducteur organique présente des propriétés similaires aux semi-conducteurs inorganiques. La conduction pour les semi-conducteurs organiques est assurée soit par les électrons ou bien par les trous, sinon par les deux types de porteurs de charges, citons l'exemple des transistors ambipolaires. Ces matériaux ont donné naissance à l'électroniqueorganique (électronique des plastiques). On dit 'organique' par opposition aux semi-conducteurs inorganiques, tel 'le silicium'.Toutefois, dans les cristaux organiques formés par des molécules contenant des lienspolymères, les électrons peuvent circuler librement, ce qui permet une conductionélectrique comparable aux matériaux inorganiques [2].

II.1.1 Les différents types des matériaux organiques semi-conducteurs :

Les matériaux organiques semi-conducteurs peuvent être classés en trois catégories selonleurs propriétés mécaniques:

Solubles, insolubles et cristaux liquides qui sont classés à leurs tours en oligomères(molécules avec une structure qui se répète régulièrement et constituée que de quelques unités)ou en monomères (molécules avec une structure constituée d'une seule unité) ou enpolymères (molécules qui ont plus de 10 unités).Les oligomères et les monomères absorbent de la lumière visible, ceux sont deschromophores, soit ils sont des colorants (solubles) soit des pigments (insolubles). Ceclassement est montré sur la figure ci-dessous [4] :

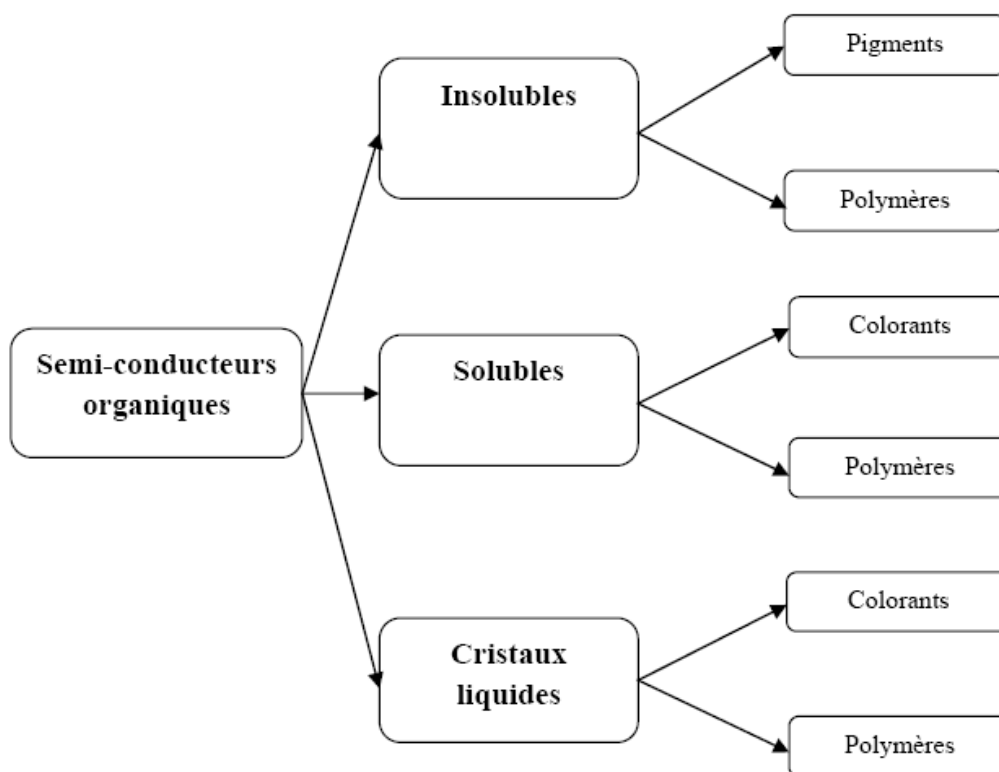
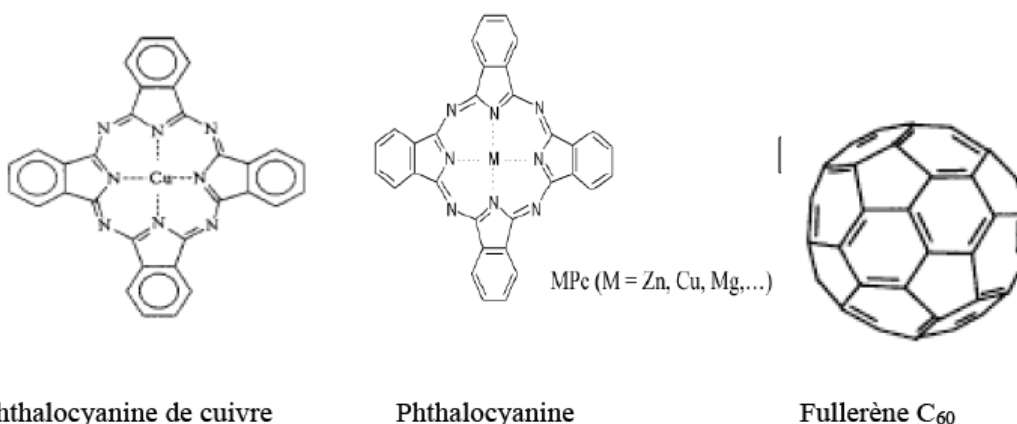
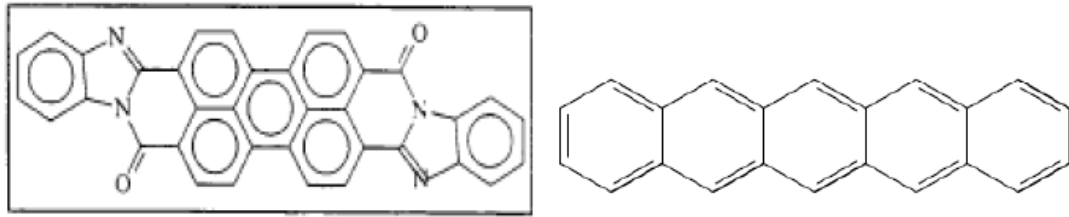


Figure II.2 : différents types de semi-conducteurs organiques.

a. Pigments :

Parmi ces pigments, citons par exemple : le pérylène, le phthalocyanine, le fullerène (C₆₀) qui sont très utilisés dans le domaine photovoltaïque et le pentacene qui est utilisé dans les transistors organiques. Dans l'industrie, la fabrication des cellules solaires organiques à base de ces pigments nécessite une technique qui est la méthode d'évaporation sous vide. Alors, ces pigments peuvent être synthétisés par l'ajout des solubles adaptés aux chaînes de molécules (colorants) [5].





PV (dérivé du pérylène)

Pentacène

Figure II.3 : différents pigments utilisés dans les cellules solaires organiques.

b) Colorants :

Comme les dérivées de fullerène soluble tel que le PCBM peuvent être synthétisés et utilisées dans les cellules solaires organiques, qui sont obtenues par la technique sol-gel Spin-on (tournette) [5].

c) Polymères :

Selon leur structure moléculaire et leur composition chimique, ils peuvent être : solubles, insolubles ou des cristaux liquides, ils sont utilisés aussi dans les cellules solaires organiques comme donneur ou accepteur d'électrons [5].

d) Cristaux liquides :

Ces matériaux présentent des propriétés situées entre celles des liquides et celles des solides, c'est pourquoi on peut les considérer comme étant des solides cristallins qui présentent des propriétés mécaniques semblables à celles des liquides, c'est-à-dire qu'elles sont molles. Pour la nouvelle technologie, ces matériaux sont plus avantageux pour les cellules solaires organiques à cause de leur mobilité de charge suffisamment grande et une importante longueur de diffusion des excitons [5].

II.2 Définition d'un semi-conducteur organique :

Un semi-conducteur organique est un composé organique sous la forme d'un cristal ou d'un polymère, qui montre des propriétés similaires aux semi-conducteurs inorganiques, ces propriétés sont la conduction par les électrons et les trous, ainsi que la présence d'une bande interdite. Ces matériaux ont donné naissance à l'électronique organique ou électronique des plastiques. Le principal constituant des semi-conducteurs organiques est l'atome de carbone [5].

II.2.1 Molécules conjuguées :

Les polymères (ou petites molécules) semi-conducteurs sont des polymères conjugués. La chaîne principale doit alterner des liaisons de carbones simples et des liaisons doubles. Comme il sera détaillé par la suite, celles-ci sont délocalisées, ce qui permet le transport de charges à travers la molécule. La figure suivante présente la structure d'un polymère isolant : le PVP.

PPV



Figure II.4 : exemple de polymère conducteur, le PPV (poly-phénylvinylène).

Les liaisons carbone-carbone (C-C), dites covalentes, lient deux atomes identiques et résultent en un partage des électrons périphériques qui se déplacent alors sur des orbitales moléculaires communes aux deux atomes. Ces liaisons moléculaires s'obtiennent par superposition des orbitales atomiques. Ainsi, dans l'atome de carbone, les quatre électrons de valence se répartissent entre l'orbitale 2s et les trois orbitales 2p (p_x , p_y et p_z). Une liaison (carbone-carbone) née de la superposition d'une des trois orbitales atomiques hybridées sp^2 de chaque carbone [10]. Quant aux orbitales sp^2 des deux carbones, qui pointent perpendiculairement aux autres orbitales hybridées sp^2 , elles se chevauchent pour former une liaison π [5]. Pour illustrer ces propriétés, nous montrons l'exemple de la molécule d'éthylène sur la (figure II.5) [4].

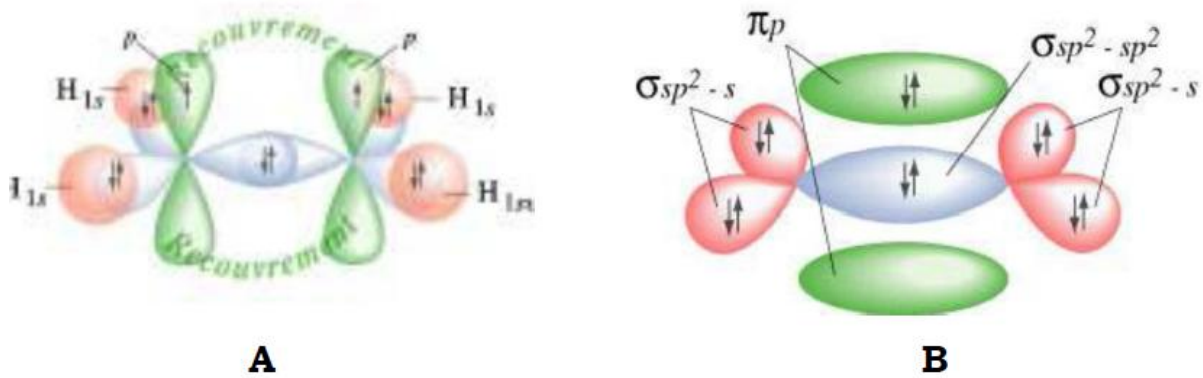


Figure II.5: représentation de la molécule d'éthylène. A: molécule d'éthylène, B:représentation des orbitales sp^2 et p_z du carbone et des orbitales $1s$ de l'hydrogène.

II.3 Origine de la conductivité :

Lorsque deux orbitales atomiques s'associent, elles donnent naissance à une orbitale moléculaire. Celle-ci peut avoir deux niveaux d'énergie. Dans le cas de la liaison π , la plus basse énergie π est dite liante, formant la bande de valence : HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital), alors que la plus haute π^* est dite anti-liante, formant la bande de conduction : LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital). L'écart d'énergie entre les deux bandes d'énergie est le gap.

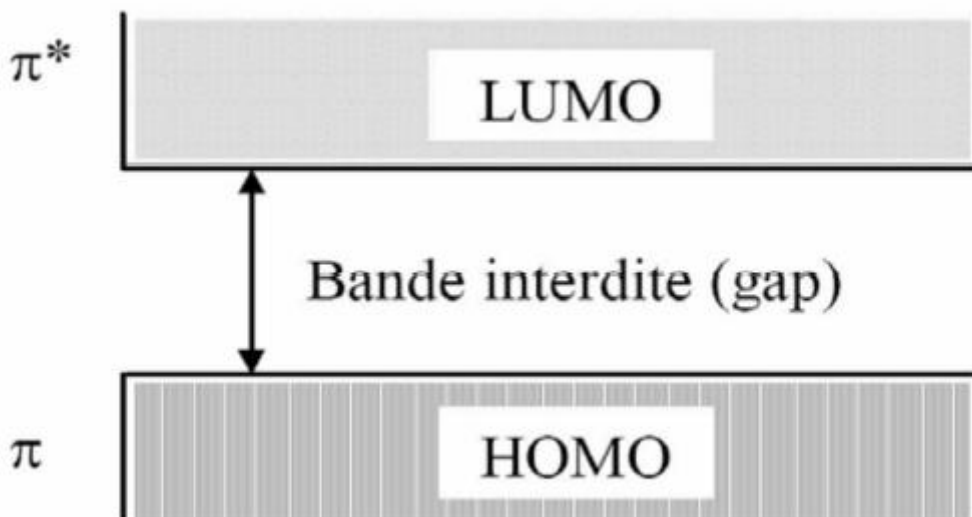


Figure II.6 : structure de bandes d'énergies des polymères conducteurs.

Le caractère semi-conducteur d'un matériau organique est dû aussi à la présence d'un système conjugué, c'est-à-dire à l'alternance de liaison carbone simple (δ) et de liaison double ($\delta+\pi$).

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont des exemples de ce type de semi-conducteur. Comparativement aux matériaux conducteurs classiques, les polymères conducteurs ont une grande résistance. Pour augmenter leur conductivité électrique, on peut les dopés par des métaux conducteurs [4].

II.4 les polymères et les petites molécules :

La technique de dépôt des polymères est défini selon le type du substrat (plastique, verre....etc..), le domaine de l'application et la nature du matériau organique. La (figure II.7) présente les structures chimiques de deux moléculaires rencontrées dans le domaine de l'électronique et de l'optoélectronique organiques. La première structure est un polymère semi-conducteur de type p largement utilisé dans les transistors organiques, le P3HT (poly (3-hexylthiophène)). La seconde structure est une petite molécule, le pentacène avec cinq cycles de benzène, c'est un semi-conducteur de type p.

- les polymères,
- les petites molécules,

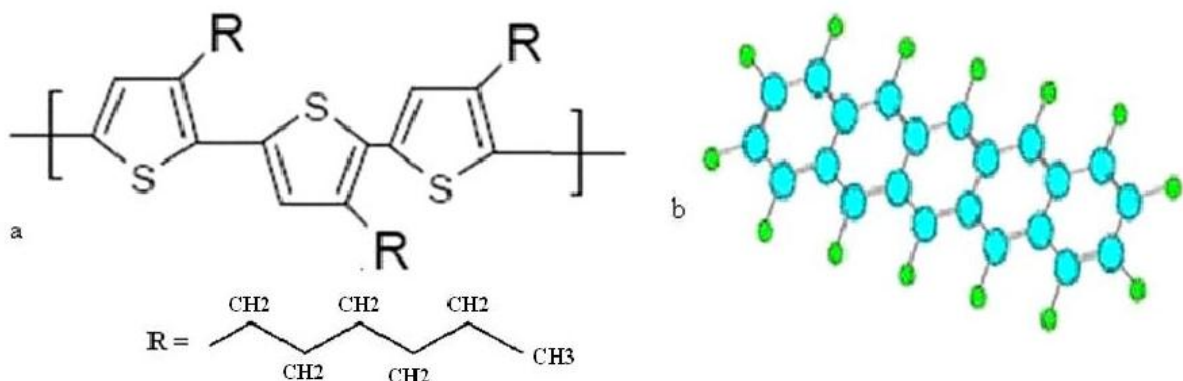


Figure II.7 : représentation des deux modèles de base des structures moléculaires fonctionnalisées.

Les spécialistes des dispositifs photosensibles préfèrent les petites molécules, en raison du rendement quantique photon-électron qui y est plus élevé. Par contre, pour l'électronique, l'école de Cambridge préfère les polymères, car elle pense que la délocalisation électronique

Chapitre II propriétés physiques des matériaux organiques

propriétés physique et mécaniques (flexibilité, souplesse....) des polymères sont conditionnées par :

- Leurs masses.
- Leurs structures.
- La température du milieu [3].

Les polymères sont, par contre, souvent mis en œuvre par des techniques de type voie humide: tournette, tirage, impression jet d'encre (ink jet printing), et par impression de motifs (screen printing). La simplicité de ces techniques de fabrication confère aux polymères un intérêt croissant pour les dispositifs en grande surface. Cependant, la structure des films moléculaires obtenue est en général faiblement organisée, ce qui n'aide pas au transport de charges. Ainsi, les petites molécules présentent des mobilités qui peuvent atteindre quelque $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, alors que les mobilités maximales pour les polymères sont de l'ordre de quelques $10^{-1} \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ et même entre $10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ et $10^{-2} \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ [6].

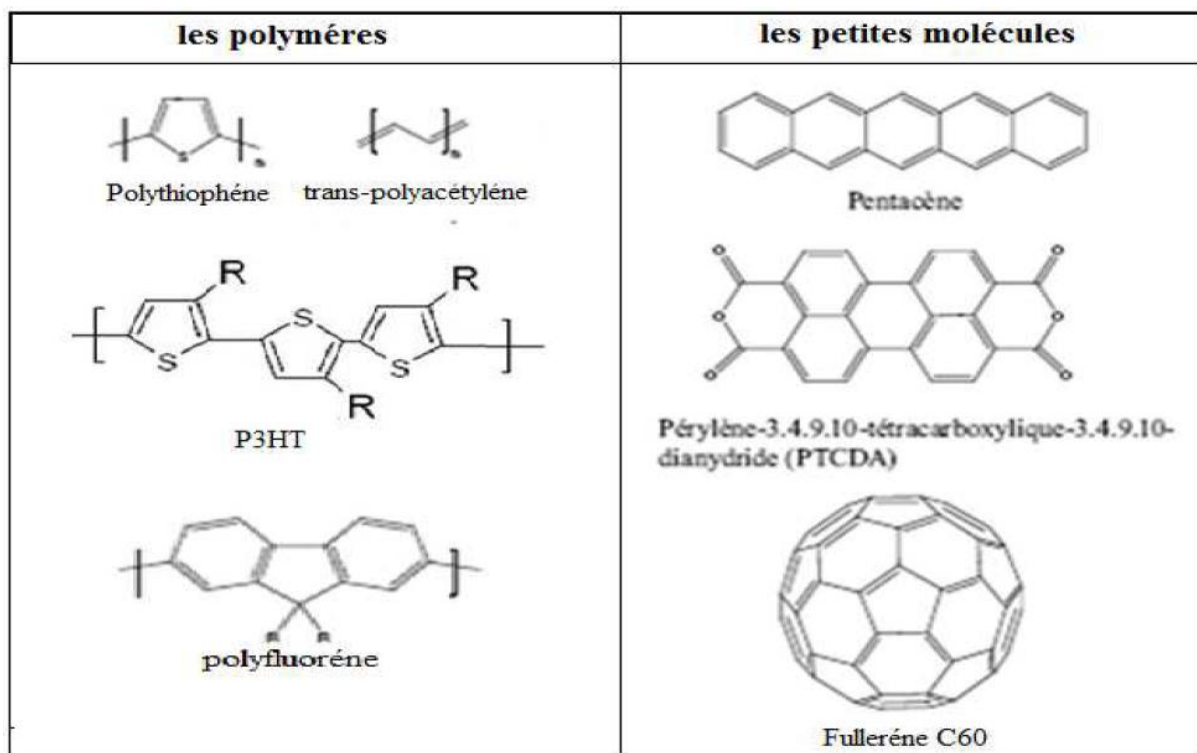


Figure II.9 : exemples des petites molécules et des polymères

On peut les classer en trois catégories :

1. Les polymères isolants :

Les polymères classiques (non conjugués) sont dits saturés : par exemple dans le polyéthylène PE $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ chaque atome du carbone est hybridé sp^3 et ne peut former que les liaisons σ avec les atomes voisins. Les transitions électroniques ne peuvent se produire qu'entre le niveau liant σ et anti liant σ^* et l'énergie entre les niveaux étant de l'ordre de 6 eV. Ces polymères saturés sont des polymères isolants [3].

2. Les polymères conjugués :

Un polymère conjugué est composé d'une répétition de segments conjugués d'atomes de carbones hybridés sp^2 chaque segment contribue aux propriétés électroniques du polymère pour créer une structure électronique de bande très similaires à celle des semi-conducteurs inorganiques. La structure de bandes des polymères conjugués provient de l'interaction des différentes orbitales moléculaires (OM) de chaque monomère [3].

3. Les polymères conducteurs

Pour obtenir un polymère conducteur on effectue une modification chimique de polymère semi-conducteur avec une opération appelée dopage. Le dopage des polymères conjugués diffère de celui des semi-conducteurs classiques. Origine du dopage des semi-conducteurs classiques provient de l'introduction des donneurs (dopage de type n) par implantation ionique. Du fait de la rigidité du réseau cristallin le diagramme des bandes d'énergies du matériau n'est pas modifié et le dopage de type n et p provient par introduction dans le bas de la bande de conduction (ou le haut de la bande de valence) un niveau délocalisé comme le montre la (figure II.10) [3].

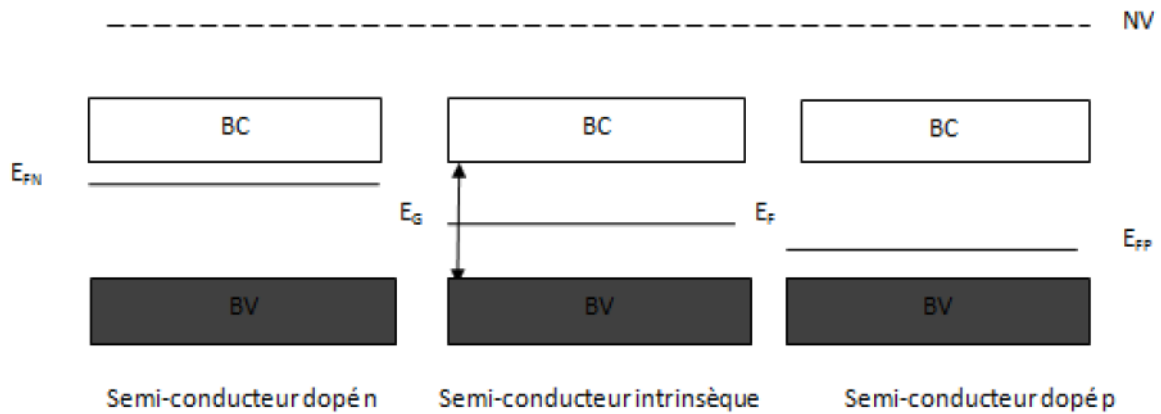


Figure II.10 : dopage de semi-conducteur inorganique.

En revanche, le dopage des polymères conjugués se fait par une réaction d'oxydation du polymère. Celle-ci peut être effectuée soit par voie électrochimique ou par exposition du matériau à des gaz, soit en solution contenant des espèces oxydantes (type p) ou réductrices (type n). Lorsqu'une charge est introduite dans la chaîne du polymère, elle engendre une déformation de la chaîne due au fort couplage électron-phonon.

Après la déformation du réseau cristallin, les états appartenant aux bandes de valence et de conduction sont fortement modifiés. Ils bougent et apparaissent comme des états localisés dans la bande interdite (figure II.11). Cette situation est différente du cas classique d'un schéma de bandes rigides [3].

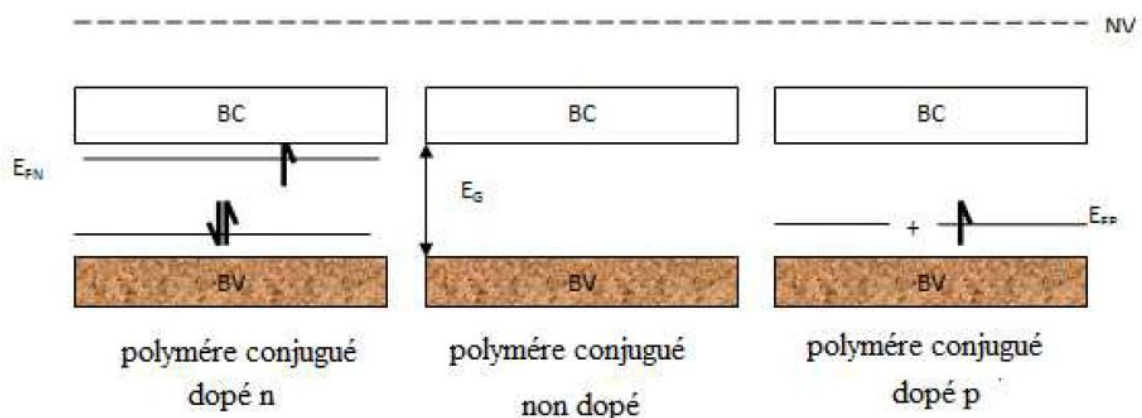


Figure II.11 : dopage des polymères conjugués.

Il existe différentes méthodes de dopage [3] :

- Dopage chimique
- Dopage électrochimique

- **Dopage chimique :**

Doper un polymère consiste à donner (réduire) ou à extraire (oxyder) des électrons au matériau dopé. Ce mécanisme entraîne des modifications sur la structure de la molécule (géométrie) ainsi sur les propriétés électriques et optiques des polymères (couleur). Ce type de dopage peut se faire soit en phase gazeuse, les agents dopants et le polymère sont alors introduits dans une enceinte sous vide primaire, soit en phase liquide en mélangeant en solution le polymère conjugué et les agents dopants.

- **Dopage électrochimique :**

Dans ce cas, le polymère à doper est placé sur une électrode métallique plongé dans une solution organique. L'application d'une tension entre cette électrode et l'électrode de référence qui est faite à base de Lithium (Li) ou platine (Pt), entraîne par le passage d'un courant électrique, l'ionisation du polymère et par conséquent, son dopage. Ce type de dopage est homogène et facilement contrôlable par rapport au dopage chimique.

II.5 Conduction dans les semi-conducteurs organiques :

La conductivité dans un SCO est assurée soit par les électrons ou bien par les trous sinon, par les deux types de porteurs de charges. La circulation des électrons libre dans le recouvrement des orbitales π permet la conduction intramoléculaire mais le transport inter-moléculaire est plus délicat [8].

II.6 Transport de charges :

La conduction électronique dans le cas des matériaux organiques conducteurs et le transport de charges de façon générale, nécessitent au préalable la possibilité de création de porteurs de charge libres.

Chapitre II propriétés physiques des matériaux organiques

Au niveau moléculaire, ceci implique une ionisation facile, soit par éjection des électrons des plus hauts niveaux électroniques occupés de la molécule (HOMO), soit par capture d'électrons dans les plus bas niveaux électroniques inoccupés (LUMO). Cette extraction ou injection de charges est particulièrement aisée dans le cas des composés disposant d'un système d'électrons π délocalisés, c'est-à-dire de composés possédant une structure conjuguée.

Les polymères conjugués peuvent être considérés comme des isolants à faible gap. En pratique, ils comportent un certains nombres de défauts (défauts d'enchainements, résidus de dopants) qui leur donnent le statut de semi-conducteurs extrinsèques, le plus généralement de type p. on parlera de semi-conducteur de type n, lorsque le transport de charge se fait avec les électrons et de type p lorsque les charges mobiles sont des trous (charges positives). Les trous correspondent à une absence d'électrons et se déplacent dans la direction inverse des électrons dans un champ électrique donné [3].

II.7 Origine des porteurs de charges :

La bande interdite des SCO est généralement assez large (1 eV -4 eV), ils sont considérés comme isolants. Ils deviennent conducteurs grâce à l'introduction de charges par :

- injection via un champ électrique. Dans ce cas, le choix du métal est un paramètre important, afin d'avoir un contact le moins résistif possible avec le SCO et defavoriser l'injection des charges, le niveau de Fermi du métal doit être proche du niveau HOMO pour l'injection de trous ou proche du niveau LUMO pour l'injection d'électrons.
- dopage chimique, les impuretés dopantes ne sont pas introduites par substitution dans le réseau cristallin, comme pour les SCI, mais sont introduites à proximité de la chaîne. Le dopage des SCO se fait par réaction d'oxydation (type p) ou de réduction (type n). Les impuretés dopantes n'étant pas liées directement à la chaîne, le processus de dopage peut être réversible. On peut donc assister à une instabilité de la conductivité dans le temps due à un dé-dopage du matériau [8].

II.8 Propriétés des polymères π -conjugués :

Les polymères π -conjugués font partie de la famille des semi-conducteurs organiques. Selon la théorie des bandes (figure 2), un semi-conducteur est un matériau qui possède une bande de valence et une bande de conduction séparée par une largeur de bande interdite assez faible pour qu'il puisse y avoir des transferts de charges. Contrairement à un isolant où la largeur de bande interdite est trop élevée. À l'état neutre, un polymère π -conjugué est un isolant tout comme les plastiques traditionnels alors que lorsqu'il est dopé, il devient un conducteur comme un métal. Toutefois, contrairement aux métaux, les polymères π -conjugués possèdent les caractéristiques mécaniques des plastiques. En effet, les polymères π -conjugués sont légers, flexibles et peu coûteux à produire. De plus, il est possible de fonctionnaliser ces polymères de façon à moduler leur largeur de bande interdite et ainsi moduler les propriétés électroniques du semi-conducteur organique [15].

II.10 Applications :

L'utilisation des semi-conducteurs organiques se trouve dans de nombreuses applications telles que les diodes électroluminescentes organiques (OLEDs), les transistors à effet de champ organiques (OFETs) et les cellules photovoltaïques organiques (OPVs). Nous allons nous intéresser aux transistors organiques.

➤ Les transistors organiques à effet de champ (OFETs) :

Le schéma de la Figure II.12 montre la géométrie d'un transistor à effet de champ. Un isolant de grille (qui peut être un oxyde ou un polymère isolant) est déposé sur une électrode métallique appelée grille d'un côté. De l'autre côté, on dépose la couche active qui est un semi-conducteur organique (le pentacène). Au-dessus de ce dernier on dépose des contacts en métallique (Drain et Source). La tension de grille V_g polarise le diélectrique, des charges apparaissent à l'interface du semi-conducteur et de l'isolant. Il y aura formation d'un canal de conduction. L'application d'une tension électrique entre le drain et la source fait drainer (circuler) les charges et un courant I_D modulable par la tension de grille circulera dans le circuit extérieur [5].

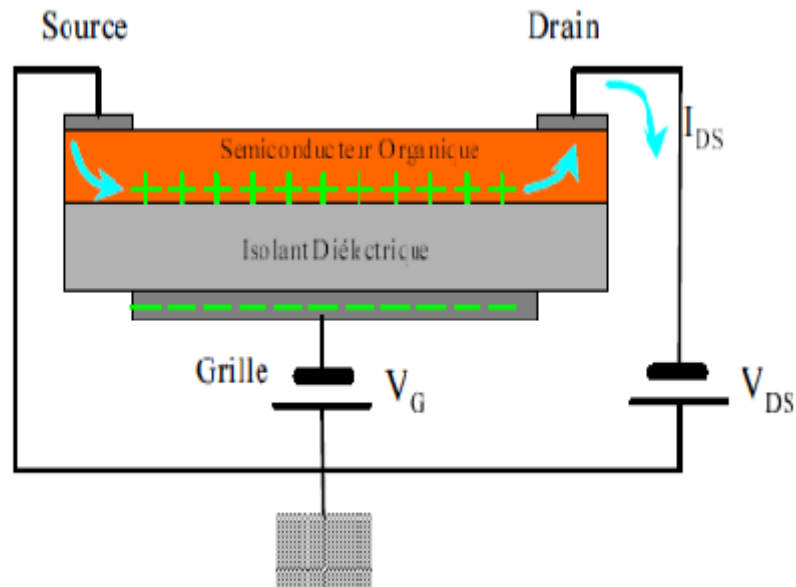


Figure II.12: transistor organique à effet de champ (OFET).

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudiés les propriétés électriques et physiques des matériaux organiques. Ainsila notion des polymères isolants, semi-conducteurs et conducteurs, aussi, nous avons donné une définition d'un transistor organique à effet de champ qui sera le thème de ce travail.

CHAPITRE III

Introduction :

Le domaine de l'électronique organique est en forte croissance. Les travaux sur les premiers transistors organiques datent des années 80 et, depuis, leurs performances n'ont cessés d'être améliorées. La faible conductivité des semi-conducteurs organiques implique que les transistors organiques ne peuvent rivaliser avec les transistors à effet de champ à base de semi-conducteurs minéraux monocristallins, pour les applications qui demandent de grandes vitesses de commutation. Ce qui demande une amélioration des composants à base de matériaux organiques. Les transistors organiques sont intéressants car leurs procédés de fabrications sont moins complexes et moins coûteux que leurs équivalents à base de matériaux inorganiques [6].

Nous allons présenter les différentes structures des transistors organiques et les différentes étapes de réalisation d'un transistor organique de type ITO /PVP/Pentacène et $\text{Si}^{++}/\text{SiO}_2$ /Pentacène. Par la suite, une étude comparative des performances physiques et électriques de ces deux séries de transistors va se faire.

III.1 Différentes géométries des transistors organiques :

Plusieurs géométries de transistors organiques sont envisagées. La figure (III.1) montre les quatre architectures de base en utilisant un empilement classique (structure MIS) des différentes couches d'un transistor. On les classifie comme grille basse (Bottom-Gate) ou grille haute (Top-Gate) selon la position de la grille soit respectivement en-dessous ou au-dessus du semi-conducteur, et contacts au-dessus (Top-Contact) ou contacts en-dessous (Bottom-Contact) en fonction de la position des contacts source et drain par rapport au semi-conducteur.

A l'inverse des MOSFETs classiques où le semi-conducteur est un matériau massif en silicium cristallin, pour les OTFTs la couche active est déposée en couche mince, en effet la structure est généralement renversée, dans le cas des transistors organiques à couche mince (OTFTs), les électrodes source et drain sont de nature métallique (Or en général) dans les OTFTs, alors que dans les MOSFETs, les contacts source et drain sont des semi-conducteurs fortement dopés (dégénéré) et de type opposé au substrat [3].

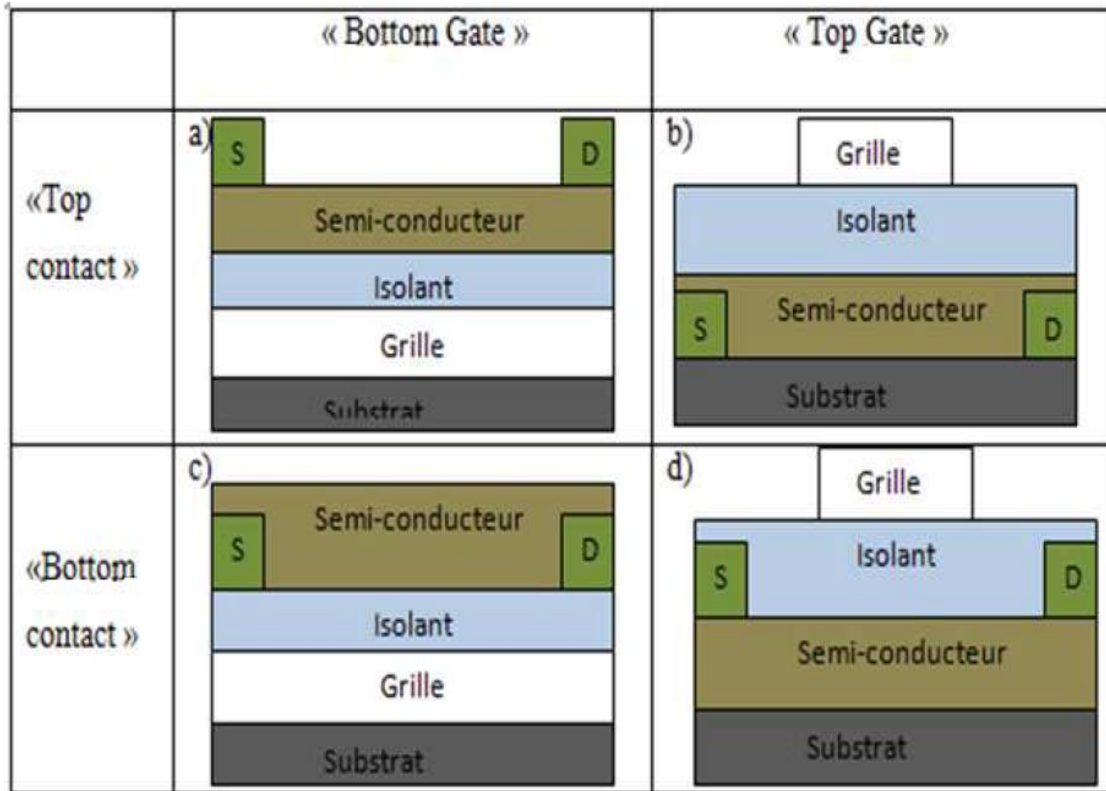


Figure III.1 : différentes structures d'un transistor organique.

Les structures de transistors organiques sont :

- **la structure Bottom Contact** qui est la structure la plus ancienne. Les contacts Source et Drain sont déposés en premier avant la couche active.
- **la structure Top Contact**, qui est l'inverse de la première, les contacts sont déposés en derniers. Cette structure est sensée produire de forts courants, ce qui n'est vrai que si la technologie n'endommage pas certaines parties du transistor.
- **la structure Top Gate** qui est une structure récente, qui peut être intéressante pour certains procédés de fabrication en grandes surface. La grille est déposée en dernier.
- **La structure Bottom Gate** qui présente une grille déposée en premier.

Les deux premières structures sont de type inversé par rapport à celle du MOSFET, c'est à dire que la grille est en-dessous du canal de conduction. Le procédés de fabrication comporte quatre étapes de fabrication, égal au nombre de couches déposées sur le substrat [6].

III.1.1 La structure Bottom Contact (BC):

Cette structure est la structure qui tient le plus compte du risque qu'il pourrait y avoir à détériorer la couche semi conductrice par une quelconque opération technologique ultérieure. La couche active est déposée en dernier et comme c'est un polymère elle est exposée directement à l'air, ce qui limite ces propriétés électriques et physiques.

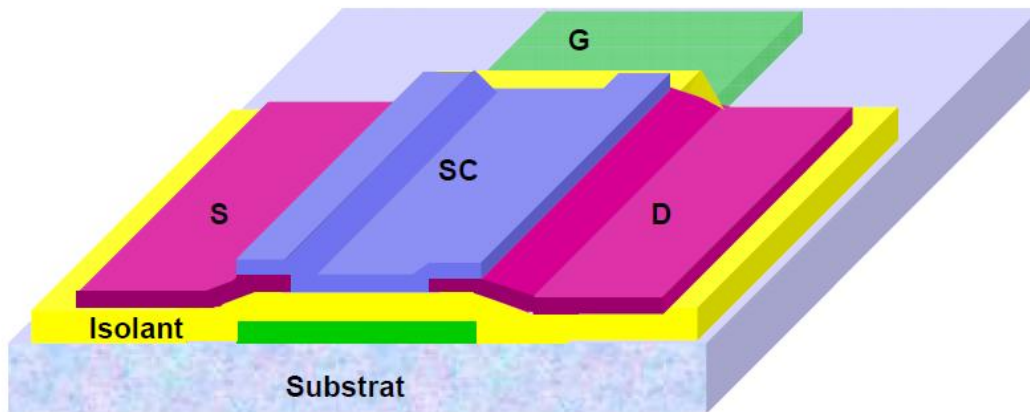


Figure III.2: structure **Bottom Gate Bottom Contact** d'un transistor organique. C'est une structure inversée dans laquelle la grille (G en vert) est la première électrode déposée sur un substrat souvent souple et transparent (marbré). L'isolant de grille (jaune) est la couche déposée en second. Les électrodes source (S) et drain (D) (magenta) sont déposées en troisième position. Enfin, la dernière couche déposée, est celle du semi-conducteur organique (bleu outremer).

Dans cette structure, l'épaisseur de la couche de semi-conducteur est sans importance, puisque ce qui importe est celle du canal de conduction, qui est de quelques nanomètres au plus, en régime d'accumulation et qui se situe à l'interface avec l'isolant. Il vaut mieux que le semi-conducteur soit suffisamment épais pour qu'il recouvre bien les deux électrodes source et drain sans risque de cassure au franchissement de la marche résultant de la présence de la grille en dessous.

Le polymère isolant est souvent déposé à la tournette et permet, dans cette structure, d'isoler deux composants situés côte à côte. Son épaisseur dépend des tensions de grille mises en jeu, donc de la fonctionnalité du transistor. Pour un transistor pilote, où de faibles tensions (< 10 V) sont recherchées pour des problèmes de consommation d'énergie, des épaisseurs inférieures à 50 nm seraient l'idéal avec des isolants classiques comme le poly (méthacrylate

de méthyle) (PMMA) ou le poly (4-vinyl-phénol) (PVP). Toutefois, pour des questions d'équilibre thermodynamique, il n'est pas souhaitable de travailler au-dessous de cette limite. Sinon, pour des épaisseurs élevées (jusqu'à quelques μm), quelques fois imposées par les conditions de dépôt de la source et de drain (court-circuit entre ces électrodes et la grille à travers l'isolant), des tensions de grille aussi fortes que 200 V sont nécessaires.

Les électrodes source et drain peuvent être métalliques, comme par exemple : Au, Cr, Ag et Al. Si, aucune contrainte n'est imposée. Toutefois, l'or est réputé pour établir de bons contacts ohmiques. Lorsqu'il est déposé par évaporation sous vide ou par pulvérisation magnétron continue, à une fâcheuse tendance à diffuser à travers la couche de diélectrique, et à se prêter au court-circuit mentionné ci-dessus. Les polymères conducteurs en solution (PEDOT-PSS, poly (éthyl-dioxy-tiophène)-poly (styrène-sulfide)) peuvent être mis en œuvre dans les procédés par jet d'encre ou par sérigraphie, mais leur faible conductivité électrique pénalise la structure. Pour des électrodes transparentes, on utilise l'ITO (Indium Tin Oxyde, 90% In_2O_3 – 10% SnO_2), dont le dépôt sur un support organique présente toutefois de réelles difficultés [6].

III.1.2 La structure Top Contact (TC) :

A la différence de la structure précédente, le semi-conducteur est déposé en troisième position et le dépôt des électrodes source et drain se fait en quatrième phase du procédé de fabrication d'un transistor organique de type Top Contact (figure III.3).

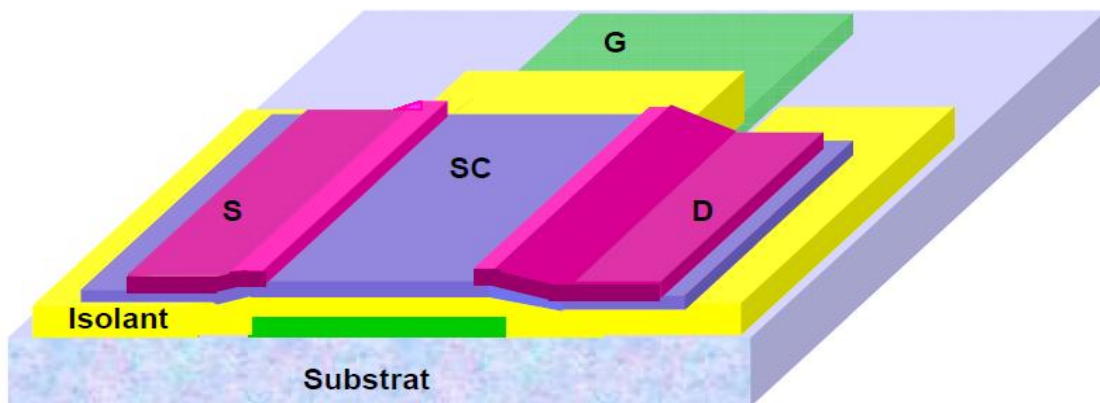


Figure III.3 : Structure **Bottom Gate Top Contact** d'un transistor organique. Le dépôt des électrodes source (S) et drain (D) est en quatrième position des étapes de la fabrication du transistor. C'est-à-dire les étapes 3 et 4 ont été permutées par rapport à la structure précédente.

Le but recherché dans ce type de structure consiste à favoriser et négliger le courant dans le canal au courant ohmique dans l'expression du courant total source-drain. En effet, dans la structure *bottom-contact* où le semi-conducteur est souvent épais parce que la synthèse est réalisée quelques fois in situ (semi-conducteur organique non processible), le courant ohmique devient important avec une simple polarisation de la source et de drain (V_{DS}). Au contraire, avec la structure *top-contact*, il est vraiment nécessaire de bien contrôler l'épaisseur du semi-conducteur. Il y'a même un intérêt à la produire aussi petite que possible afin de rendre négligeable le courant ohmique. Ceci peut se faire avec des épaisseurs inférieures à 30 nm.

Dans le même ordre d'idée de diminution des épaisseurs, la structure *top-contact* se prête bien à un amincissement de la couche de diélectrique. De ce point de vue, pour une tension de grille V_{GS} constante, le PVP de permittivité diélectrique relative qui vaut $\epsilon_r=3,6$ est intéressant par rapport au PMMA dont la permittivité est que de 2,6. Toutefois les états parasites d'interfaces générés par le PVP sont en général plus élevés en densité avec ceux du PMMA, décalant de façon non négligeable la valeur de la tension de bandes plates V_{FB} . Concernant l'isolant, aussi bien en structure *top-contact* que *bottom-contact*, l'usage de SiO_2 , qui nécessite lors de son dépôt des températures élevées (autour de $1100^\circ C$), interdit la mise en œuvre de matériaux organiques aussi bien pour la grille que pour le substrat. Par la suite, pour ce qui concerne l'expérimentation, nous excluons systématiquement ces types de transistor qui n'ont pas d'autre intérêt que de tester le semi-conducteur organique, et ne présentent en électronique aucun avantage sur le MOSFET, par manque de souplesse ou de transparence, ou les deux à la fois [6].

III.1.3 La structure Top Gate (TG) :

Malgré son nom, ce type de structure est loin d'être identique à celle d'un MOSFET, les électrodes source et drain sont en effet sous l'isolant de grille (figure III.4).

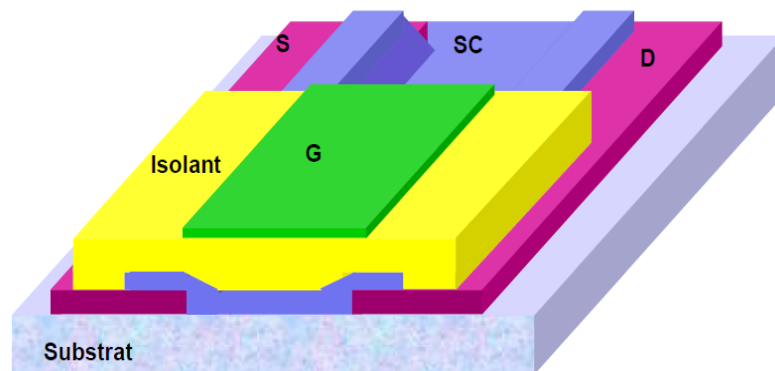


Figure III.4: Structure grille au-dessus d'un transistor organique. L'ordre du dépôt des couches est complètement inversé par rapport à la structure top contact. Il appartient à la couche de semi-conducteur de combler la cavité entre la source et le drain.

Un fort caractère nappant (planarisation en anglais) du diélectrique est ici conseillé, comme d'ailleurs dans les structures précédentes, mais il n'est toutefois pas essentiel. Si la grille n'est pas totalement plane, il n'existe pas de condition critique pour le fonctionnement du transistor. L'intérêt de ce type de structure, plus récente que les précédentes, est apparu avec la mise en œuvre de procédés de dépôt en grande surface, par jet d'encre ou par sérigraphie. Dans ces cas, c'est en effet souvent l'électrode de grille qui est la plus fragile, parce qu'elle est constituée d'un oligomère ou d'un polymère conducteur, à bas point de température de transition, ou de destruction. Son dépôt en dernière étape est donc préférable. Cette structure a un second avantage, elle permet l'usage d'un semi-conducteur pas très stable à l'air. En effet la couche de diélectrique placée au-dessus du semi-conducteur l'isole de la présence de l'oxygène et de la vapeur d'eau de l'air libre [6].

III.2 Les avantages et les inconvénients des quatre géométries :

	Avantages	Inconvénients
Top Gate Top Contact	-Courants de fuite réduits. -Etude de semi-conducteur organique non stable à l'air.	-Risque de détériorer la couche active lors du dépôt de diélectrique. -Traitement des électrodes non envisageables.
Top Gate Bottom Contact	-Possibilité de traiter les électrodes avant le dépôt de SCO. -Courants de fuite réduits.	-Risque de dissoudre ou de détériorer la couche active lors de dépôt de diélectrique.
Bottom Gate Top Contact	-Meilleur contact Electrode/semi-conducteur organique.	-Traitement des électrodes non envisageables.
Bottom Gate Bottom Contact	-Possibilité de traiter les électrodes avant le dépôt de SCO.	-Rupture de continuité de croissance de SCO à l'interface électrode/canal.

Tableau III.1 : récapitulatif des avantages et des inconvénients de chaque géométrie [3].

III.3 Paramètres essentiels pour caractériser un OTFT :

III.3.1 La mobilité :

La mobilité est un paramètre clé pour les performances des transistors. Elle détermine la vitesse de déplacement des charges à l'intérieur de la couche active, sous l'influence d'un

champ électrique donné. Ce paramètre est aussi directement relié à la vitesse de commutation d'un dispositif.

La mobilité est un point faible de l'électronique organique. Le PPV (polymère) par exemple a une mobilité de l'ordre de 10^{-4} cm^2/Vs et le pentacène (petite molécule) présente une mobilité de $6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Cette dernière est équivalente à celle dans le silicium amorphe mais reste loin des valeurs atteintes dans le silicium poly-cristallin : 50 à 100 cm^2/Vs ou le silicium monocristallin d'environ 1000 cm^2/Vs .

La mobilité est l'objet de toutes attentions, car sa faible valeur dans les matériaux organiques par rapport aux références usuelles (silicium en particulier) est une sérieuse limite pour des nombreuses applications [3].

III.3.2 Le rapport $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$:

Le courant I_{off} est le courant en l'absence de toute polarisation sur l'électrode de grille (pour une tension de grille V_G inférieure à la tension de seuil V_{th}). Ce courant résulte, la somme de deux courants : le courant de fuite à travers le diélectrique et celle de perte à travers le semi-conducteur entre la source et le drain.

Le rapport $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ est le rapport entre le maximum et le minimum de courant de drain pour un V_{DS} donné en régime de saturation il caractérise la capacité d'un dispositif de passer d'un état passant (On) à l'état bloqué (Off). Dans un transistor organique, le canal n'est pas isolé du volume de semi-conducteur et on trouve donc un courant ohmique I_{Ω} en parallèle avec le courant de conduction dans le canal.

Pour les applications des transistors organiques le rapport de courant doit être important, donc il est nécessaire d'améliorer ce rapport $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$. Pour cela il faut augmenter I_{on} et diminuer I_{off} .

Pour augmenter I_{on} , il faut jouer sur la géométrie du transistor car le courant de drain I_{DS} à saturation (I_{DSat}) est proportionnel au rapport W/L (en augmentant la largeur du canal et en diminuant sa longueur) on peut obtenir de plus grands rapport $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$.

Le courant I_{off} peut être diminué par l'optimisation de l'épaisseur de semi-conducteur organique. La purification de matériaux organiques avant le dépôt permet d'éliminer des impuretés et donc de réduire la diffusion des porteurs à une tension de grille nulle [3].

III.3.3 La tension de seuil :

La tension de seuil V_{th} est la tension de grille minimale à appliquer pour qu'un courant I_{DS} apparaisse entre la source et le drain. Idéalement, V_{th} est très proche de 0 car au-delà de 0V ($V_{GS} < 0$ dans le cas de trous), on a une accumulation de charges et une augmentation de la conductivité de canal. Si la tension de grille appliquée V_{GS} est inférieure à la tension seuil V_{th} , le transistor revient en position OFF et retrouve la faible conductivité naturelle du semi-conducteur organique. En réalité la présence de pièges à l'interface semi-conducteur/diélectrique conduit à la diminution de la tension seuil V_{th} soit vers les tensions négatives (type p) soit vers les tensions positives (type n) [3].

III.4 Différentes étapes pour réaliser un transistor organique de type Bottom Gate Top Contact (BGTC):

Il existe un grand nombre de procédés de fabrication envisagés pour les transistors organiques. Nous décrivons les procédés les plus pratiques pour les petites molécules et les polymères. Les méthodes utilisées pour déposer ces matériaux organiques dépendent de leur nature. La mise en phase vapeur des polymères est délicate (nécessite de travailler à haute température) et risque de briser les chaînes de polymères. Ces derniers sont plutôt étalés à la tournette, alors que les petites molécules sont essentiellement déposées par évaporation sous vide [3]. La réalisation d'un transistor organique passe par plusieurs étapes, la première étape consiste à délimiter le contact de la grille métallique (ITO) pour éviter les courants de fuites. La seconde étape est de déposer une couche isolante, comme isolant de grille nous allons comparer deux matériaux : le premier c'est un polymère isolant qui est le Poly vinyl phenol (PVP) et le deuxième c'est l'oxyde de silicium (SiO_2). Cette étude comparative entre deux transistor organique avec un isolant de grille polymère et un isolant inorganique fera l'objectif de cette étude. La troisième étape consiste à déposer une couche active (pentacène). Le pentacène est un polymère semi-conducteur le plus utilisé pour la réalisation des transistors organiques. La dernière étape consiste à déposer les électrodes Source et Drain.

III.4.1 Gravure de l'ITO :

1. Présentation de l'ITO :

L'ITO est un matériau qui appartient à la famille des Oxydes Transparents Conducteurs (TCO), il est généralement déposé en couches minces, utilisés sur substrat isolants tels que le verre et le quartz pour réaliser des électrodes transparentes. Ces application principales se trouvent dans le domaine de l'optoélectronique pour la fabrication des écrans plats, des diodes électroluminescentes, des cellules solaires [6], mais aussi utilisé comme plaque chauffante transparente, protection contre les champs électromagnétiques, isolation thermique [9]...etc. En effet, ses excellentes propriétés optiques et électriques font de lui un matériau de choix pour la réalisation d'électrodes transparentes dans les dispositifs optiques émissifs pompés électriquement ou convertisseurs d'énergie (lumineuse – électrique) nécessitant au moins une électrode transparente [6].

En réalité l'ITO n'est pas une solution solide d'oxyde d'indium et d'étain comme son nom l'indique, c'est en fait un oxyde non stœchiométrique dont la formule est $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_3$ [6]. L'oxyde d'indium-étain (ou oxyde d'indium dopé à l'étain ou ITO pour l'appellation anglaise : Indium Tin Oxyde) est un mélange d'oxyde d'indium (III) (In_2O_3) et d'oxyde d'étain (IV) (SnO_2), dans la proportion massique typique de 90% du premier et 10% du second. Ce composé est incolore et transparent en couches minces [3].

2. La gravure de l'ITO (grille métallique) :

La gravure de l'ITO permet, d'une part, d'éviter les courts-circuits entre les deux électrodes (ITO et couche active) lors de la prise de contact avec la pointe et, d'autre part, pour obtenir un bon contact électrique au niveau de la couche active. La gravure de l'ITO d'une bande de 2 mm (figure III.6.b) est effectuée en recouvrant les échantillons de deux couches de vernis (excepté la partie à graver), puis en les plongeant dans un bain d'acide chlorhydrique. La gravure permet d'isoler deux bandes (figure III.6.C), une bande qui sert d'anode et la deuxième sert à la prise de contact de la cathode lors des tests sous pointes [9].

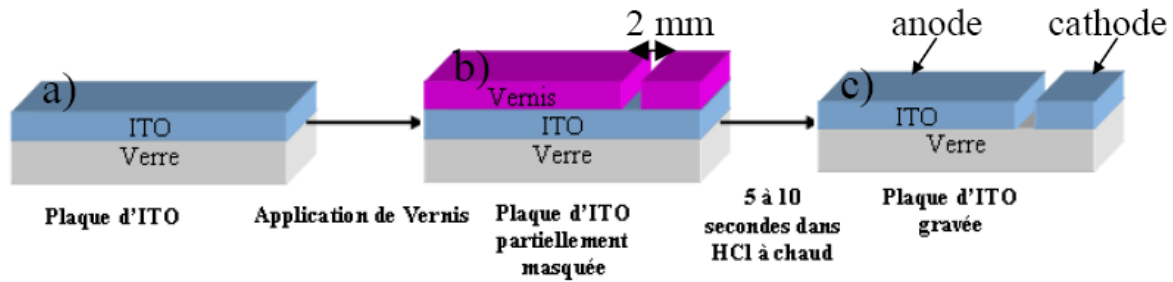


Figure III.5 : les différentes étapes de gravure de l'ITO.

3. Nettoyage de l'ITO :

Le nettoyage de l'ITO est nécessaire pour obtenir des surfaces reproductibles et optimisées en termes de travail de sortie. La procédure utilisée dans le laboratoire de recherche de l'université de Limoges est la suivante : la surface de l'ITO est dégraissée et nettoyée des impuretés par deux bains successifs d'acétone et d'éthanol sous ultrasons pendant 10 minutes chacun. Ensuite, l'échantillon est rincé avec de l'eau ionisé pendant 15 minutes et séché sous un flux d'azote [9].

III.4.2 Dépôt de la couche isolante :

L'une des meilleures et la plus utilisée méthode pour le dépôt de polymère est la technique sol-gel spin-coating. Ces derniers ne peuvent pas être déposés par évaporation thermique car les liaisons chimiques pourraient être rompues, ce qui modifierait les propriétés du matériau [6]. La tournette (spin-coating) est une technique peu coûteuse et permet lorsqu'elle est bien maîtrisée de déposer des couches homogènes de polymère sur des surfaces relativement importantes tout en contrôlant l'épaisseur du film obtenu [10]. C'est la technique classique de dépôt des résines en microélectronique et elle est largement utilisée dans les laboratoires pour réaliser des transistors, notamment pour le dépôt des semi-conducteurs [11]. C'est une méthode de dépôt par centrifugation. Le matériau organique en solution est déposé sur le substrat à l'aide d'une pipette, le substrat étant fixé sur un plateau par un dispositif d'aspiration. La mise en rotation permet au matériau en solution de se répartir uniformément sur toute la surface du substrat grâce à la force centrifuge. La vitesse de rotation et l'accélération de la tournette sont les deux principaux paramètres qui permettent de faire varier l'épaisseur du film organique. Par la suite, l'étuvage de l'échantillon pendant quelques minutes permet l'évaporation du solvant.

La figure suivante présente le principe de fonctionnement de la tournette (Spin Coater).

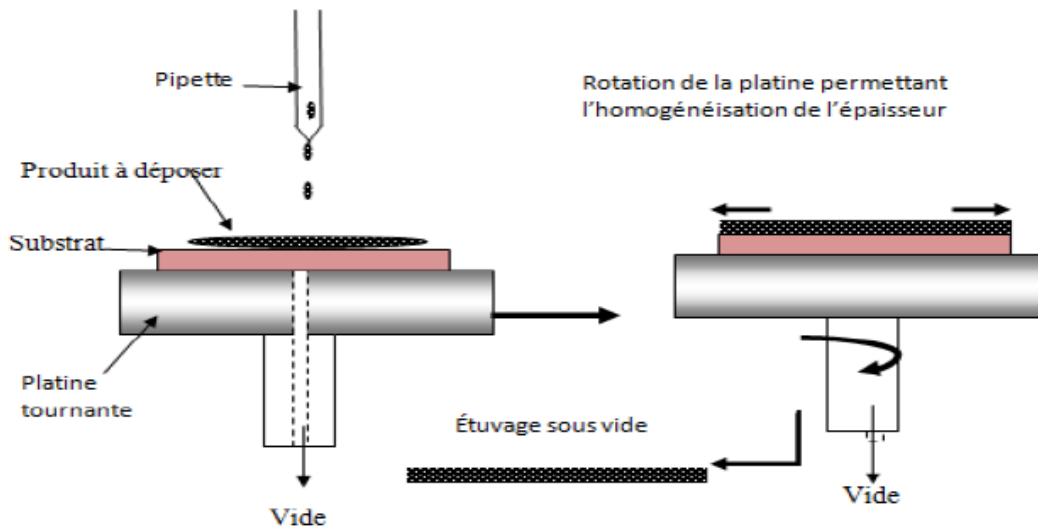


Figure III.6: schéma de principe d'un dispositif expérimental de dépôt à la tournette [3].

Notons qu'il est nécessaire d'évaporer le solvant après un dépôt, soit par un recuit thermique, soit par mise sous vide. Cette technique simple à mettre en œuvre est principalement utilisée pour le dépôt des polymères, elle peut être utilisée avec moins de réussite pour le dépôt de petites molécules.

Pour réussir le dépôt il faut que :

- ✓ Le substrat soit fixé sur un plateau ayant la possibilité de tourner autour d'un axe.
- ✓ Le dépôt de la solution soit rapide afin d'éviter les bulles d'air.
- ✓ La solution doit couvrir toute la surface du substrat.
- ✓ Le matériau soit dilué à 100% sinon l'utilisation d'un filtre est indispensable.

Cette technique de dépôt présente des avantages et des inconvénients :

1. Avantages:

- Faible coût du matériel utilisé,
- Possibilité de dépôt de grande surface.
- Facile à mettre en œuvre.

2. Inconvénients:

- Le matériau doit être en solution.

- Structures multicouches difficiles à réaliser (problème de solvant),
- Effets de bord (épaisseur plus importante sur les bords du substrat),
- Stockage (dégradation et altération) [6].

III.4.3 Dépôt d'une couche active de pentacène par évaporation sous vide :

La méthode qui semble la plus adaptée au dépôt de petites molécules est celle du dépôt par évaporation sous vide. En effet, la centrifugation nécessite une certaine viscosité, difficile à obtenir avec des solutions à partir de petites molécules, alors que le dépôt par évaporation thermique est totalement adapté. En fait, c'est cette technique qui est utilisée dans l'élaboration des transistors qui ont conduit aux meilleures performances en terme de mobilité car elle permet d'obtenir de bons cristaux de pentacène [10].

L'évaporation sous vide (figure III.7) consiste à chauffer le matériau placé dans un récipient métallique. Cet échauffement peut se faire soit par effet joule sous vide (10^{-6} mbar), soit à l'aide d'un canon d'électrons. Le substrat est déposé à quelques centimètres de ce récipient. L'échantillon à évaporer va se condenser sur toute la surface d'une enceinte, en particulier sur le substrat placé en regard pour former un film homogène, dont l'épaisseur est contrôlée avec une balance à quartz (figure III.8) [6].

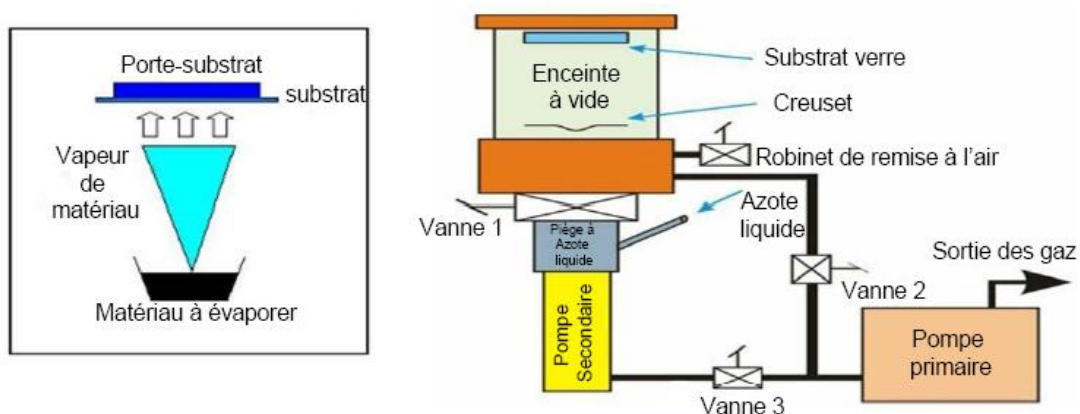


Figure III.7 : schéma de principe d'un évaporateur sous vide [6].

L'ensemble du bâti est constitué d'une enceinte sous vide reliée à un groupe de pompage. Une pompe secondaire (pompe secondaire + pompe turbo moléculaire) et une pompe primaire pour effectuer le vide sous la cloche lors d'une remise à l'air, d'une alimentation réglable en courant et en tension, d'un contrôleur d'épaisseur (quartz + boîtier).

Les paramètres importants pour l'évaporation sous vide sont :

- ✓ Le taux d'évaporation ou la vitesse de dépôt.
- ✓ L'énergie des molécules lorsqu'elles atteignent le substrat, c'est-à-dire soit la température du substrat, ou bien la distance entre la source d'évaporation et le substrat, sinon, les deux.
- ✓ La pureté de la matière première.
- ✓ Les propriétés de la surface du diélectrique [6].

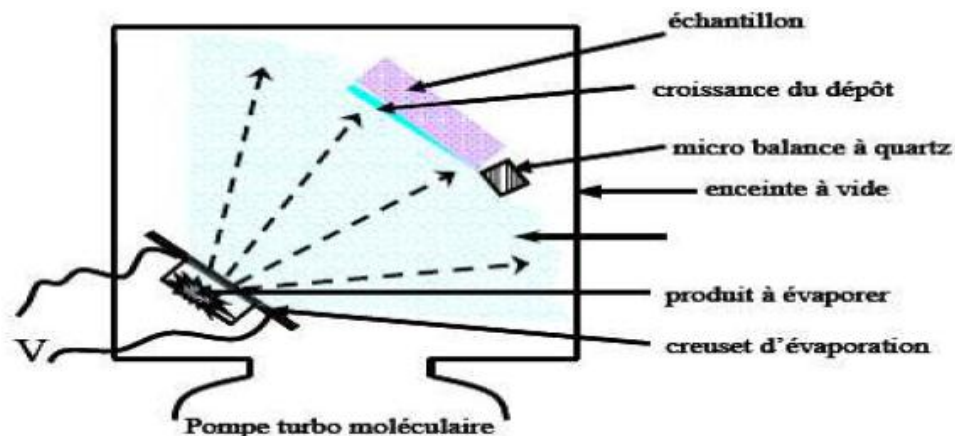


Figure III.8 : procédé de dépôt par évaporation sous vide [6].

1. Avantages:

Cette technique présente plusieurs avantages :

- Permet de contrôler facilement l'épaisseur du film ainsi que sa pureté.
- Permet de réaliser des films hautement ordonnés par le choix de la vitesse de déposition et la température du substrat.
- Bonne qualité des interfaces : pas de pollution atmosphérique.

2. Inconvénients :

- Technique lourde et bâti couteux.
- Faible rendement du procédé.
- Surface de dépôt relativement réduite.
- Effet du rayonnement (creuset) : dégradation chimique, recristallisation [6].

III.4.4 Dépôt des électrodes source et drain :

Cette étape consiste à déposer les électrodes source et drain d'un transistor organique en Or (ou en Argent). Le dépôt des électrodes se fait par la technique d'évaporation thermique à canon à électrons. Une étape de photolithographie, permet d'aligner les contacts source/drain sur la grille afin que les dispositifs soient opérationnels [12].

- **Evaporation thermique par canon à électron :**

Dans cette technique la cible est chauffée à l'aide d'un faisceau à électrons énergétique. L'énergie apportée par ces particules est transmise à la cible qui est chauffé à évaporation. Cette technique permet de réaliser des dépôts directionnels, qui dans certains cas peuvent être destructif pour le substrat [12].

III.5 Matériaux utilisés :

Nous présentons les différents matériaux utilisés pour la réalisation des transistors organiques pour faire l'étude comparative entre les deux séries de transistors.

III.5.1 Les substrats :

Les substrats les plus utilisés dans la fabrication des composants optoélectronique tel que les transistors sont : l'ITO, le CR39, le PET (Poly Ethylène Téréphtalate), le PPC (Poly Phényle Carbonate), également le verre qui est utilisé comme référence [3].

III.5.2 Les contacts Grille, Source et Drain :

La réalisation des électrodes nécessite la mise en œuvre des matériaux qui présentent une faible résistivité. Le but est de choisir un matériau qui présente une conductivité satisfaisante à la meilleure transparence possible. Les matériaux les plus utilisés sont: l'Or et l'ITO [3].

- **Présentation de l'Or :**

L'Or est un métal inoxydable, ses atomes sont organisés selon une structure dite cubique à face centrée (cfc). Nous rappelons que le travail de sortie de l'or est d'environ de 5,1 eV (il

varie beaucoup avec la technique de dépôt mise en œuvre). Il est donc très convenable à l'injection des trous vers la bande HOMO du pentacène. Pour des raisons pratiques, il faut savoir que son point de fusion se situe à 1064°C. Deux méthodes de dépôt sont possibles :

- ✓ l'évaporation thermique.
- ✓ la pulvérisation magnétron continue.

L'Or est souvent utilisé comme électrodes en microélectronique. Sa conductivité est de $0.5 \cdot 10^8 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Son aptitude à diffuser relativement et facilement permet la réalisation de bons contacts avec la plupart des métaux et des polymères. Il existe d'autres matériaux qui peuvent jouer ce rôle, citons par exemple l'Argent ou le Nickel. Le Nickel est un métal blanc argenté ductile. Son oxyde est un semi-conducteur ou un isolant suivant les matériaux avec lesquels il est en contact et son état est de plus ou moins cristallin [6].

III.5.3 Semi-conducteur :

➤ Le pentacène :

C'est un composé chimique ($\text{C}_{22}\text{H}_{14}$) de la famille des hydrocarbures aromatiques polycycliques, formé de cinq noyaux benzéniques fusionnés linéairement (figure III.10). Sa structure conjuguée étendue et sa structure cristalline en font un bon candidat pour la fabrication de transistors organiques à films minces. C'est une molécule conjuguée dont le mode d'assemblage dans l'état solide conduit à des matériaux très ordonnés pouvant aller jusqu'au monocristal. C'est un matériau prometteur dans la réalisation de transistor à effet de champ organique car il présente des propriétés de transport intéressantes (avec des mobilités pouvant atteindre jusqu'à $5\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) [3].

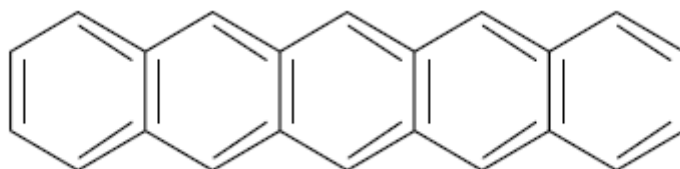


Figure III.9: structure chimique du pentacène.

III.5.4 Les isolants de Grille :

a) Les isolants organiques :

La plupart des isolants organiques sont transparents. Ils sont couramment utilisés pour introduire des composants électroniques et optoélectroniques tels que les transistors, les cellules photovoltaïques et les diodes électroluminescentes. Ils présentent plusieurs avantages: ils sont à bas cout, flexibles et souples. Dans ce travail nous allons nous intéresser aux transistors organiques à effet de champ. Pour cela nous allons présenter les polymères isolants qui sont le PMMA et le PVP. Ces deux matériaux sont souvent utilisés dans la fabrication des transistors organiques. Selon leur état physique, ils sont déposés à la tournette [3].

➤ Le poly (4-vinyl phénol) (PVP):

Le PVP est un polymère isolant transparent en couche mince dont la température de décomposition est voisine de 330°C. Sa formule chimique est $[CH_2CH(C_6H_4OH)]$, il est soluble dans : le THF (Tétra Hydro Furane), le dioxane et les alcools légers (méthanol, isopropanol, éthanol...). Sa formule chimique est présentée sur la figure suivante:

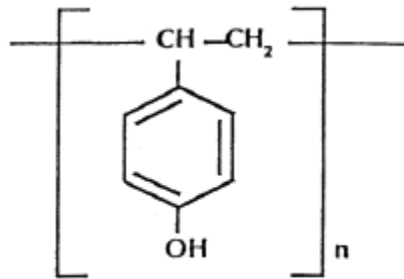


Figure III.10 : formule semi-développée du PVP.

Le PVP est vendu sous forme d'une poudre, il doit être dilué dans un solvant pour qu'il soit déposé à la tournette (spin-coating) [6].

➤ Le Poly Méthyl Méthacrylate(PMMA) :

Le poly (méthacrylate de méthyle) (souvent abrégé en PMMA, de l'anglais PolyMethylMethAcrylate) est un thermoplastique transparent dont le monomère est le méthacrylate de méthyle [6]. Le PMMA est essentiellement produit par le méthyle, grâce aux réactions de polymérisation. Le poly-méthacrylate de méthyle (PMMA) est un

thermoplastique amorphe. Il se polymérise à l'aide de radicaux libres qui amorcent une polymérisation radicalaire en chaîne. La cohésion est assurée par des enchevêtrements de chaînes ainsi que des liaisons faibles de type Van der Waals. Le PMMA est une matière plastique légère et transparente, il est parfois utilisé pour remplacer le verre. Son indice optique varie entre 1,46 et 1,51. La largeur de sa bande interdite est de 5,5 eV avec une densité de 1,9 g/cm³, il offre d'excellentes caractéristiques. Il ne jaunit pas (incolore) et ne se fragilise pas [6].

b) Les isolants inorganiques :

Les isolants inorganiques les plus utilisés sont: l'oxyde de silicium (SiO₂) et l'oxyde d'Aluminium (AlO_x). L'utilisation de l'oxyde de silicium comme isolant de grille était répandue car il possède des propriétés isolantes excellentes. Par ailleurs, l'oxyde d'Aluminium présente une forte permittivité diélectrique, c'est un high k et ses propriétés isolantes est aussi intéressantes que le SiO₂. Avec une faible épaisseur, il permet de baisser les tensions de fonctionnement des dispositifs (faible V_{TH}) et ce avec une bonne isolation électrique et un champ de claquage de 3 – 5MV/cm [12].

➤ Généralités sur le dioxyde de silicium :

La silice ou le dioxyde de silicium est un solide minéral de formule brute SiO₂, constitué de tétraèdres [SiO₄] liés par les sommets. Elle peut être naturelle ou synthétique, cristalline (quartz, trydimite, cristobalite) ou amorphe. C'est un matériau très largement répandu à l'état naturel dans les minéraux (ex : quartz-sable) et dans les plantes (ex : bambou). Pour son usage industriel, la silice présente une origine synthétique est amorphe [13].

➤ Structure de SiO₂:

La silice peut se trouver sous trois formes allotropiques (même composition chimique, mais arrangements atomiques différents) : cristalline (ordre cristallographique à longue distance), vitreuse (ordre à courte distance) et amorphe (absence d'ordre). La structure

obtenue par oxydation thermique est la silice vitreuse. Elle est amorphe dans le cas d'un mauvais contrôle de la croissance de l'oxyde. L'unité structurale de base de la silice est un atome de silicium entouré de quatre atomes d'oxygène constituant les sommets d'un tétraèdre.

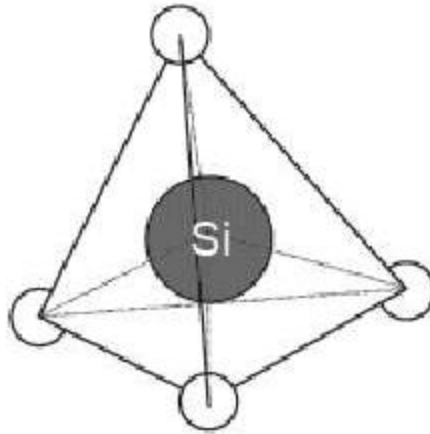


Figure III.11 : motif de base de la silice.

La silice est constituée d'un arrangement de tétraèdres SiO_4 reliés entre eux par l'intermédiaire des sommets oxygènes. Ces tétraèdres sont caractérisés par la distance atomique Si-O (de 1,6 à 1,63 Å), et par la valeur de l'angle θ entre les liaisons O-Si-O (θ varie de 110° à 180° , avec une valeur moyenne de 144° pour la silice amorphe [13]).

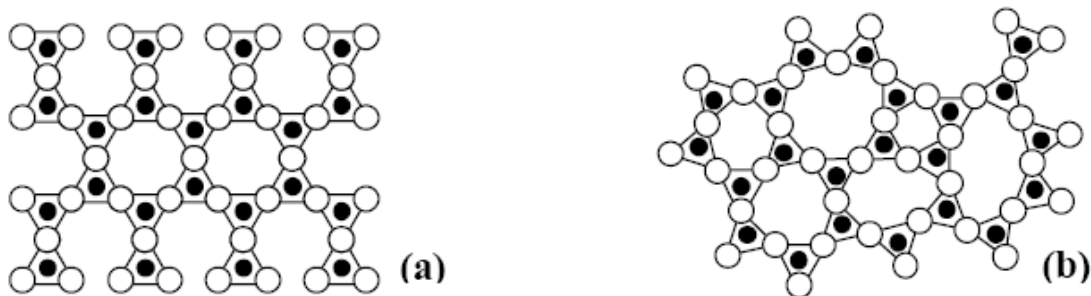


Figure III.12 : représentation plane du réseau de la silice (a) cristalline et (b) amorphe.

III.6 Etude de deux structures de transistors organiques de type BGTC avec ITO/PVP/Pn et $\text{Si}^{++}/\text{SiO}_2/\text{Pn}$:

L'étude va se faire entre deux séries de transistors organiques. La première série est réalisée à partir d'un isolant polymère organique qui est le PVP (poly4,vinyl phénol) et la deuxième série, c'est l'oxyde de silicium (SiO_2) qui va jouer le rôle de l'isolant de grille [14].

Les différentes étapes de la réalisation de la première série sont définies comme suit:

- ❖ Gravure de l'ITO : l'ITO jouera le rôle d'une grille métallique. La première étape consiste à délimiter le contact de la grille. Elle consiste par la protection de la surface à conserver (partie centrale) avec un film adhésif résistant à l'acide, l'échantillon dont son épaisseur est de 150 nm et qui présente une résistivité de $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ est plongé dans un bain d'acide chlorhydrique (HCL) pendant 2 à 3 mn, chauffé à 90°C , pour éliminer la couche de l'ITO non protégé par la résine. Ensuite, rincer les échantillons avec l'eau distillée [14].

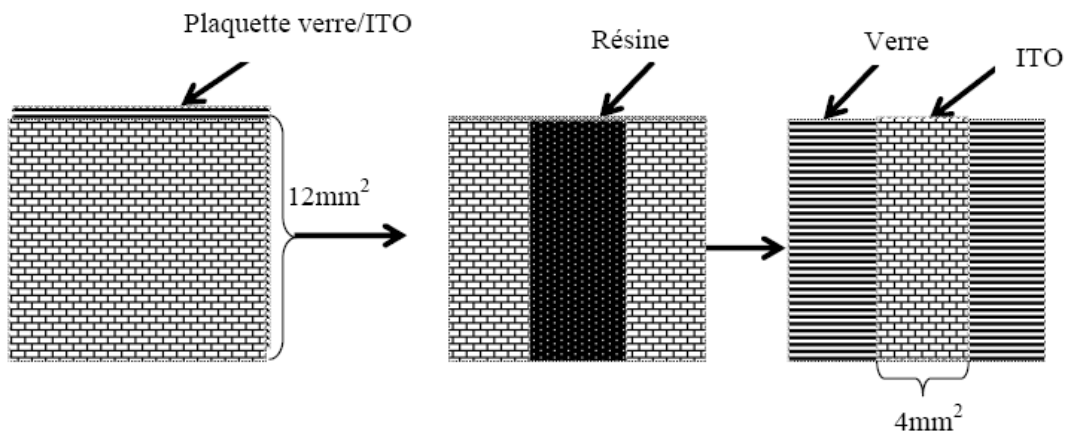


Figure III.13: gravure et nettoyage de l'ITO [14].

- ❖ Le dépôt d'une couche isolante est réalisé par la méthode de dépôt spin-coating. Le PVP est l'isolant de grille, dont la permittivité diélectrique relative est de 3,6. Le PVP est rendu liquide avec un solvant sous une agitation thermique de 50°C pendant 30 minutes. La proportion de la solution est de 1 g de PVP pour 5 ml d'isopropanol [14]. Après le dépôt d'une couche de PVP faire un recuit à une température de 120°C pendant 1 heure 30 min. L'épaisseur de la couche déposée est estimée avec le dispositif DEKTAK XT ($1 \mu\text{m}$) [14].

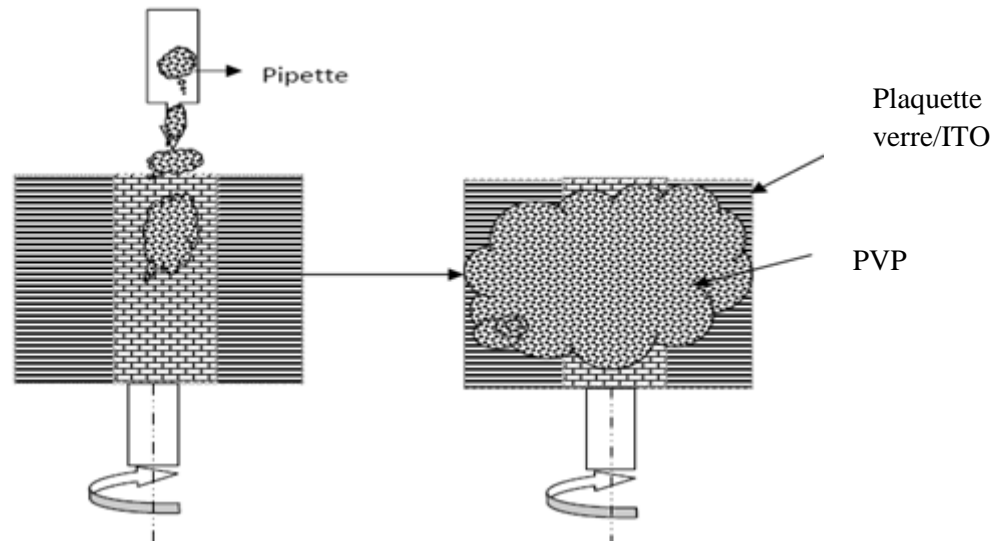


Figure III.14: dépôt de la solution d'un polymère isolant sur le substrat verre/ITO [6].

- ❖ Après le dépôt de la couche isolante, déposer la couche active qui est le pentacène avec une épaisseur de l'ordre de 50 nm avec l'évaporateur sous vide.

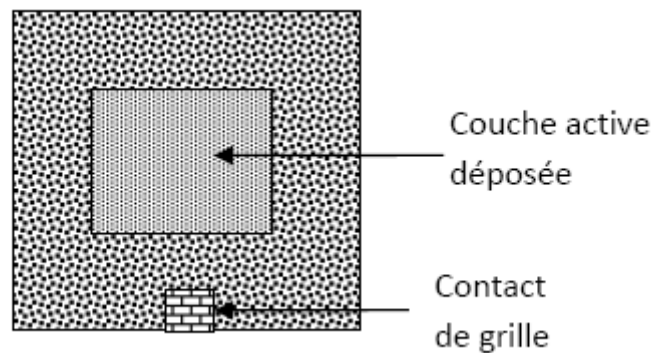


Figure III.15 : dépôt de la couche active par évaporateur sous vide.

- ❖ La dernière étape pour la réalisation d'un transistor organique de type BGTC est le dépôt des électrodes source et drain en Or par la même technique de dépôt. L'épaisseur de la couche de l'électrode est de l'ordre de 50 nm [14].

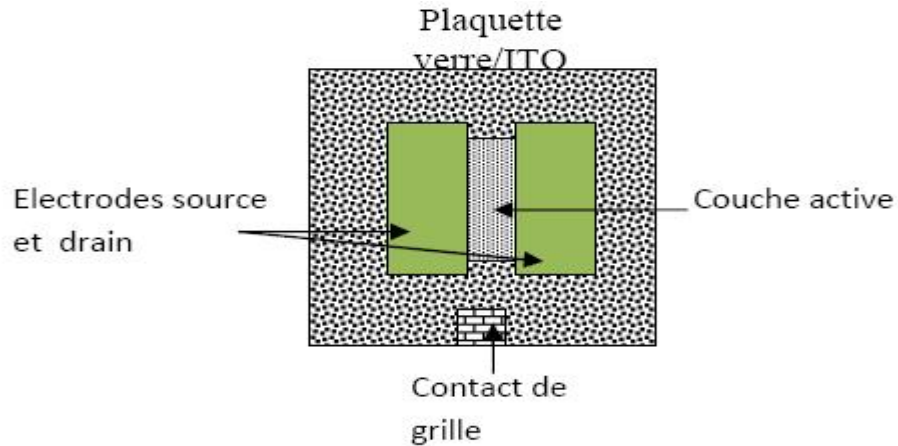


Figure III.16 : dépôt des électrodes source et drain par évaporation à vide.

Pour la réalisation de la deuxième série de transistors organiques avec une structure de type $\text{Si}^{++}/\text{SiO}_2/\text{Pn}$, les mêmes étapes et les même géométries sont suivies avec la première série. Des échantillons de silicium dopé fortement Arsenic sur lesquels une couche d'oxyde de silicium est déposée avec une épaisseur de 20 nm. La couche de pentacène et les électrodes sont déposées par l'évaporation thermique pour avoir des structure de type $\text{Si}^{++}/\text{SiO}_2/\text{Pn}$ et donc des transistors organiques sont réalisés [14].

III.7 Comparaison des deux séries de transistors :

Les figures (III.17.a et III.17.b) montrent les deux structures des deux séries de transistors organiques à effet de champ de type BGTC.

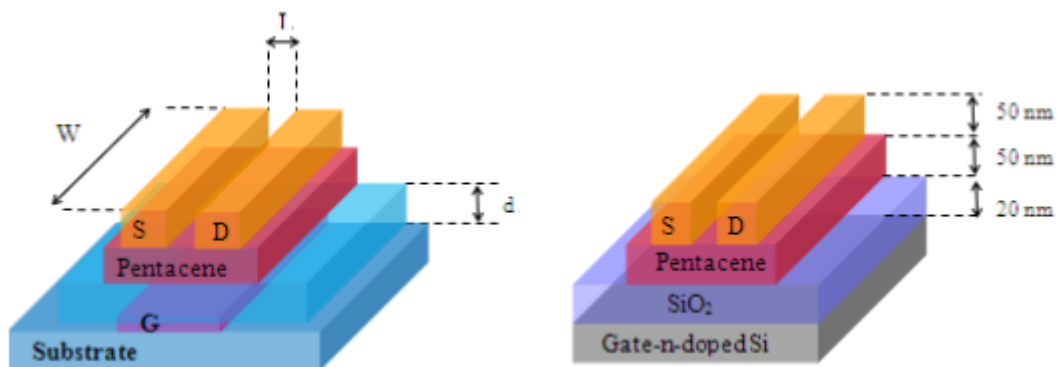


Figure III.17 : structure du transistor à effet de champ de type BGTC, (a) avec isolant de grille le PVP et (b) l'oxyde de silicium comme isolant de grille [14].

Les caractéristiques de transfert des deux séries de transistors sont tracées et représentées sur la figure III.18. .

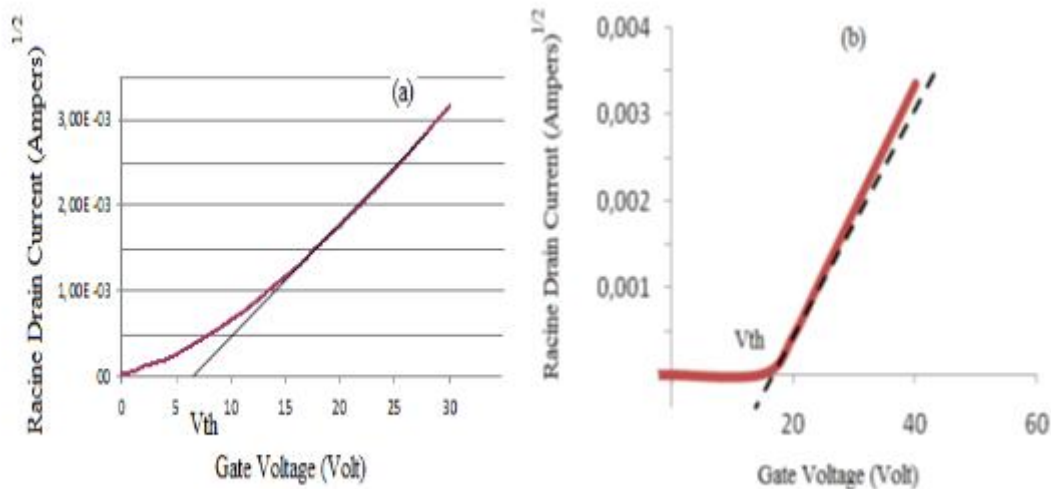


Figure III.18 : Caractéristiques de transfert des deux séries de transistor à effet de champ avec (a) isolant de grille l'oxyde de silicium (Si avec une couche SiO₂ ~ 20 nm), longueur du canal ~ 100 μm pour V_{DS} = - 40 V et (b) couche isolante PVP ~ 1 μm, longueur du canal ~ 100μm à V_{DS} = - 15V [14].

Les caractéristiques de sortie pour les deux séries de transistor sont tracées. Cette caractéristique nous renseigne sur l'existence des trois régimes de fonctionnement d'un transistor organique à effet de champ [14].

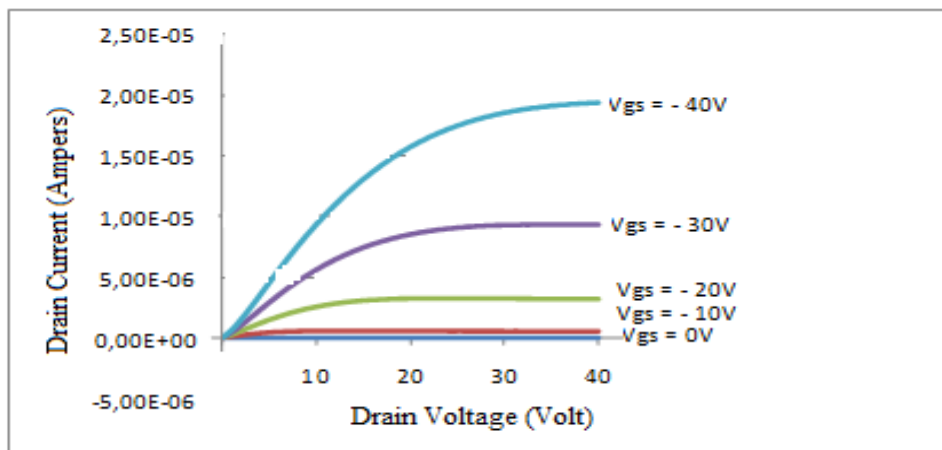


Figure III.19 : caractéristique de sortie d'un transistor à effet de champ avec du silicium (Si avec une couche de SiO₂ ~ 20 nm), longueur du canal ~ 100 μm et W= 4mm [14] .

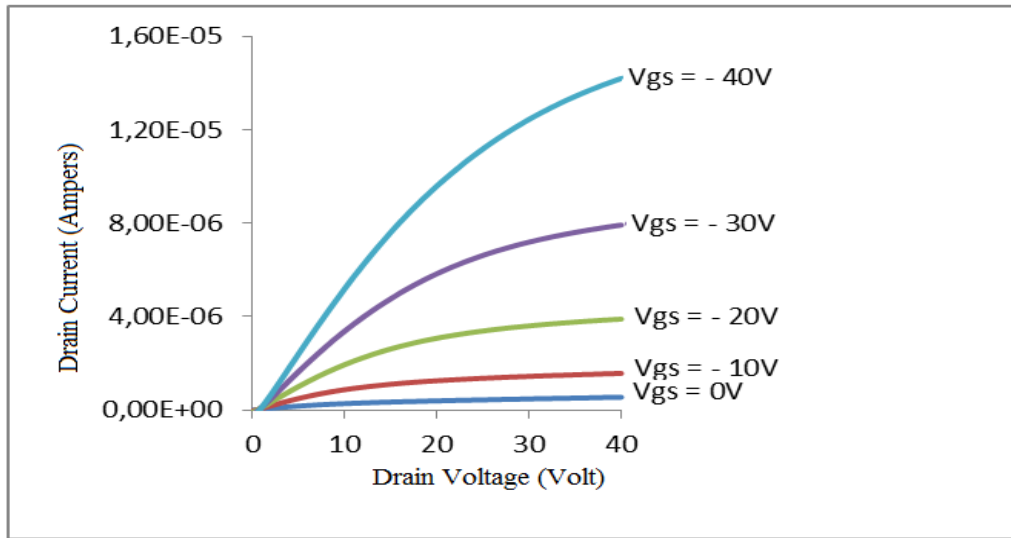


Figure III.20 : caractéristiques de sortie d'un transistor à effet de champ avec une couche isolante le PVP ~ 50 nm, longueur du canal ~ 100 μm et W= 4 mm [14].

Les figures (III.19 et III.20) montrent les caractéristiques I-V d'un transistor à effet de champ avec une couche isolante organique le PVP pour la première série et une couche inorganique d'oxyde de silicium pour la deuxième série. Nous observons une amélioration du courant de drain, avec l'isolant d'oxyde de silicium par rapport à l'utilisation de polymère isolant de PVP. Les caractéristiques I-V mesurées sont typiques d'un transistor à effet de champ unipolaire fonctionnant dans des conditions de saturation à des tensions dépassant légèrement une certaine valeur de seuil V_{th} . La mobilité des porteurs de charge à effet de champ μ FET de la couche active est mesurée à partir de la caractéristique I-V du transistor à effet de champ sous saturation et avec la condition d'un champ faible, sont respectivement données par les relations suivantes :

$$I_{DS} = (W/2L) \mu_{FET} C_i (V_G - V_{th})^2 \quad (III.1)$$

$$I_{DS} = (W/L) \mu_{FET} C_i (V_G - V_{th}) V_{DS} \quad (III.2)$$

Avec :

$W = 4$ mm est la largeur du canal, $L = 100\mu\text{m}$ est la longueur du canal, C_i est la capacité par unité de surface de l'isolant de grille: pour le SiO₂ avec une épaisseur de ~ 20 nm, $C_i \sim 1,15$ pF/cm² et pour le PVP avec une épaisseur de ~ 1 μm, $C_i \sim 2,3$ nF/cm². V_G est la tension de grille, et V_{th} est la tension de seuil correspondant au début du mode d'accumulation. Le

transistor à effet de champ basé sur l'oxyde de silicium, la tension de seuil V_{th} est de l'ordre de ~ -7 V est mesurée à partir de la caractéristique $I_{DS}^{0.5}$ en fonction de V_{GS} pour une $V_{DS} = -40$ V (Fig.III.18.b) [14]. Pour le transistor à effet de champ réalisé avec le PVP, la tension de seuil V_{th} est de l'ordre de -18 V et est estimée pour une $V_{DS} = -15$ V (Fig.III.18.a). Pour une meilleure comparaison, nous représentons des deux courbes dans une même figure (Figure. III.21).

Cette figure montre la caractéristique I-V d'un transistor à effet de champ avec une tension de grille $V_{GS} = -30$ V. La mobilité des porteurs de charges est de $0,04 \text{ cm}^2.V^{-1}.s^{-1}$ pour les transistors avec le PVP comme isolant de grille et elle vaut $0,3 \text{ cm}^2.V^{-1}.s^{-1}$ pour les transistors avec de l'oxyde de silicium comme isolant de grille. Cette différence est attribuée à la rugosité élevée de la couche de PVP. On peut aussi penser qu'il existe des impuretés à l'interface PVP/pentacène car les courants de fuite sont plus élevés avec PVP. Le rapport de courant I_{on}/I_{off} est important pour la deuxième série. Il est d'environ de 10^6 avec l'oxyde de silicium (SiO_2) et de 10^3 avec le PVP.

	Transistor PVP	SiO_2
Epaisseur isolant (nm)	1000	20
W (mm)	4	4
L (μm)	100	100
Mobilité ($\text{cm}^2.V^{-1}.s^{-1}$)	0.04	0.3
C_i (pF)	2300	1.15
V_{th} (V)	-18	-7

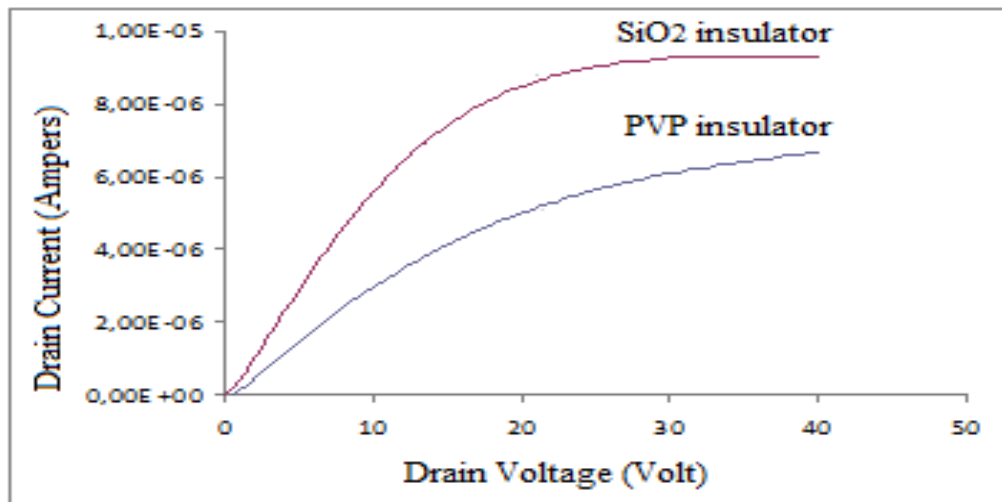


Figure III.21: caractéristique de sortie pour la première série de transistor et la deuxième série, avec le pentacène comme couche active pour les deux séries de transistors organiques à effet de champ, avec une tension de grille $V_{GS} = -30$ V [14].

III.8 Comparaison entre les transistors organiques et les transistors inorganiques avec le Pentacène comme couche active pour les deux séries:

Les transistors à effet de champ sont des dispositifs qui sont largement utilisés dans le monde de l'électronique actuel, la plus part des dispositifs utilisés dans l'industrie sont composés de matériaux inorganiques. Le matériau le plus utilisé est le semi-conducteur silicium, soit sous sa forme cristalline pour les applications de hautes performances, sinon sa forme amorphe. La mobilité des porteurs de charge est un paramètre essentiel pour caractériser les transistors à effet de champ. Cette mobilité définit la vitesse de réponse à laquelle les charges circulent dans le dispositif électronique. Dans le cas du silicium cristallin, les mobilités varient entre 300 et 1000 $\text{cm}^2/\text{V.s}$, elles sont beaucoup plus faibles dans le silicium amorphe. En effet, les transistors inorganiques classiques disposent de bonnes performances par rapport aux dispositifs organiques. Les dispositifs inorganiques sont rigides, difficiles à mettre en œuvre et relativement coûteux. Le développement des transistors organiques à effet de champ n'arrive pas à dépasser les dispositifs inorganiques utilisés pour les applications de haute performance, mais ils peuvent remplacer les dispositifs en silicium à structure amorphe. En prenant cela en compte, les polymères-p- conjugués possèdent déjà des mobilités intéressantes et des avantages comparés aux dispositifs inorganiques. C'est pourquoi l'étude de nouveaux polymères a connu une progression inimaginable au cours des dernières années. Les transistors à effet de champ organique se distinguent des transistors à effet de champ inorganique sur plusieurs points :

La première différence notable est due aux électrodes source et drain. Les contacts sont de types métalliques dans les OTFTs (Organique Thin Field Transistor), ils injectent (source) ou extraient (drain) facilement les charges du canal dans l'organique. Il en résulte que l'accroissement du courant peut alors se produire très facilement dans le régime d'accumulation et non pas dans le régime d'inversion : quand la tension de grille appropriée (négative pour un semi-conducteur de type P, ou positive pour un semi-conducteur de type N) est appliquée au transistor TFT (Thin Field Transistor), une couche d'accumulation (majoritaires trous ou électrons) peut être obtenue à l'interface semi-conducteur / isolant. Il en résulte la génération d'un canal conducteur dont la conductivité est modulable à partir de la valeur de la tension de grille. Inversement, si une tension de grille négative est appliquée à un TFT dont le semi-conducteur est de type N (ou une tension de grille positive est appliquée à un TFT dont le

semi- conducteur est de type P), une couche de déplétion apparaît à l'interface semi-conducteur / isolant, ce qui génère un canal hautement résistif associé à l'état « off » du TFT (la source étant métallique dans un OTFT contrairement au MOSFET. Elle ne peut pas contribuer à fournir des porteurs minoritaires pour créer la couche d'inversion), les transistors à effet de champ à couche mince organique (OTFT) fonctionnent en régime d'accumulation et non pas en régime d'inversion. Ceci constitue une différence importante par rapport aux transistors à effet de champ inorganiques. En effet, dans le cas inorganique le canal se forme dans le substrat par attraction sous l'effet d'un champ de porteurs minoritaires du substrat entre la source et le drain à l'interface de l'oxyde de grille. Contrairement aux OTFTs, le canal de conduction est constitué par une couche de matériau organique dont la conductivité par accumulation est améliorée à l'interface de l'isolant de grille et le semi-conducteur organique qui constitue le canal.

Une conséquence importante du fonctionnement en régime d'accumulation de l'OTFT est que le canal transporte des électrons (canal N) si le semi- conducteur est de type N, et transporte des trous (canal P) si le semi-conducteur est de type P [3].

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudiés les différents types de transistors organiques ainsi que les différentes étapes de leurs fabrications et cités aussi les techniques de dépôt des différentes couches qui constitue un transistor organique. Une étude comparative est faite entre deux séries de transistors organiques avec deux isolants de grille différents, le premier isolant de grille est un polymère le PVP et le deuxième c'est l'oxyde de silicium.

CONCLUSION

GÉNÉRALE

[1] : Fatiha TALEB, Modélisation compact du transistor MOSFET .Mémoire de fin d'étude de Master Académique à l'UMMTO, 12/07/2015.

[2] : LAKHLEF Ahcène, Caractérisation de dispositifs MOSFETs fortement submicronique par les techniques courant tension I(V).Thèse de Doctorat en électronique ,Option : microélectronique à l'UMMTO.

[3] : ZEDEK Rezika, Etude d'un transistor organique transparent avec PMMA comme isolant de grille. Mémoire de magister à l'UMMTO.

[4] : ANESRI Amel, caractérisations des cellules photovoltaïques à base des polymères conducteurs. Diplôme de magister à l'université Abdou Belkaid-Tlemcen.

[5] : Mme Boukli Hacène (née Benyelles) Souhila, Modélisation et simulation des cellules solaires à base de P3HT : PCBM (effet de la mobilité et la vitesse de recombinaison en surface).Thèse pour obtenir le Diplôme Doctorat en sciences physiques à l'université Abdou Belkaid-Tlemcen en 2013-2014

[6] : Ibrahim EL HOUTI EL JAZAIRI. Transistors organiques transparents et imprimés à base de pentacène. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'University de Limoges, soutenue le 13 novembre 2009.

[7] : . <http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1084/6/chapitre1.pdf>

[8] : DEVYNCK Mélanie. Transistor organique à effet de champ « étude des interfaces et amélioration des performances ».Thèse pour obtenir le grade de Docteur présentée à l'université de Bordeaux 1.

[9] : SKAIKY Ahmed. Elaboration, caractérisation et modélisation de transistors à base de pentacène application aux circuits électroniques organiques. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'université de Limoges le 27 juin 2013.

[10] : BALLEST Jérôme. Contribution à l'élaboration de composants électroniques organiques à base de poly(3-octylthiophène).Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur de l'université Paul Sabatier soutenue le 16 septembre 2006.

[11] : BELKHIR Amina. Contribution à la modélisation des transistors organiques. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur de l'université de Reims-Champagne-Ardenne, soutenue le 9 octobre 2009.

[12] : BEBICHE Sarah. OFTTs de type N à base de semiconducteur π -conjugués : fabrication performance et stabilité. Thèse pour le grade de Docteur de l'université de Rennes 1 soutenue le 6 Novembre 2015.

[13] : ATTALLAH Mourad. Elaboration et caractérisation des couches minces d'oxyde de silicium, obtenue par voie sol-gel. Mémoire présenté pour obtenir le diplôme de Magister en physique à l'université Mentouri-constantine, soutenu le 08/03/2010.

[14] : O.Boughias, M.S. Belkaid, T. Trigaud, R. Zirmi, Different Gate Insulators for Organic Field Effect Transistors, Manufacturing Science and Technology (MST), 3(5):249-252, 2015.

[15] : ALLARD Nicolas. Synthèse et caractérisation de nouveaux hétérofluorènes pour applications en électronique organique. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de maître sciences (M.SC) à l'université Laval Québec en 2010.

Résumé

Le but de ce mémoire est d'étudier les propriétés électriques des structures de transistors à effet de champ avec deux polymères isolants différents, à savoir poly(4, vinylphénol) (PVP) et oxyde de silicium (SiO_2). Dans ces études, la couche active organique est toujours la même qu'elle est constituée de pentacène. Le PVP est un matériau organique à faible teneur en k déposé par revêtement par centrifugation. Des différences significatives en termes de mobilité et de courant de fuite sont observées avec les deux diélectriques. La mobilité est presque 10 fois supérieure avec SiO_2 qu'avec PVP. Il en est de même avec les fuites actuelles 1000 fois plus petites avec SiO_2 .

Dans le premier chapitre on a abordé les généralités sur les transistors MOSFETs, le deuxième chapitre nous avons étudiés les propriétés électriques et physiques des matériaux organiques et simplifier la notion des polymères isolants, semi-conducteurs et conducteurs, aussi, nous avons donnés une définition d'un transistor organique à effet de champ qui sera le thème de ce travail ,et pour le troisième chapitre on a étudiés les différents types de transistors organiques ainsi que les différentes étapes de leurs fabrications et cités aussi les techniques de dépôt des différentes couches qui constitue un transistor organique.

Mots-clés :Transistor à effet de champ organique, pentacène, oxyde de silicium, poly (4, vinylphénol)