

*Université MOULOUD MAMMERRI Tizi-Ouzou
Faculté de Génie Electrique et de l'Informatique*

Département d'Electronique



*Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme
d'ingénieur d'état en électronique;
Option : Instrumentation.*

Thème :

*Etude et Caractérisation d'une
structure électronique de type
ITO/PMMA/Pentacène*

Présenté par :

OULD BRAHAM Amar

Encadré par :

Mme O. BOUGHIAS

Promotion 2012

Remerciements

Avant de présenter ce modeste travail à votre juste appréciation, j'tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près et de loin à sa réalisation.

Je tiens à remercier vivement Madame O. BOUGHIAS d'avoir accepté de diriger ce travail et je lui exprime ma très profonde reconnaissance pour sa grande gentillesse, ces conseils, son soutien et sa disponibilité.

Je remercie vivement Monsieur M.S. BELKAID, pour m'avoir fait l'honneur en acceptant de présider le jury.

Je tiens à remercier Madame F. BELHOUCINE, d'avoir acceptée d'être membre de jury de ce mémoire. Grand merci d'avoir acceptée d'évaluer et d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier également Monsieur R. ZIRMI, d'avoir acceptée d'être membre de jury de ce mémoire. Grand merci pour sa contribution à l'évaluation de ce travail.

Je souhaite maintenant remercié tous les collègues, ou plutôt amis, de leurs soutiens. Grand merci pour Mourad OTMANE-CHEKRI pour son aide et sans oublier tous mes amis et tous mes frères et sœurs.

Une dernière pensée à mes très chers parents et à toute ma famille ainsi que les êtres qui me sont chers en reconnaissance de leurs affections et leurs soutiens, grand merci.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*Toute ma famille et exceptionnellement à mes
parents*

*Ainsi qu'à tous ceux qui ont pris une place dans
mon cœur.*

Amar

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Introduction sur les transistors à effet de champ MOSFETs	
I Introduction.....	3
I-1 Représentation d'un transistor à effet de champ inorganique	3
I-1-1 Structure de base des MOSFETs	3
I-1-2 Principe de fonctionnement d'un transistor MOSFET	4
I-1-2-1 Régime d'accumulation ($V_G < 0$).....	4
I-1-2-2 Régime de déplétion ($V_G > 0$).....	5
I-1-2-3 Régime d'inversion ($V_G \gg 0$)	6
I-2-Tension de seuil.....	7
I-3 Régimes de fonctionnement	10
I-3-1 régimes linéaires.....	11
I-3-2 régimes sous-linéaire (pincement).....	11
I-3-3 régimes saturé.....	11
I-4 caractéristiques électriques	12
I-4-1 Caractéristique de sortie et de transfert en régime linéaire.....	12
I-4-2 caractéristique de sortie et de transfert en régime saturé.....	12
Chapitre II : Présentation des matériaux organiques semi-conducteurs	
II Physique des matériaux organiques.....	14
II-1 Notion de conjugaison.....	14
II-1-1 Le P3HT poly (3-hexylthiophène)	18
II-1-2 Le pentacène.....	19
II-2 Introduction des matériaux organiques dans les transistors MOSFET	20
Chapitre III : Représentation d'un transistor à effet de champ organique	
III Introduction	21
III-1 Configuration des OFET (Organic Field Effect Transistor)	21

Sommaire

III-2 Principe de fonctionnement.....	22
III-3 Régimes de fonctionnement.....	24
III-3-1 régime linéaire.....	26
III-3-2 Régime sous linéaire.....	26
III-3-3 Régime saturation.....	26
III-4 Caractéristiques électriques.....	27
III-4-1 Caractéristique de sortie.....	27
III-4-2 Caractéristique de transfert.....	27
III-5 Les paramètres essentiels d'un OFET.....	28
III-5-1 Mobilité.....	28
III-5-2 Tension de seuil.....	30
III-5-3 Rapport I_{ON}/I_{OFF}	30
III-6 Comparaison entre les MOSFET et les OFET.....	31

Chapitre IV : Etude d'un transistor OFET de type ITO/PMMA/Pentacène

IV-1 Introduction.....	33
IV-2 Etapes de réalisation des OFETs	33
IV-2-1 Géométrie du transistor organique.....	33
IV-2-2 Présentation des matériaux et technique de dépôt	34
IV-2-2-1 Présentation de L'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO).....	34
IV-2-2-1-1 Propriétés électriques	34
IV-2-2-1-2 Propriétés optiques	35
IV-2-2-2 Dépôt d'ITO	35
IV-2-2-2-1 Choix du substrat (verre).....	35
IV-2-2-2-2 Méthode de dépôt de l'ITO sur le verre	35
IV-2-2-3 Gravure de l'ITO	37
IV-2-2-4 Le PMMA et le Pentacène	37
IV-2-2-4-1 Le polyméthylmethacrylate (PMMA)	38
IV-2-2-4-1-1 Propriétés physiques et mécaniques.....	38
IV-2-2-4-1-2 Propriétés électriques	38
IV-2-2-4-2 Le pentacène	39
IV-2-2-5 Méthodes de dépôt	39
IV-2-2-5-1 Dépôt de la couche isolante (PMMA) par la méthode de "spin-coating"	39

Sommaire

IV-2-2-5-2 Dépôt de semi-conducteur organique (Pentacène) par évaporation sous vide.....	40
IV-2-3 Caractérisation électrique des transistors organiques.....	42
Conclusion générale.....	46
Références	47

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

L'électronique organique vient bouleverser le domaine des composants électroniques grâce à ses nombreux atouts, et notamment : son potentiel bas coût de fabrication, et le fait que le support de fabrication peut être flexible comme le papier ou le plastique. Un composant organique est aussi beaucoup plus léger qu'un composant à base de silicium. L'électronique devient alors souple, légère et potentiellement peu coûteuse.

Tous les principaux composants électroniques peuvent être fabriqués à base de matériaux organiques comme les transistors, les diodes, les résistances, les capacités, les inductances, les mémoires... On peut alors tout imaginer.

L'électronique organique connaît aujourd'hui un engouement sans précédent. On estime que ce secteur innovant pourrait générer jusqu'à 30 milliards d'euros d'ici 2015 et fait l'objet de nombreux articles dans la presse grand public. Ceci est dû au fait que malgré les performances limitées et une faible stabilité, l'électronique plastique permet d'envisager des applications particulières.

L'électronique organique ne cherche pas à concurrencer l'électronique silicium mais elle peut être une alternative dans des applications simples et jetables. Ce fait est dû à des performances faibles et des limitations des matériaux organiques comparés aux matériaux classiques (inorganique) utilisés dans l'électronique silicium. Néanmoins, ses performances sont suffisantes pour envisager de véritables circuits de plus en plus complexes et complets au fur et à mesure que la recherche permettra d'avancer et d'améliorer les performances des principaux composants constituant un circuit électronique.

Dans ce travail, on s'est intéressés à l'étude et la caractérisation d'une structure électronique de type ITO/PMMA/Pentacène. Le PMMA est un bon isolant de grille pour des transistors à effet de champ organiques à base de pentacène.

Pour se faire, nous avons présenté dans le premier chapitre les transistors à effet de champ (MOSFET), dont nous avons abordé la structure de base des MOSFET, son principe de fonctionnement, ces différents régimes de fonctionnement ainsi que ces caractéristiques électriques. Ce dernier a été inventé par, William Shockley, John Bardeen, et Walter Brattain en 1947, qui valut à ces scientifiques l'obtention du prix Nobel de physique en 1956, a entraîné naturellement de l'avènement de la microélectronique. Depuis, l'amélioration des performances, mais aussi la réduction des dimensions des circuits intégrés (association de plusieurs composants sur un même substrat). Le transistor MOS est actuellement le dispositif le plus répandu en microélectronique. Il est le composant de base de la technologie CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconducteur) qui la clef de la microélectronique et de la nanotechnologie.

Le chapitre II, quant à lui est une représentation complète sur les matériaux organiques semi-conducteurs ; physique, Notion de conjugaison dans ces matériaux et leur introduction dans les transistors MOSFET.

Ensuite, dans le chapitre III, nous nous sommes intéressés à l'étude des transistors organique à effet de champ (OFET) ; configuration des OFETs, principe et régimes de

Introduction générale

fonctionnement, caractéristique électriques et les paramètres essentiels d'un OFET et on a terminé par une comparaison entre MOSFET et OFET.

Puis, le chapitre IV est consacré à l'étude d'un transistor OFET de type ITO/PMMA/Pentacène. Cette structure est la base des transistors à effet de champ (MIS ; Métal-Isolant-Semi-conducteur).

Enfin, on a finis le travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Introduction sur les transistors à effet de
champ MOSFETs

I Introduction

Le transistor à effet de champ MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), est considéré comme une brique de base des circuits intégrés. Son architecture et son principe de fonctionnement sont restés pratiquement le même, mais ses dimensions physiques n'ont cessé de diminuer. Cependant, depuis le début des années 2000, la réduction de la taille des composants ne suffit plus à garantir de meilleures performances tout en réduisant le coût de fabrication. L'industrie des semi-conducteurs est la clef du développement des transistors, car elle est passée de la microélectronique à la nanoélectronique.

La réalisation d'un transistor à effet de champ MOSFET est basée sur la structure M-I-S (Métal-Isolant-Semi-conducteur) et l'isolant utilisé c'est l'oxyde de silicium (SiO_2). Le but de ce chapitre est d'étudier la structure de base des MOSFET, son principe de fonctionnement dans différents régimes et ces caractéristiques électriques.

I-1 Représentation d'un transistor à effet de champ inorganique

I-1-1 Structure de base des MOSFET

Le transistor MOSFET est constitué de trois électrodes (source, drain, grille). La source et le drain sont deux régions semi-conductrices de même type de dopage reliées à leur électrode respective et d'une électrode de commande appelée grille. Dans un substrat faiblement dopé P, on insère deux zones N fortement dopées. Ces deux zones seront la source et le drain du MOSFET ; elles sont distantes d'une dizaine de μm (séparées par le substrat P). La source est généralement reliée au substrat. La grille n'est pas directement reliée au substrat P ; elle est isolée par l'intermédiaire d'une couche très fine de l'oxyde de silicium (quelques nm). Cette caractéristique donne son nom au MOSFET (Metal Oxide Semiconductor).

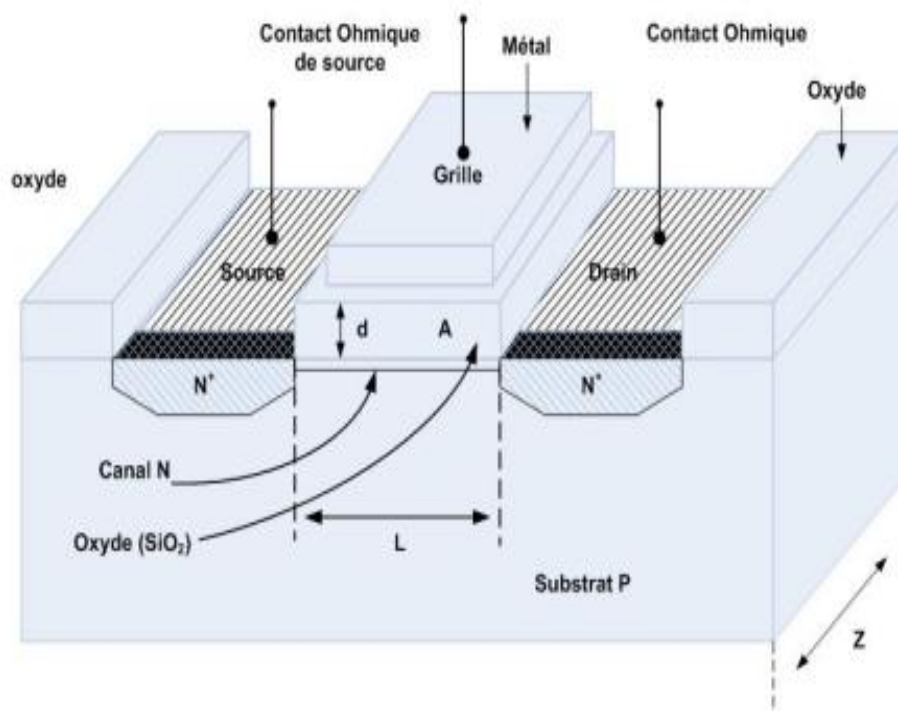


Figure 1: Transistor MOSFET [1].

Le MOSFET est caractérisé par : L qui est la longueur qui sépare la source du drain, W présente la largeur du transistor. Cette longueur L est le paramètre le plus important. C'est elle qui définit la technologie, la réduction de L et de W d'un transistor mène obligatoirement à la réduction d'autres paramètres et notamment l'épaisseur de l'oxyde d'après les lois de « MOORE ».

I-1-2 Principe de fonctionnement d'un transistor MOSFET

Le principe de fonctionnement d'un transistor MOSFET est basé sur l'application d'un champ électrique vertical (champ de grille) qui module la densité des porteurs dans le canal de conduction. Cette tension de grille permet de contrôler la conductivité entre la source et le drain. Selon le champ électrique appliqué à la grille on définit trois régimes de fonctionnement.

I-1-2-1 Régime d'accumulation ($V_G < 0$)

La variation de la tension négative de la grille ΔQ_m correspond à une modulation de ΔQ_{sc} positive, équivalente à l'interface semi-conducteur-isolant. Cette charge positive est due aux porteurs majoritaires libres du semi-conducteur (P). Ils sont attirés par le champ électrique à l'interface oxyde- semi-conducteur. Une zone de charge d'espace (ZCE) positive est associée à une accumulation des trous. La tension appliquée à la grille peut être déterminée par l'intégration du potentiel Ψ . Cette tension est définie par la somme de la tension aux bornes de l'isolant ; V_i est la tension interne du semi-conducteur et Ψ_s est appelée potentiel de surface qui traduit la courbure des bandes.

$$C_{acc} = \frac{\Delta Q_{sc}}{\Delta V_G} = \frac{\Delta Q_m}{\Delta V_G} \dots\dots\dots (1)$$

En régime d'accumulation, cette capacité est constante et indépendante de la tension de polarisation. La capacité de la structure se résume à la capacité de l'oxyde ; sa formule est donnée par l'expression (2) :

$$C_{acc} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{t_{ox}} \text{ avec } S = 1 \text{ cm}^2 \dots\dots\dots (2)$$

Avec :

ϵ_0 : permittivité du vide qui est égale à $8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$.

ϵ_r : permittivité relative de l'isolant qui est égale à 3.9 pour SiO_2 .

t_{ox} : l'épaisseur de l'oxyde.

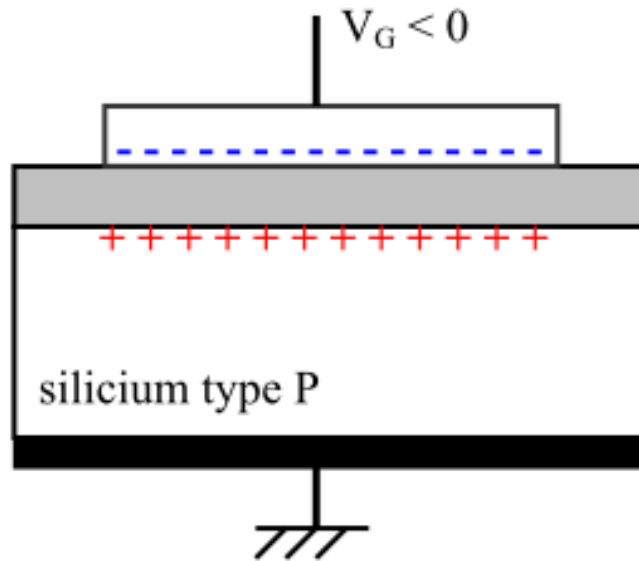


Figure 2 : Régime d'accumulation [2].

Dans le régime d'accumulation, les porteurs majoritaires s'accumulent à la surface du silicium.

I-1-2-2 Régime de déplétion ($V_G > 0$)

Les petites variations de la tension positive de grille se traduisent par une modulation de Q_{sc} et s'effectue par une apparition ou une disparition d'une charge à une distance X_d de l'interface Si/SiO₂.

En régime de déplétion, on a deux capacités en série C_{ox} et C_D . C_{ox} est calculé précédemment et C_D est donné par l'expression (3)

$$C_D = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{rx}}{W_d} \dots \dots \dots (3)$$

Avec :

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_{rx}}{qN_D}} \Psi_s \dots \dots \dots (4)$$

Où

W_d : épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE)

W_d : est une fonction croissante, V_G augmente, cela veut dire que la capacité totale décroît.

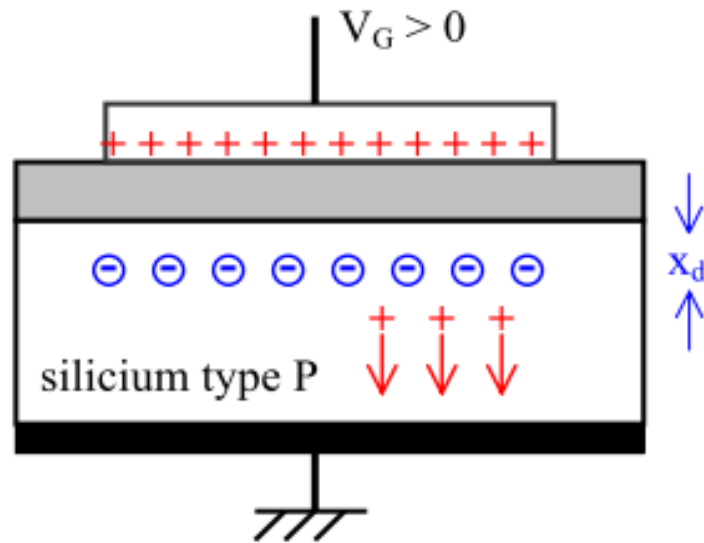


Figure 3 : Régime de déplétion [2]

Dans le régime de déplétion les porteurs majoritaires sont repoussés en profondeur. La surface ne comporte plus que des ions négatifs fixes

I-1-2-3 Régime d'inversion ($V_G \gg 0$) :

La variation de la tension de polarisation est très importante. La capacité de ce régime dépend de la fréquence du signal. Il existe une capacité basse fréquence (LF) et une capacité haute fréquence (HF). La première capacité C_{LF} est définie pour des fréquences de quelques Hertz (la même que celle obtenue en régime d'accumulation). La capacité C_{HF} est définie pour les hautes fréquences (MHz)

La capacité en basse fréquences, est donnée par :

$$C_{LF} = C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_i}{e_{ox}} \dots \dots \dots (5)$$

Dans ce cas l'épaisseur de la couche de déplétion décroît, les porteurs minoritaires ne parviennent pas à faire le va et vient imposé par la variation de signal.

La capacité en haute fréquences ($\geq 1\text{MHz}$), est donnée par :

$$C_{HF} = \frac{C_{ox} C_{D,lim}}{C_{ox} + C_{D,lim}} \dots \dots \dots (6)$$

$$W_{D,lim} = \left[\frac{2\epsilon_0\epsilon_s}{qN_D|\psi_{s,lim}|} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(7)$$

Et

$$\psi_{s,lim} = - 2KT \cdot \ln \frac{N_D}{n_i} \dots\dots\dots(8)$$

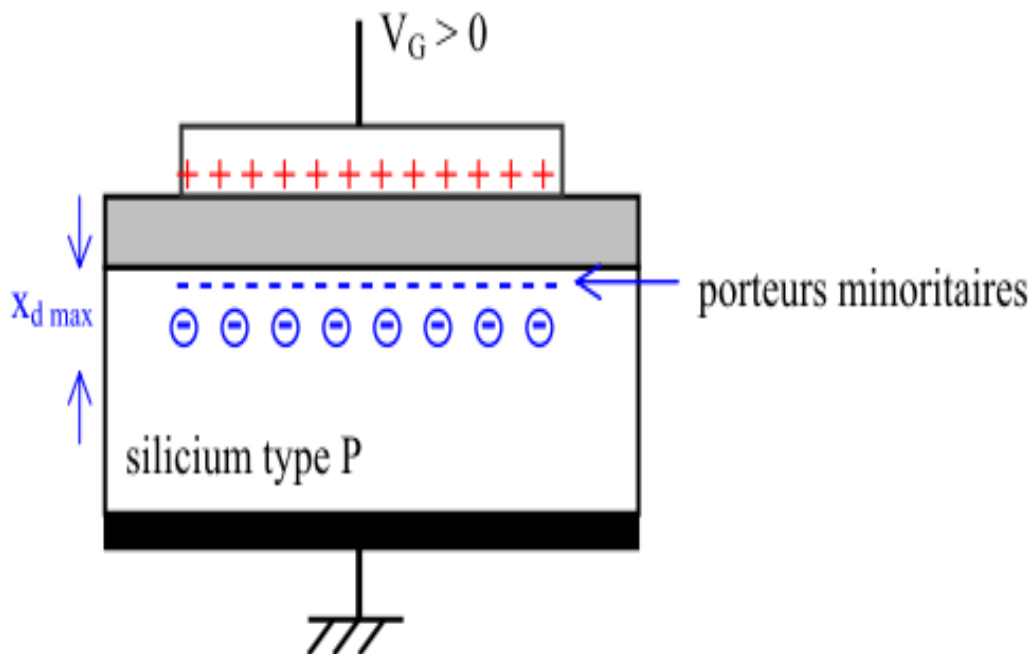


Figure 4: régime d'inversion [2]

I-2 Tension de seuil

Examinons ce qui se passe à l'interface Si-SiO₂ (figure 5) lorsque le potentiel de grille V_G augmente, les autres potentiels étant nuls, sauf celui du drain, qui est cependant suffisamment faible pour que l'on puisse considérer le canal comme équipotentiel. Selon le potentiel de la grille, l'interface Si-SiO₂ passe par les trois régimes : accumulation, déplétion et inversion.

Pour une tension de grille suffisamment négative, les trous sont appelés à la surface, laquelle est **en accumulation**. Lorsque le potentiel de grille augmente, sous l'effet du champ électrique, les trous sont repoussés de la surface jusqu'à ce qu'elle ne comporte plus que des

charge fixes négative, la surface est dite en **déplétion**. Lorsque le potentiel de grille continue de croître, les électrons sont attirés vers le drain sous l'effet de champ électrique longitudinal créée par la tension V_{DS} positive. La surface est dite en **inversion**, car on y trouve un excès d'électrons dans une zone de type P, initialement riche en trous. La tension de grille qui initie l'apparition de la couche d'inversion à l'interface oxyde/grille est appelée **tension de seuil** ou **mise en conduction**.

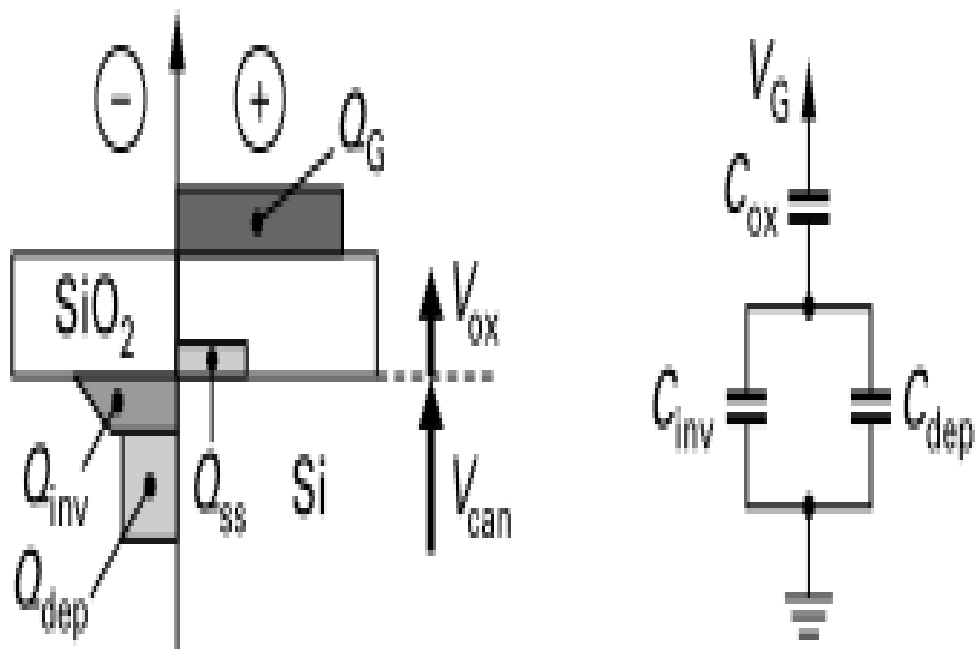


Figure 5 : Répartition des charges induites dans le semi-conducteur [3].

Q_{dep} : densité surfacique d'accepteurs ionisés dans la couche de déplétion.

Q_{inv} : densité surfacique d'électrons dans la couche d'inversion.

Q_G : densité surfacique de charges sur la grille.

Q_{ss} : densité surfacique effective due à la fois aux charges positives piégées à l'interface Si/SiO_2 et aux impuretés. La valeur de $Q_{ss}=10^{10} \text{ cm}^{-2}$ quelque soient le type de silicium ($Q_{ss}=- Q_{ss}$) et la technique d'oxydation.

La tension de seuil est donnée par la somme de :

- 1) La chute de potentiel dans le diélectrique :

$$V_{ox} = \frac{Q_{dep}}{C_{ox}} \dots\dots\dots (9)$$

Avec :

C_{ox} : La capacité d'oxyde.

Pour la tension $V_G = V_{th}$, la charge totale du semi-conducteur vaut Q_{dep} , la densité d'électrons dans la couche d'inversion Q_{inv} est négligeable.

- 2) La chute de potentiel sur la zone déplétive ; qui est la tension pour laquelle le canal devient équipotentiel par rapport à la source. Autrement dit, elle définit la tension de seuil de conduction. Elle vaut $\phi_d (V_{can} = \phi_d)$.
- 3) la différence de travaux de sortie ϕ_{ms} entre le matériau de la grille et substrat.
- 4) Une chute du potentiel due à la présence des charges électriques fixes dans le volume du diélectrique et des charges électriques piégées à l'interface S_i/S_iO_2 . Elle est égale à : Q_{ss}/C_{ox} .

En résumant, la tension de seuil V_{th} se calcule par la somme de ces composantes, donnée sous la formule suivante :

$$V_{th} = V_{FB} + 2\phi_F + \frac{\sqrt{4\epsilon_0 q N_a \phi_F}}{C_{ox}} + \frac{q N_{ss} 2\phi_F}{C_{ox}} \dots \dots \dots (10)$$

Avec :

V_{FB} : la tension de bande plate, qui est la tension de grille. Elle correspond à l'absence de charges électriques dans le canal. Autrement dit, c'est la tension qu'il faut pour l'alignement des niveaux de Fermi des deux matériaux (grille et substrat). Elle est donnée par l'expression suivante :

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} \dots \dots \dots (11)$$

Avec :

$$\frac{Q_{ss}}{C_{ox}} = \frac{\sqrt{2q\epsilon_{si}\epsilon_0 N_B (3\phi_d - V_{BS})}}{C_{ox}} \dots \dots \dots (12)$$

Où :

C_{ox} : la capacité de l'oxyde par unité de surface qui est donnée par $C_{ox} = \epsilon_{ox} \epsilon_0 / e_{ox}$

q : Charge élémentaire.

N_B : Densité volumique des dopants dans le substrat.

e_{ox} : épaisseur de l'oxyde de la grille.

On peut conclure que **la tension de seuil** est la tension qui initie l'apparition de la couche d'inversion. Elle varie en fonction de plusieurs paramètres. Tels, le dopage de drain et de la source, la température, le potentiel de drain et de substrat, la longueur de grille....etc.

La figure 6, illustre l'évolution de la tension de seuil, pour des longueurs de grille supérieures à 2 μm. Elle ne varie pas en fonction de la longueur de grille. Par contre, la tension de seuil diminue très fortement pour des longueurs inférieures à 2μm.

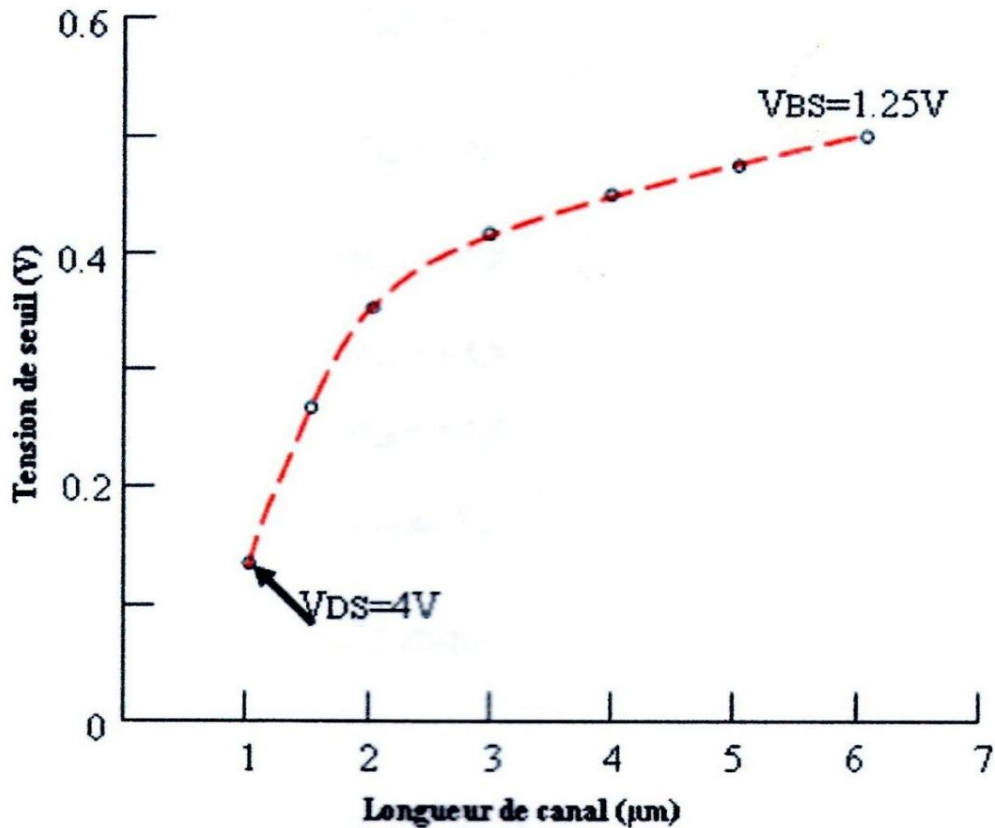


Figure 6: Evolution de la tension de seuil en fonction de la longueur de grille [4]

I-3 Régimes de fonctionnement

Lorsque la grille est équipotentielle, la variation de potentiel entre source et drain implique une variation de la charge d'inversion le long de canal car la différence de potentiel à travers la capacité C_{ox} diminue. La charge de la source et de drain par unité de surface créée par l'effet de champ est donnée par l'expression 13,14

$$Q_{inv} = C_{ox} (V_G - V_{th}) \dots \dots \dots (13)$$

$$Q_{INV} = C_{ox} (V_G - V_{th} - V_{DS}) \leq Q_{inv}^F \dots \dots \dots (14)$$

F : substrat

Cette variation de charge peut être vue comme une augmentation de la résistance du canal entre source et drain. Il est clair que cette résistance dépend de la valeur relative de V_{DS} par rapport à $(V_G - V_{th})$. Ceci permet de distinguer trois régimes de conduction :

I-3-1 Régimes linéaire

Lorsque $V_{DS} \ll (V_G - V_{th})$, la charge d'inversion peut être supposée constante tout le long du canal. Le courant de canal augmente alors de manière linéaire avec V_{DS} . Ce régime est dit régime linéaire ou ohmique.

I-3-2 Régimes sous-linéaire (pincement)

Lorsque $V_{DS} \approx (V_G - V_{th})$ la charge d'inversion le long du canal ne peut plus être considérée comme constante. En particulier, pour $V_{DS} = (V_G - V_{th}) \approx V_P$, elle s'annule au voisinage de drain. La tension V_P correspondante est appelée, le point de pincement.

I-3-3 Régimes saturé

Pour des valeurs de V_{DS} supérieures, le point de pincement se déplace vers la source. Il n'y a plus de création de charge d'inversion entre le point de pincement et le drain. Le courant est saturé. C'est le régime de saturation.

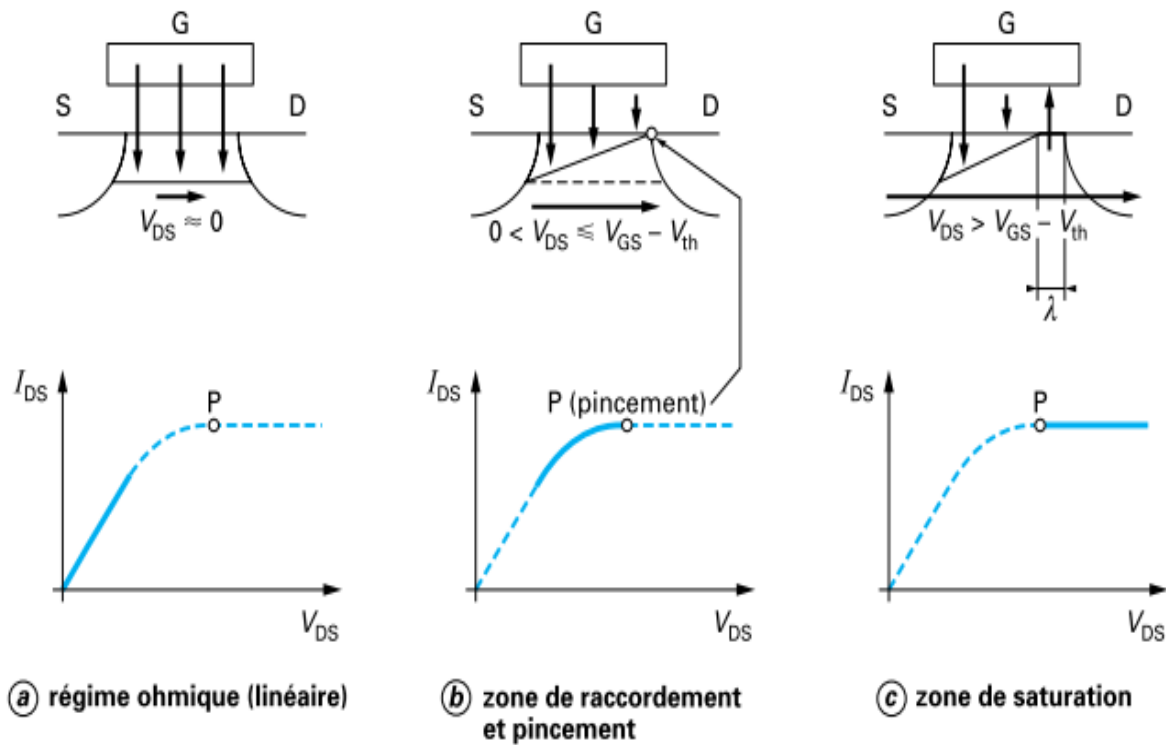


Figure 7 : Différents régimes de fonctionnement en fonction de V_{DS} [3].

I-4 Caractéristiques électriques

I-4-1 Caractéristique de sortie et de transfert en régime linéaire $I_{DS} = f(V_{DS})$ et $I_{DS} = f(V_{GS})$

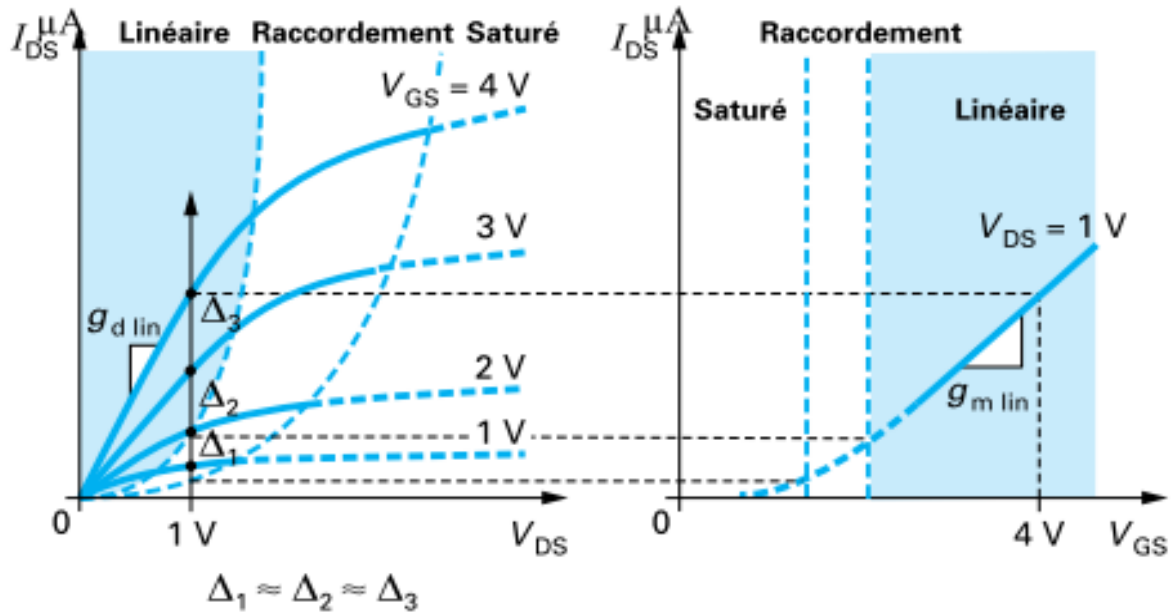


Figure 8 : Caractéristique de sortie et de transfert du MOSFET en régime linéaire [3].

I-4-2 Caractéristique de sortie et de transfert en régime saturé $I_{DS} = f(V_{DS})$ et $I_{DS} = f(V_{GS})$

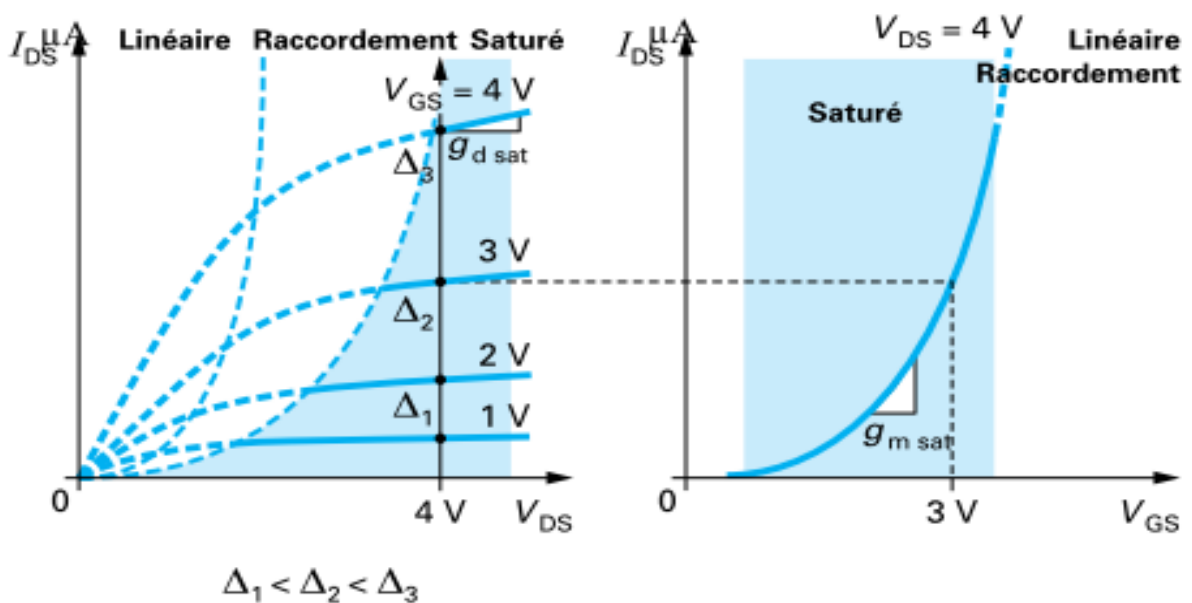


Figure 9 : Caractéristique de sortie et de transfert du MOSFET en régime saturé [3].

En fonction de la polarisation du drain, nous pouvons distinguer trois régimes des transistors MOSFET :

- ✓ Quand V_{DS} est négligeable devant V_{GS} le canal se comporte comme une résistance indépendante de la polarisation du drain. L'effet de champ est quasi uniforme le long du canal. La caractéristique $I_{DS}=f(V_{DS})$ est linéaire. Le MOS travaille en **régime ohmique** ou **linéaire**
- ✓ Quand V_{DS} n'est plus négligeable devant V_{GS} la capacité MOS est moins polarisée coté drain que coté source. La tension à travers la couche d'oxyde vaut V_{GS} du coté source, mais $(V_{GS}-V_{DS})$ du coté drain. Le champ électrique est donc plus faible, ce qui entraîne une réduction de la densité de porteurs libre. Cette dernière peut disparaître complètement. La conductivité du canal s'annule au voisinage du drain quand : $V_{DS}=V_{DSat}=V_{GS}-V_{th}\approx V_p$. C'est la valeur pour laquelle le pincement apparaît à l'extrémité drain du canal. C'est le **régime de pincement**. Il s'agit ici d'un effet de concentration de porteurs et non d'un effet géométrique. La zone entre le régime linéaire et le point de pincement est appelée **zone de raccordement** ou **zone de transition**.
- ✓ Quand V_{DS} est plus grande que $(V_{GS}-V_{th})$ le champ électrique, coté drain change d'orientation, et le point de pincement se déplace légèrement vers la source. Le potentiel au point de pincement est constant. Il est déterminé par la condition du champ transversal nul. La conductance du canal varie avec la tension drain source, ce qui entraîne une variation non linéaire du courant de drain. La tension drain source correspondante, est appelée tension de saturation V_{dsat} . Le courant correspondant est appelé courant de saturation I_{dsat} . Il doit y avoir une continuité du courant dans chaque section du canal, y compris la section pincée. Le transistor MOSFET travaille alors en **régime de saturation**.

Chapitre II

Présentation des matériaux organiques semi-conducteurs

II Physique des matériaux organiques

Les matériaux organiques peuvent se présenter sous la forme de petites molécules ou de longues chaînes appelés polymères. Elles possèdent une structure π conjuguée, alternance de simple liaisons et doubles liaisons. La différence entre ces matériaux réside dans la taille des molécules. Leur fonctionnement est le même, seules les techniques de fabrication différencient.

II-1 Notion de conjugaison

Le phénomène de conjugaison dans les matériaux organiques est lié à la succession de liaisons simples et doubles dans leur structure.

L'élément principal de l'ossature des matériaux organiques conjugués est le carbone. Il convient donc, de détailler ses caractéristiques et son rôle dans un système conjugué conducteur. Le carbone est un élément du tableau périodique qui appartient à la classe des semi-conducteurs. Il possède 4 électrons de valence. La configuration de la couche externe de l'atome de carbone ($2s^2 2p^2$) avec 2 électrons non appariés dans les deux orbitales atomiques $2p^2$, le troisième orbitale $2p$ étant non occupée, est très instable (figure 10). Ainsi à l'état excité un électron de la couche externe va passer de l'orbitale $2s$ à l'orbitale $2p$ (figure 10).

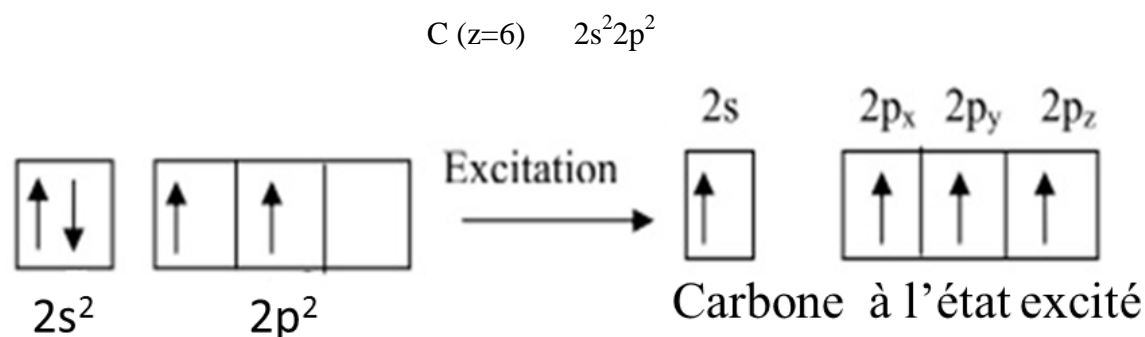


Figure 10 : Représentation case quantique de la couche externe de l'atome de carbone lors de son passage de l'état fondamental à l'état excité [5].

La création de liaisons covalentes avec d'autres atomes, entraîne pour l'atome de carbone la fusion des orbitales atomiques $2s$ avec les orbitales atomiques $2p$ (hybridation) pour former de nouveaux orbitaux hybrides. Parmi les différents types d'hybridation qui peuvent survenir (sp^3 , sp^2 , sp). Nous nous intéressons à l'hybridation de type sp^2 . Ce type d'hybridation se produit lors de la formation des liaisons doubles entre atomes de carbone qui constitue l'ossature des systèmes conjugués. Ce type d'hybridation est illustré sur la figure 11 dans le cas d'une molécule d'éthylène. Elle est obtenue par la combinaison de l'orbitale atomique $2s$ avec deux des trois orbitales atomiques $2p$ ($2p_x$ et $2p_y$) qui deviennent trois orbitales atomiques hybrides sp^2 formant une géométrie trigonale coplanaire de 120° . Ainsi,

après la formation de la double liaison, l'atome de carbone est entouré de trois orbitales hybrides sp^2 et d'une orbitale $2p_z$ orientée perpendiculairement au plan des orbitales sp^2 . Chaque orbitale hybride sp^2 pointe vers l'atome voisin (carbone ou groupe alkyle) et par recouvrement les orbitales de chacun des atomes forme une liaison covalente. Rappelons que l'atome de carbone possède 4 électrons de valence et les orbitales hybrides sp^2 ne forment des liaisons qu'avec trois voisins. Il reste donc un électron non apparié autour de l'atome. Cet électron, se trouve dans l'orbitale atomique $2p_z$. Le recouvrement latéral des orbitales $2p_z$ de chaque atome de carbone contenant chacune un électron non apparié forme l'orbitale moléculaire π . En résumé l'hybridation donnant lieu à la double liaison entre atomes de carbone entraîne la formation de deux types d'orbitales :

- Les orbitales hybrides sp^2 sont en nombre de trois et qui contiennent chacune un électron. Elles forment par recouvrement axial les liaisons σ entre atomes de carbone.
- L'orbitale $2p_z$ est perpendiculaire au plan des orbitales sp^2 qui contient un électron. Le recouvrement latéral de ces orbitales formes la liaison π .

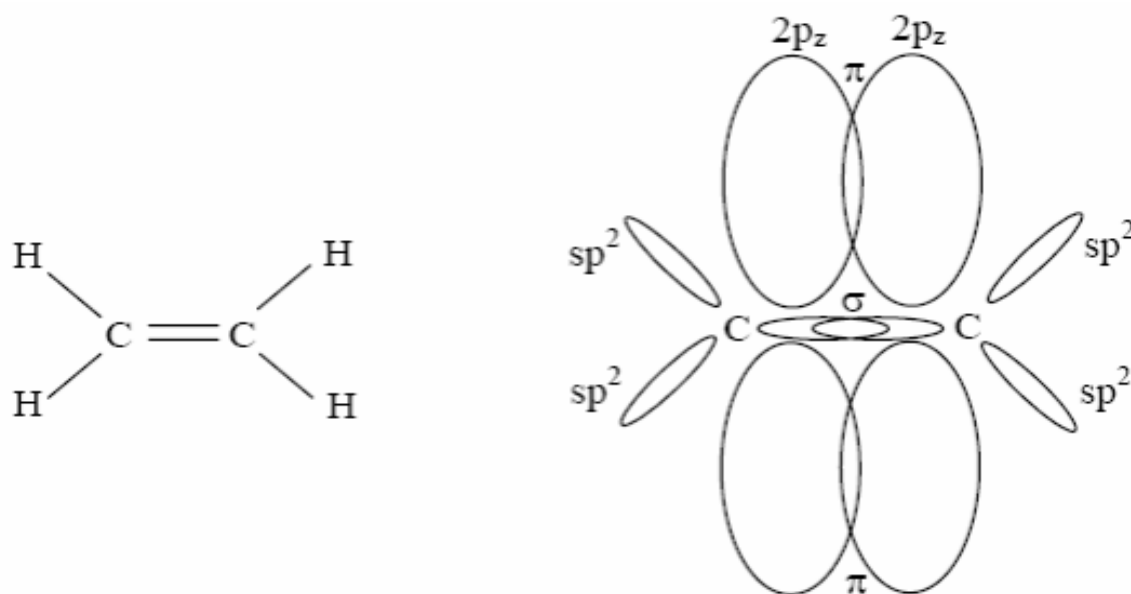


Figure 11 : Représentation des orbitales π et σ de la molécule d'éthylène [5].

Les électrons σ sont peu mobiles et les liaisons qui en résultent sont rigide et constituent le squelette plan saturé de la molécule. Par conséquent, les électrons formant cette liaison ne peuvent jamais se déplacer et participer à la conduction. La double liaison est donc constituée d'une liaison σ et d'une liaison π . Si les atomes voisins possèdent aussi une orbitale p_z , comme dans le cas du benzène, de l'antracène ou du thiophène, un système d'orbitale π délocalisées se crée le long de la chaîne (voir figure 12). Ce système continu

d'électrons π est à l'origine de la conduction dans les matériaux organiques. Les matériaux offrant un système d'orbitales π délocalisées sont constitués d'un ensemble alterné de liaisons simples et doubles, ce sont des matériaux conjugués.

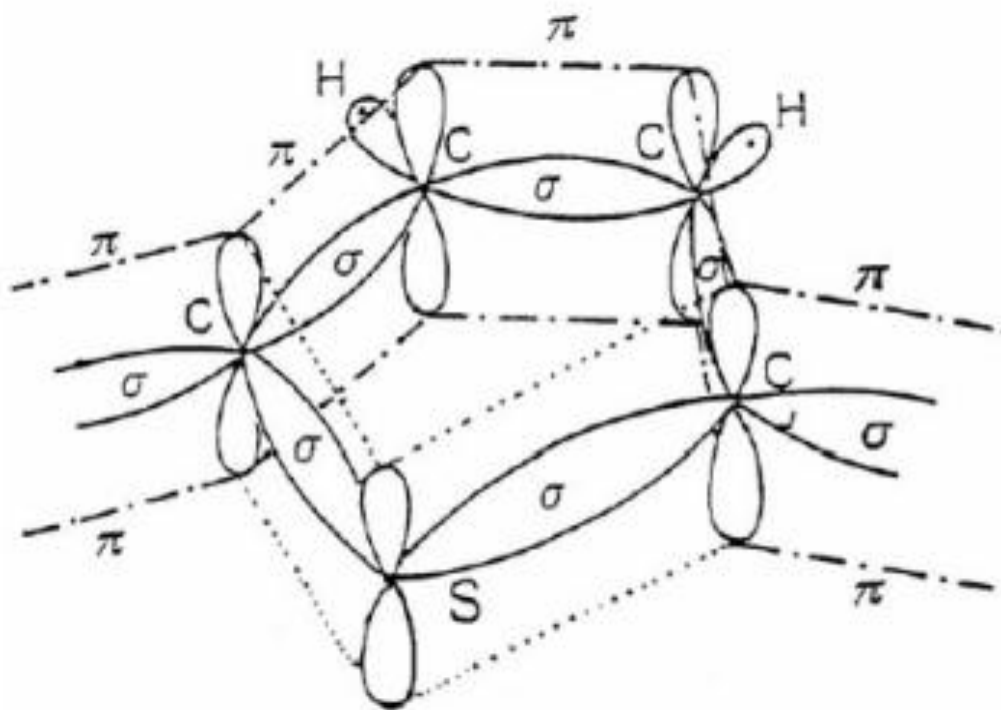


Figure 12 : Structure d'une molécule de thiophène : représentation des liaisons π et σ [5].

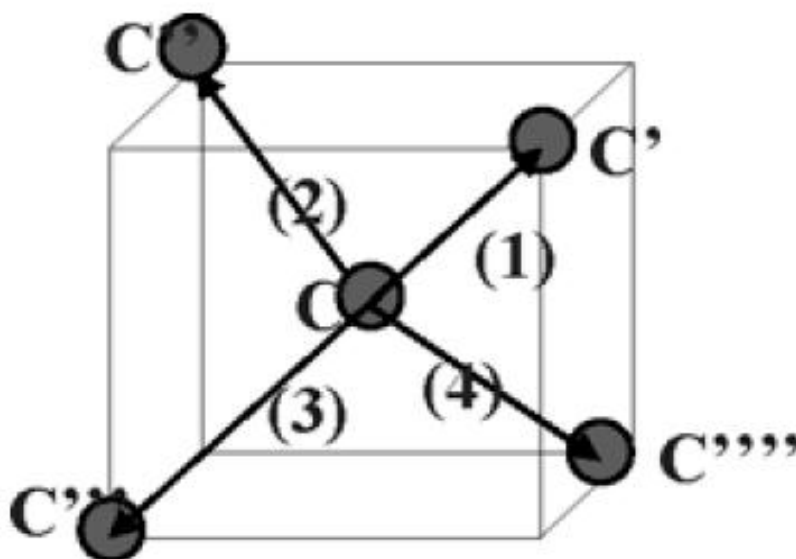


Figure 13 : Repérage des différents atomes et des couplages possibles (hybridation sp^3) [6].

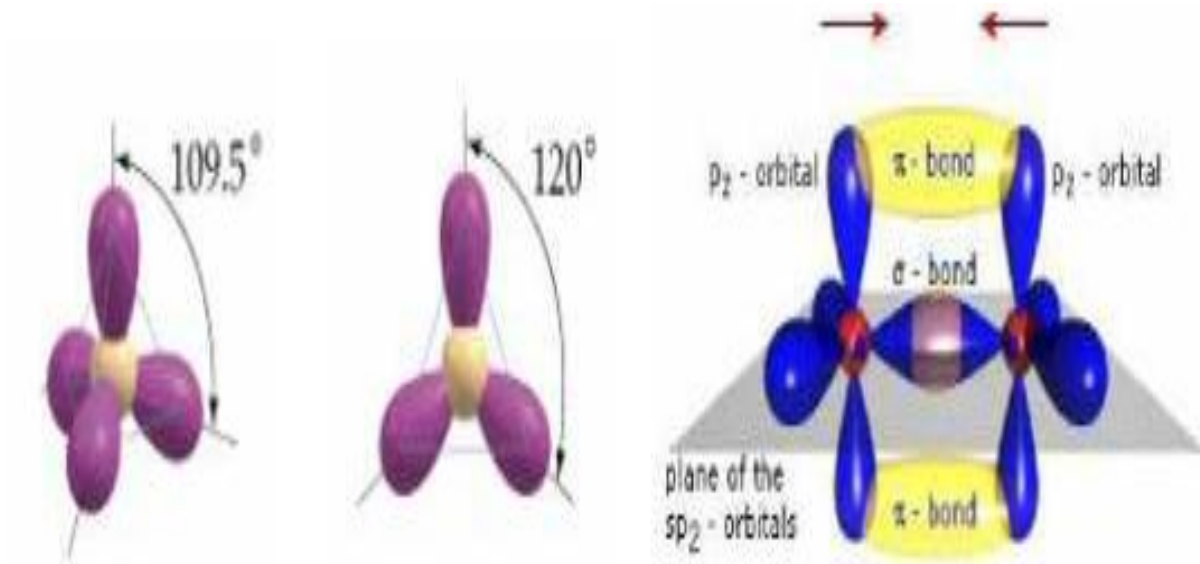


Figure 14 : Représentation du carbone hybridé sp^3 , sp^2 de la double liaison (σ et π) [7].

Dans une chaîne polymère, des atomes voisins possèdent eux aussi une orbitale $2p_z$, une liaison π peut se créer entre les atomes regroupés deux à deux. L'alternance de simples et doubles liaisons dans la chaîne favorise le recouvrement de ces liaisons π de proche en proche. Un système d'électrons délocalisés peut finalement se créer sur l'ensemble de la molécule. Les électrons π correspondants aux orbitales p_z recouvertes ne sont pas assignés à un atome carbone en particulier. Ainsi, l'électron peut passer d'un atome de carbone à l'autre. La possibilité de délocalisation des électrons π est à l'origine des propriétés électroniques des matériaux organiques conjugués.

Dans le cas idéal, le système d'électrons π devrait être étendu d'une façon continue sur toute la chaîne constituant le matériau organique. La chaîne peut être constituée par la molécule elle-même dans le cas où elle est grande pour les polymères. La délocalisation se fera sur la molécule. Sinon pour les petites molécules, la délocalisation se fait d'une molécule à l'autre.

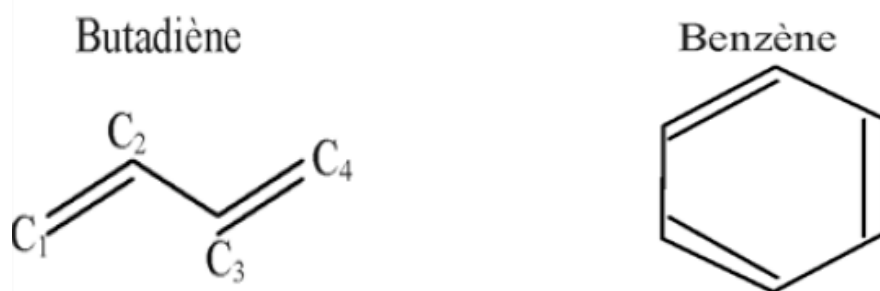


Figure 15 : Exemples de structure π conjuguées [6].

Toutefois, la délocalisation des électrons π le long de la chaîne n'est pas généralement homogène. Des irrégularités d'enchaînements ou d'autres défauts peuvent être présents dans les systèmes réels ce qui interrompt la conjugaison. Cela signifie que les effets de la conjugaison ne se propagent que sur une distance caractéristique appelée longueur effective de conjugaison inférieure à la longueur réelle de la molécule. Par conséquent, les propriétés de conduction vont dépendre de cette longueur effective du système conjugué. La mobilité est la facilité avec laquelle les porteurs de charges vont pouvoir se déplacer dans le matériau. On conçoit qu'un porteur de charge délocalisé pourra se mouvoir facilement le long de la chaîne. Tout défaut entraînant une diminution de cette longueur de conjugaison contraindra les charges à sauter d'un site à l'autre, et donc aura tendance à limiter la mobilité.

II-1-1 Le P3HT (poly 3-hexylthiophène)

Le P3HT est le matériau modèle et les nombreuses études menées sur ce polymère apportent un éclairage intéressant sur les mécanismes favorisant la mobilité des trous dans les transistors. Historiquement, le P3HT regioregulier est le premier polymère soluble pour lequel, il a été possible d'obtenir une forte mobilité, de l'ordre de $0,1 \text{ cm}^2/\text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$ et un fort ratio $I_{\text{ON}}/I_{\text{OFF}}$. Ce résultat a été obtenu en dopant le polymère pour obtenir une faible conductivité et donc un faible courant I_{ON} et en utilisant ses propriétés d'organisation et de cristallisation afin d'obtenir une forte mobilité de charges.

Le P3HT se présente sous deux formes que l'on appelle P3HT random ou P3HT regioregulier suivant la chaîne latérale alkyl sur le cycle thiophène est greffée de manière aléatoire ou ordonnée le long de la chaîne macromoléculaire (Figure 16).

Le vieillissement des polymères est une problématique récurrente de ces matériaux et les polymères semi-conducteurs n'échappent pas à cette règle. A cause de leur gap optique situé dans le spectre visible, ils sont photosensibles. Sous l'absorption de la lumière UV et en présence d'oxygène, des modifications chimiques irréversibles de la chaîne polymère peuvent être induites, avec formation de groupements carbonyles. La conséquence est une diminution de la conjugaison et donc de la mobilité des porteurs. Siemens a néanmoins montré des résultats encourageants et l'état de l'art dans ce domaine, présente des dispositifs stables même après un an de stockage.

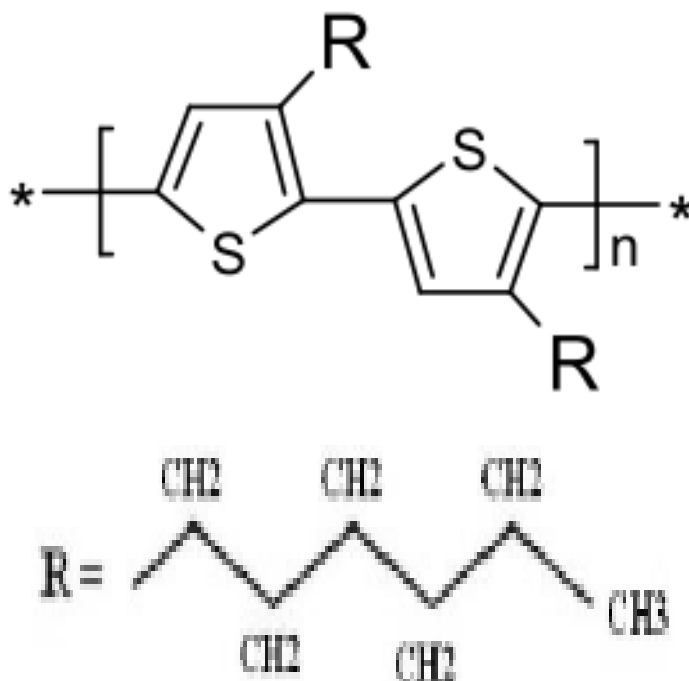


Figure 16: Représentation modèle de base de la structure moléculaire de P3HT [7].

II-1-2 Le pentacène

C'est un composé chimique de la famille des hydrocarbures aromatiques polycycliques, formé de cinq noyaux benzéniques fusionnés linéairement (Figure 17).

Sa structure conjuguée étendue et sa structure cristalline en font un bon semi-conducteur organique, de type p (donneur d'électrons). Le pentacène est un bon candidat pour la fabrication de transistors organiques à films minces car il possède des caractéristiques exceptionnelles notamment une mobilité de $5,5\text{cm}^2/\text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$ ce qui est proche de celle du silicium amorphe. Cette molécule permet la formation de films minces poly cristallins sur des surfaces lisses.

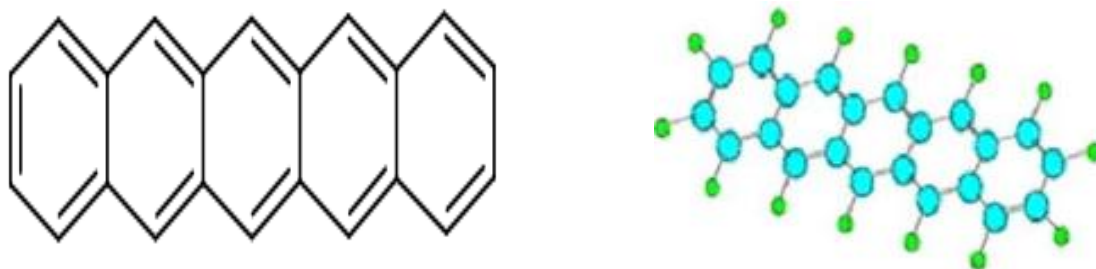


Figure 17 : Représentation modèle de base de la structure moléculaire de pentacène [7]

II-2 Introduction des matériaux organiques dans les transistors MOSFET

Les transistors organiques (OFET) sont des MOSFETs (Metal-Isolant-Semiconductor-Field-Effect-Transistor) en couches minces assez similaires au MOSFET (Metal-Oxyde-Semiconducteur-Field-Effect-Transistor) en silicium amorphe. C'est la raison pour laquelle on utilise classiquement pour les OTFTs (organic thin film transistors) le modèle de fonctionnement des MOSFET. Ce modèle implique que la mobilité des porteurs de charges est constante et que le champ transverse dans le canal conducteur est bien plus grand que le champ longitudinal (conditions dites de "l'hypothèse du canal long"). Cette dernière condition est remplie quand la longueur entre la source et le drain est très supérieure à l'épaisseur de l'isolant.

L'idée de l'introduction des matériaux organiques dans les MOSFET a été mise en évidence avec la découverte de l'effet transistor dans les organiques à la fin des années 80, notamment la réalisation de transistors à effet de champ organiques, OFET (Organic Field Effect Transistor), à partir de polymères, le poly(N-méthylpyrrole) et le polythiophène, ou à partir de petites molécules. Cependant, ce n'est qu'au début des années 2000 qu'une production scientifique importante a eu lieu avec une forte croissance : 80 publications significatives dans le domaine en 1999, 304 en 2003, puis 393 en 2004 [8]. Jusqu'au début des années 2000, ce sont quasi-exclusivement des transistors organiques en couches minces (OTFT pour Organic Thin Film Transistor) à canal de type p qui ont pu être étudiés ; le problème des transistors à canal de type n est leur très grande réactivité, vis-à-vis de l'oxygène notamment, et des solutions ont pu être trouvées récemment (autour de l'année 2007), notamment avec l'usage de molécules perfluorées à la fois conductrices d'électrons et stables à l'air. Ainsi, de nombreux matériaux initialement considérés de type p uniquement se sont en fait révélés ambipolaires avec l'usage de diélectriques de grille appropriés : cas par exemple du pentacène, avec une mobilité d'électron de $0,005 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ et une mobilité de trou de $0,4 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ [8]. Cependant, hormis l'espoir initial de développer des transistors organiques électroluminescents (OLET) la possibilité de développer une technologie complémentaire avec ce type de matériau était vaine (puisque un transistor ambipolaire est passant pour les deux polarisations de grille). De plus, les transistors à effet de champ organiques ne sont pas adaptés pour un usage à hautes fréquences. Toutefois, Avec l'arrivée de vrais matériaux organiques de type n, la possibilité de développer une électronique organique complémentaire est devenue réelle, ils se placent comme de très bons candidats pour des applications faibles coûts à faible complexité technologique, avec de basses températures de réalisation et sur de grandes surfaces. La souplesse de ces matériaux est aussi exploitable. On pense aux étiquettes RFID (Radio Frequency Identification) (pour identification, sécurité, passeport, détection de contrefaçon), à des matrices actives d'écrans à cristaux liquides ou à base de diodes organiques mais on peut aussi évoquer la réalisation de capteurs, de circuits intégrés, de papiers électroniques...etc. C'est-à-dire un large marché qui pourrait exploiter les qualités de souplesse de l'électronique organique.

Chapitre III

Représentation d'un transistor à effet de champ
organique

III Introduction

Le transistor est la pièce maîtresse de toute l'électronique, Il est aujourd'hui présent par milliards dans les circuits intégrés pour gérer de plus en plus vite des calculs de plus en plus complexes.

Le transistor à deux usages principaux: amplifier un signal pour lui permettre d'acquérir une puissance suffisante ou jouer un rôle de commutateur, comme dans les puces de nos ordinateurs.

Le domaine de l'amplification est pour l'instant limité par le gain réduit des transistors organiques. Par contre dans le second usage, même sans atteindre des performances équivalentes à celles des transistors classiques en termes de vitesse de commutation de gain et de seuil, les transistors organiques pourront être exploités dans de nombreuses applications.

Un transistor organique à effet de champ, nommé OFET (Organic Field Effect Transistor), a la particularité d'utiliser l'effet du champ électrique pour contrôler la densité de porteurs dans le dispositif et ainsi l'intensité du courant le traversant.

III-1 Configuration des OFET (Organic Field Effect Transistor)

Le transistor organique à effet de champ est constitué de trois électrodes conductrices source (S), drain (D), grille (G). Il est basé sur une structure de type MIS (Métal Isolant Semi-conducteur), le semi-conducteur est déposé en très fine couche.

Il est alors possible d'envisager plusieurs géométries des transistors organiques en fonction de la position de semi-conducteur (couche active). La figure 18 montre les quatre architectures de base utilisant un empilement « classique » des différentes couches du transistor. On les classifie comme grille basse (Bottom Gate) ou grille haute (Top Gate) selon la position de la grille est respectivement au-dessous ou au-dessus du semi-conducteur. Le type de contact en fonction de la position de la source et de drain par rapport au semi-conducteur. On aura alors un contact au-dessus appelé Top Contact ou contacts en dessous appelé Bottom Contact

D'un point de vue des performances des transistors, ces différentes architectures ne seront pas équivalentes. Il apparaît que selon le dispositif, nous serons en présence soit d'une interface semi-conducteur-isolant ou d'une interface isolant- semi-conducteur. Ces géométries avec les mêmes matériaux ne posséderont pas nécessairement les mêmes propriétés. Chaque géométrie possède ses avantages et ses inconvénients en fonction des matériaux, des technologies de dépôt utilisées et des propriétés finales de transistor.

Quel que soit l'architecture retenue, comme le semi-conducteur est potentiellement sensible à toute pollution, on s'arrangera pour limiter le nombre d'étapes technologiques sur cette couche. Mais, l'architecture Top Gate offre la possibilité intéressante d'encapsuler, de protéger le semi-conducteur. En ce qui concerne les contacts, la structure Bottom Contact est généralement la plus pratique à mettre en œuvre, mais la top-contact tend à donner de meilleures propriétés grâce à une plus grande surface de contact pour injecter les charges

Au moment de la conception, la technologie de fabrication va beaucoup influencer sur les performances des transistors organiques.

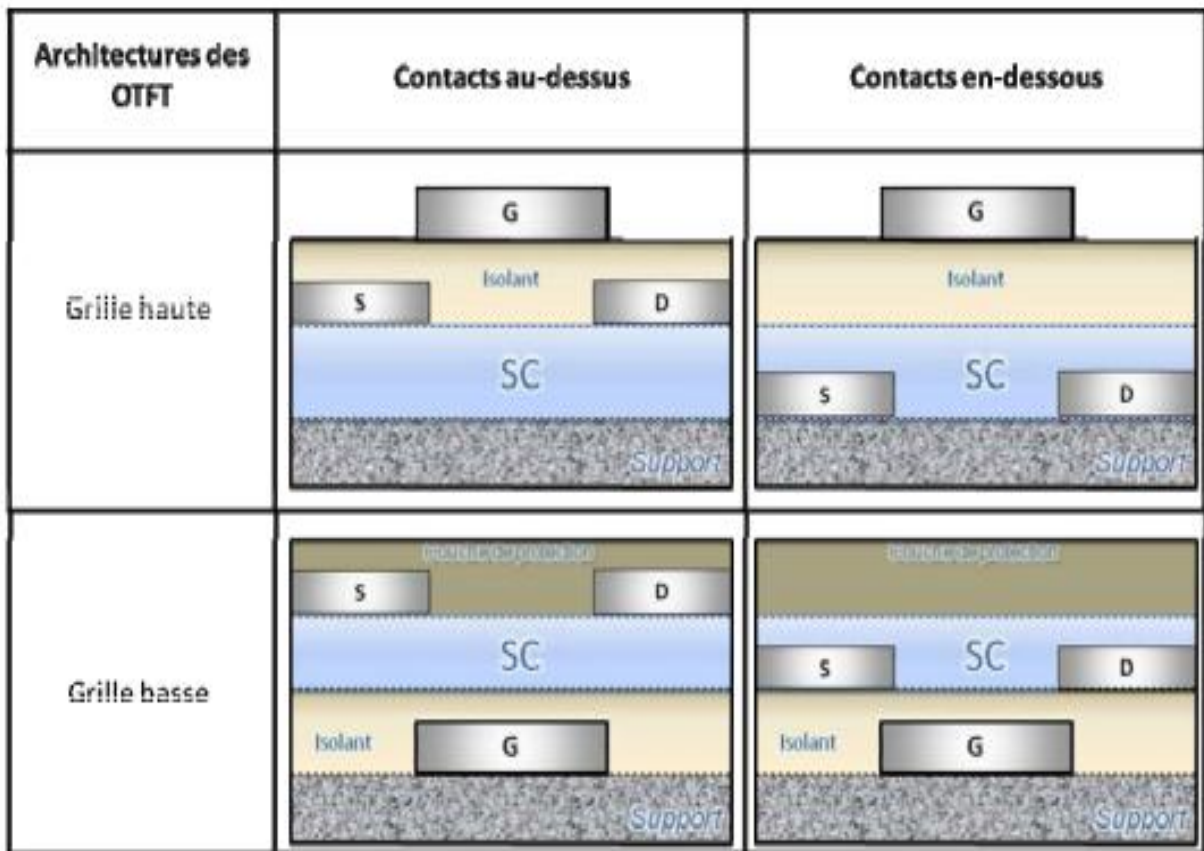


Figure 18 : Différentes architectures « classiques » de transistors à effet de champ organiques [9].

III-2 Principe de fonctionnement

Les transistors organiques (OFET) sont des MOSFETS en couches minces assez similaires au MOSFET en silicium amorphe. Ils se caractérisent aussi par une électrode de grille isolée du reste du dispositif. Cependant, la faible densité de porteurs des semi-conducteurs organiques fait que les OFETs fonctionnent en accumulation et non en inversion. Le transport de charges a lieu dans les premières monocouches de la couche semi conductrice, à l'interface avec le diélectrique de grille. Il n'y a donc pas de zone de charge d'espace qui se crée dans le substrat pour isoler le canal de conduction du substrat.

Le principe de base des OFET est la modulation du courant entre deux électrodes, source (S) et drain (D), en fonction d'une tension appliquée sur une troisième électrode, la grille (G). La zone conductrice entre le drain la source est appelée canal du transistor. Dans le cas des OFETs, la grille est isolée du canal par un isolant comme l'illustre la figure 19. On définit la longueur de canal L , comme la distance entre la source et le drain W est la largeur de canal qui est appelée développement de grille comme la dimension transversale de la structure. La figure 19 présente une structure de type Bottom Gate Top Contact (BGTC). Dans cette structure les contacts ohmiques (linéaire) drain et source sont déposés en dessus

du semi-conducteur et la grille déposée en bas de la structure.

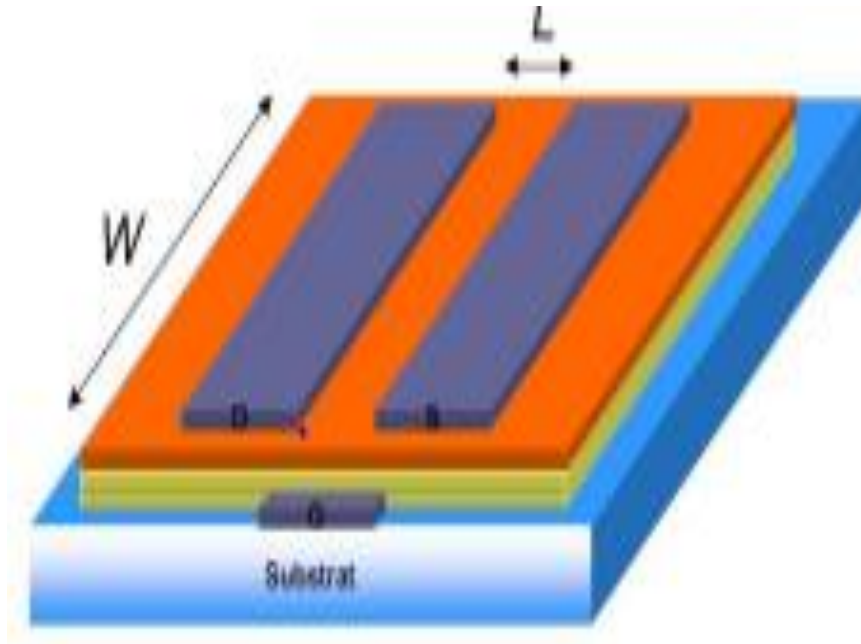


Figure 19 : Représentation schématique d'un transistor à effet de champ organique (OFET) [10].

On dit que le transistor est en état « On », lorsqu'un courant circule entre les deux électrodes source et drain pour une tension appliquée à la grille. L'intensité du courant est modulée par la tension appliquée à l'électrode de grille.

En première approximation, pour que l'injection des charges depuis les électrodes vers le canal soit efficace, les niveaux électroniques du conducteur (niveau de Fermi E_F) et du semi-conducteur (HOMO et LUMO) doivent être choisis de façon à ce qu'ils soient alignés. Si le niveau de Fermi est aligné avec l'HOMO, les charges injectées seront de préférence des trous. S'il est aligné avec LUMO, les charges injectées seront des électrons.

Prenons l'exemple d'un semi-conducteur type p, si une tension de grille négative est appliquée, les bandes se courbent vers le haut et les trous s'accumulent à l'interface isolant/semi-conducteur, comme le montre la figure 20. Si le drain est polarisé négativement par rapport à la source, les charges circulent de la source vers le drain. Par contre, si une tension positive est appliquée à la grille, une zone de déplétion se forme à l'interface (Figure 20).

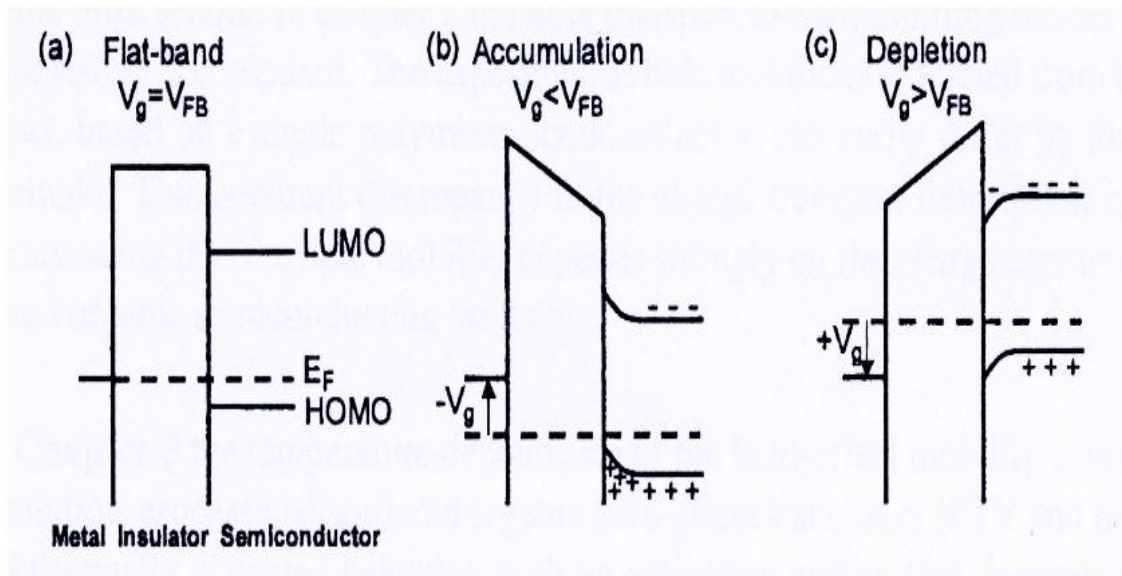


Figure 20 : Diagramme d'énergie d'un transistor organiques de type p : (a) régime de bande plate, (b) régime d'accumulation, (c) régime de déplétion [11].

III-3 Régimes de fonctionnement

Un transistor à effet de champ organique fonctionne essentiellement en accumulation sous l'effet d'une tension appliquée entre la grille et la source, des porteurs provenant des contacts source et drain sont accumulés à l'interface isolant-canal. La Figure 21 illustre le diagramme simplifié des niveaux d'énergies électroniques avec et sans polarisation. Les parties (a) et (b) montrent les positions des bandes HOMO et LUMO du semi-conducteur relativement au niveau de Fermi de la grille. Dans le cas à gauche, la polarisation de grille est nulle. Sans polarisation de grille, si une tension source-drain est appliquée, il n'y aura pas de conduction du fait de l'absence de charges mobiles dans le semi-conducteur.

L'application d'une tension de grille V_{GS} crée un champ électrique à travers l'isolant et induit une courbure des niveaux HOMO et LUMO au voisinage de l'interface avec l'isolant. Pour un OFET de type n par exemple, l'application d'une tension V_{GS} positive décale les niveaux HOMO et LUMO vers le bas à l'interface, provoquant une accumulation d'électrons. En présence d'une tension drain-source, les électrons pourront alors circuler et un courant I_{DS} traversera le transistor.

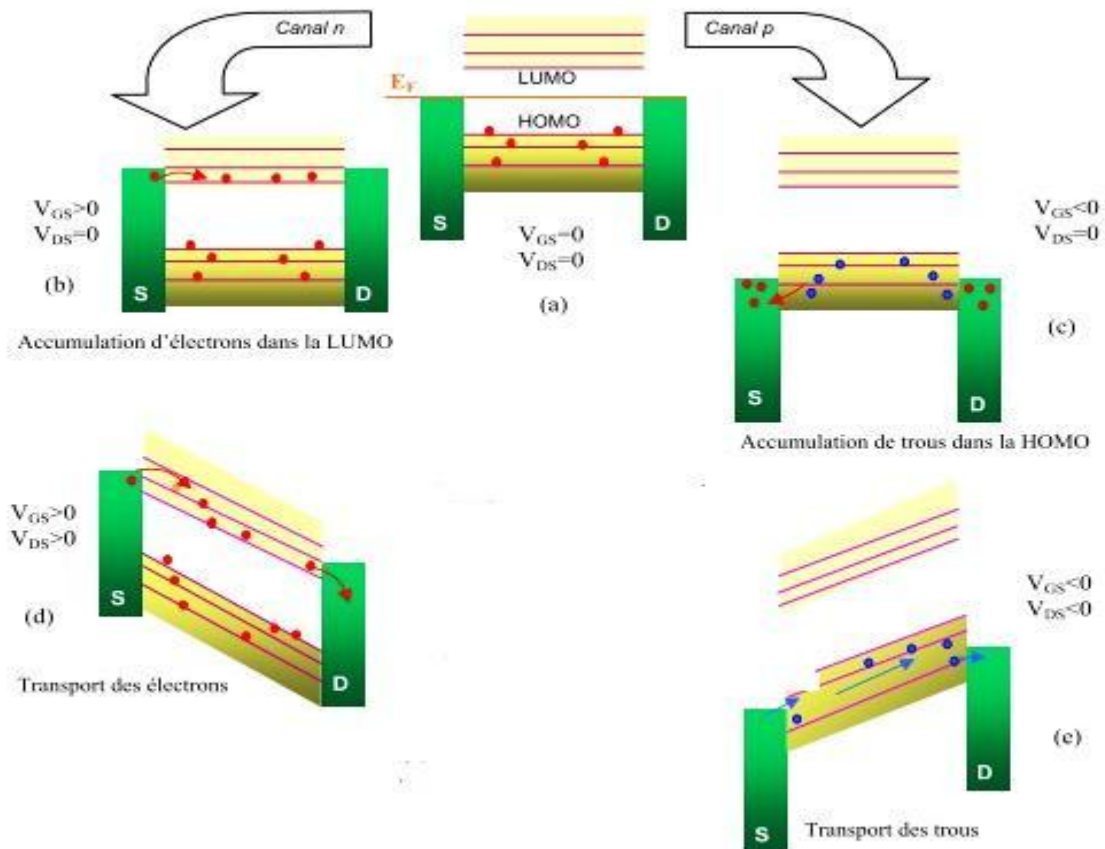


Figure 21 : (a) : schéma idéalisé du diagramme de bandes d'un OTFT à $V_{GS} = V_{DS} = 0$
 (b) : accumulation d'électrons avec $V_{GS} > 0$
 (c) : accumulation de trous avec $V_{GS} < 0$
 (d) : effet d'une tension $V_{DS} > 0$ sur le transport des électrons.
 (e) : effet d'une tension $V_{DS} < 0$ sur le transport des trous [7].

Une polarisation de grille négative est appliquée pour un transistor de type P (Figure 21). Les niveaux HOMO et LUMO se décalent vers le haut, la HOMO interagit avec les niveaux de Fermi des contacts et des électrons sortent du semi-conducteur par les contacts, laissant des trous chargés positivement derrière eux. Ces trous sont alors des charges mobiles qui bougent en réponse à une tension appliquée au drain. Il faut noter que l'électrode de source est toujours le contact d'injection des porteurs quel que soit le signe de la polarisation de grille.

La Figure 21 montre le mécanisme de la conduction dans les OFET, qui est modulée par la tension de grille. Il s'agit d'une description simplifiée qui pourrait par exemple amener à croire que tout semi-conducteur organique peut conduire aussi bien les trous que les électrons suivant le signe de la tension de grille. En général, un semi-conducteur organique conduira préférentiellement un seul type de porteur. La présence de pièges dans les différents matériaux et à leurs interfaces, la nature et la qualité des contacts de drain et source représentés sur ces figures, leur positions énergétique influenceront le type de conduction de manière déterminante.

III-3-1 régime linéaire :

Pour une tension V_{DS} faible ($V_D = V_G - V_{Th}$), I_D varie proportionnellement (linéairement) avec la tension de drain source V_{DS} , le transistor se comporte comme une résistance variable commandée par la tension de grille.

$$I_{DS} = W \frac{C_i}{L} (V_{GS} - V_{Th} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} \dots \dots \dots (15)$$

Avec :

W : la largeur du canal

L : longueur de canal

C_i : capacité par unité de surface de l'isolant de grille

V_{DS} : polarisation source/drain

V_{GS} polarisation grille/source

V_{Th} : la tension de seuil.

III-3-2 Régime sous linéaire:

Quand la tension drain-source augmente au-delà du régime linéaire, la densité de porteurs libres décroît au voisinage du drain, et le courant de drain présente une variation sous-linéaire.

III-3-3 Régime de saturation:

On atteint le régime de saturation lorsque la densité de porteurs devient nulle du côté drain. Le courant drain ne peut plus augmenter avec la tension drain et se sature. Le courant de saturation dépend de la tension de grille.

$$I_{Dsat} = W \frac{C_i}{2L} (V_{GS} - V_{Th})^2 \dots \dots \dots (14)$$

La Figure 22 décrit la formation du canal dans les différents régimes pour un transistor MOS à canal de type n.

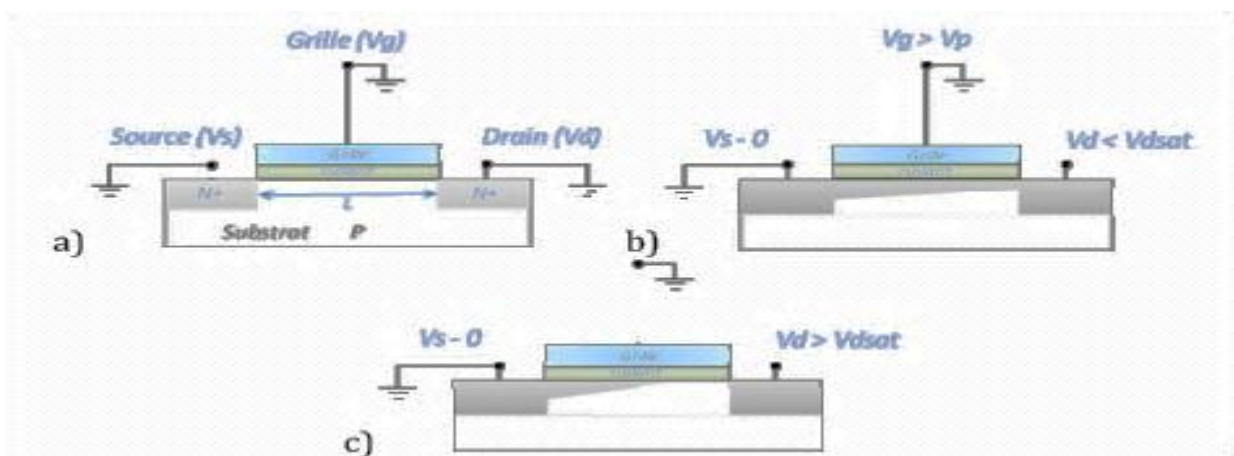


Figure 22 : Principe de fonctionnement d'un transistor à effet de champ : (a) état bloqué, (b) régime linéaire et (c) régime de saturation [9]

III-4 Caractéristiques électriques

III-4-1 Caractéristique de sortie :

La première caractéristique permettant de visualiser le fonctionnement d'un transistor à effet de champ consiste à tracer son courant de drain I_{DS} en fonction de la tension de drain V_{DS} pour différentes tension de grille V_{GS} . Lorsque $V_{DS} \leq (V_{GS} - V_{Th})$, la densité de charges considérée comme uniforme dans le canal de conduction, le type de régime est le régime linéaire.

Au fur et à mesure que la tension de drain devient plus négative que la tension de grille une zone de déplétion apparaît, le courant de drain tend alors vers le régime de saturation comme le montre la figure 23.

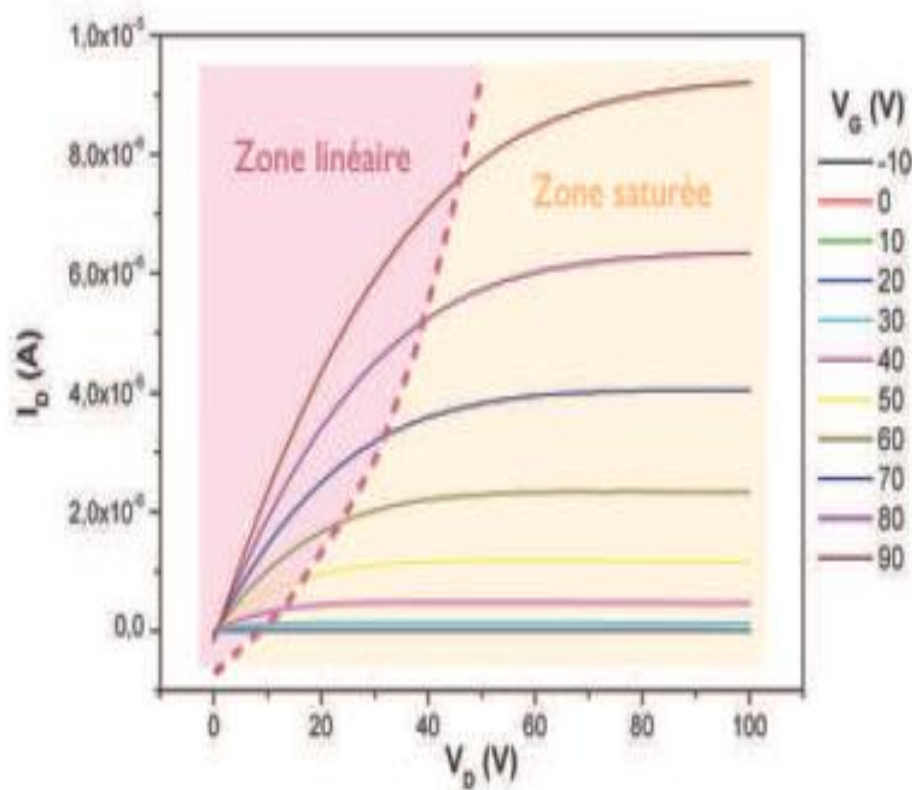


Figure 23 : Caractéristique de sortie d'un transistor OFET [13].

III-4-2 Caractéristique de transfert :

Un transistor à effet de champ est une source de courant (I_{DS}) commandée en tension de grille (V_{GS}). Le gain du composant sera d'autant meilleur que la variation de courant I_D sera forte pour une variation donnée de la tension de grille. Ce gain dépend d'un certain nombre de paramètres physique du transistor et notamment de la mobilité des porteurs de charge. La figure 24 présente la caractéristique de transfert d'un transistor organique.

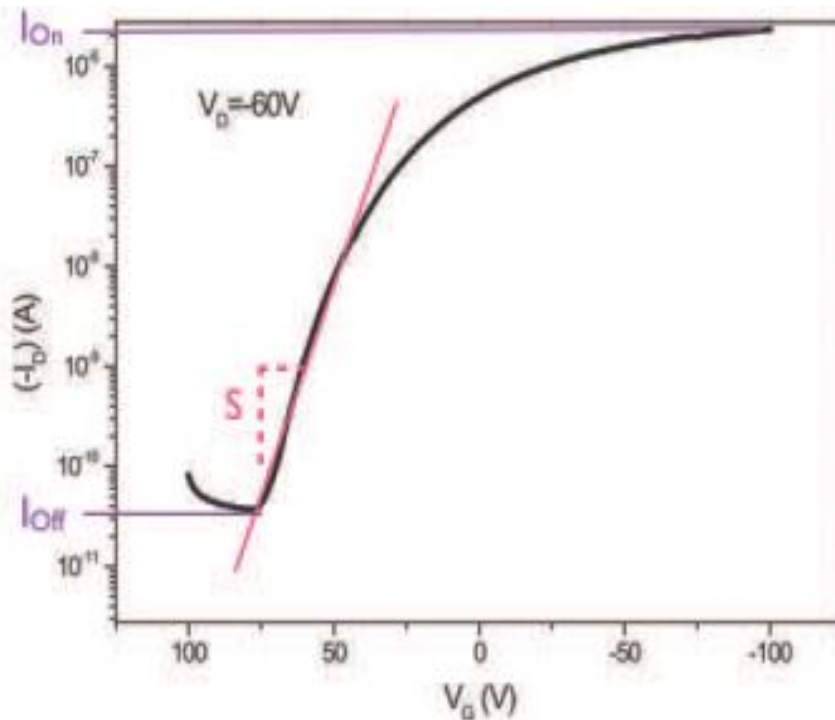


Figure 24 : Caractéristique de transfert d'un transistor OFET [13].

III-5 Les paramètres essentiels d'un OFET

III-5-1 Mobilité

La mobilité peut être définie comme la capacité avec laquelle les porteurs de charges vont pouvoir se déplacer dans les matériaux sous l'effet d'un champ électrique. Ils'agit du rapport de la vitesse moyenne des charges au champ électrique soit :

$$\vec{v} = \mu \vec{E} \dots \dots \dots (17)$$

Elle s'exprime en $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$. Une mobilité élevée est nécessaire pour réaliser des transistors ayant un courant élevé et des temps de réponses rapides, ou un gain important. C'est un paramètre clefs. Cependant, les valeurs de mobilité obtenues jusqu'à maintenant dans les polymères n'ont pas dépassés celle du silicium amorphe. A titre de comparaison la mobilité des électrons dans le silicium cristallin peut atteindre $130 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$.

Ce paramètre est extrait à partir de la courbe de sortie (I_D f(V_G)). Lorsque l'on trace la courbe de sortie, le courant de drain (I_{DS}) est régi par l'équation suivante :

$$I_D = \frac{W \mu C_i}{2L} (V_G - V_{Th})^2 \dots \dots \dots (18)$$

Avec :

W : la largeur du canal

L : longueur du canal

C_i : capacité de l'isolant

L'extraction de la mobilité se fait en régime de saturation. Pour l'extraire, il faut s'affranchir de la tension de seuil V_{Th} que l'on ne connaît pas à l'avance. On peut le faire en traçant à V_{DS} constant. On a alors :

$$\sqrt{\mu} = \frac{\sqrt{I_D}}{V_G - V_T} * \sqrt{\frac{2L}{WC_i}} \dots \dots \dots (19)$$

En dérivant par rapport à V_G, avec V_T constant, on a :

$$\sqrt{\mu} = \frac{\partial \sqrt{I_D}}{\partial V_G} * \sqrt{\frac{2L}{WC_i}} \dots \dots \dots (20)$$

On peut donc mesurer la mobilité à partir de la pente :

$$\sqrt{I_{DS}} = f(V_{GS}) \dots \dots \dots (21)$$

Cette mobilité influence de manière directe les principales performances attendues du transistor : courant de saturation, gain, fréquence de coupure, tensions de fonctionnement,...

Elle est l'objet de toutes les attentions, car sa faible valeur dans les matériaux organiques par rapport aux références usuelles (silicium en particulier) est une sérieuse limite pour de nombreuses applications. La figure 25 montre l'évolution avec le temps des mobilités obtenues pour un certain nombre de matériaux organiques. Ce graphique illustre la lente maturation de la technologie des dispositifs électroniques à base de matériaux organiques.

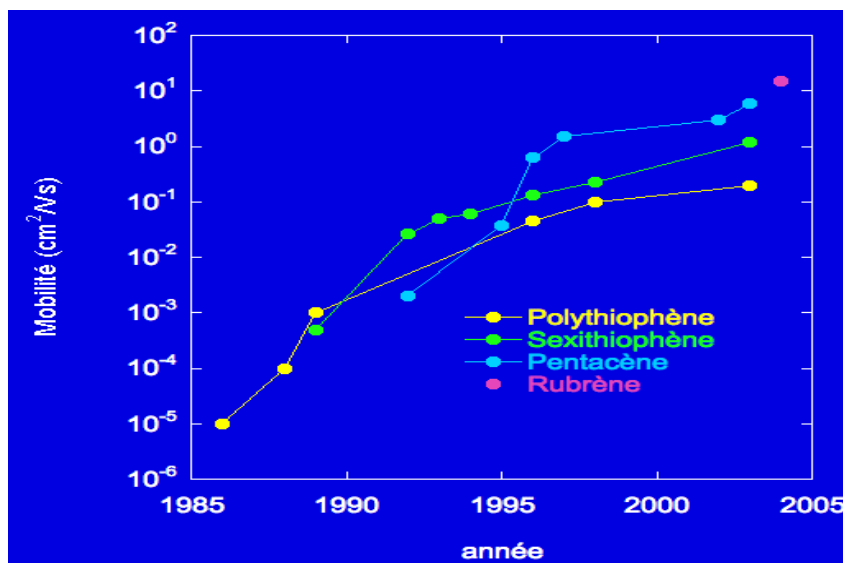


Figure25 : Exemple de mobilités [9].

III-5-2 Tension de seuil

Dans les MOSFETs classique (Métal Oxyde Semi-conducteur Field Effect Transistor), la tension de seuil est définie comme étant la tension de grille à partir de laquelle on atteint la forte inversion (la tension à partir de laquelle le canal commence à se former). Cependant dans les OFETs cette définition n'est pas valable car ces composants ne fonctionnent pas en inversion mais en accumulation. Donc de nombreuses discussions sont encore cours pour déterminer la valeur physique réelle de ce paramètre. Sa détermination est très importante pour la modélisation des circuits. Elle est exprimée par la formule suivante

$$V_{Th} = \frac{\pm q n_0 d}{C_i} + V_{fb} \dots \dots \dots (22)$$

Avec :

- q : charge élémentaire
- n_0 : densité de porteurs majoritaire
- d : l'épaisseur de la couche
- C_i : capacitance de l'isolant
- V_{fb} : tension de bandes plates.

A partir des caractéristiques électriques de transfert la tension de seuil peut être extraite par deux méthodes soit en régime linéaire ou bien en régime saturation et c'est la méthode la plus utilisée. V_{Th} est obtenue à partir de courbe transfert en extrapolant la tangente à la zone linéaire jusqu'à l'intersection avec l'axe des abscisses.

III-5-3 Rapport I_{ON}/I_{OFF}

A tension de drain V_{DS} donnée, le rapport I_{ON}/I_{OFF} est le rapport entre le courant de fuite et le courant drain I_{DS} au point de saturation à $V_{DS} = V_{GS} - V_{Th}$. Il s'agit d'un paramètre qui caractérise l'état passant et l'état bloqué. Ce paramètre est capital pour des applications logiques telles que les mémoires, mais aussi pour les écrans AMOLED. Ce rapport est utilisé pour évaluer la performance des transistors organiques, c'est le paramètre crucial du transistor.

I_{ON} est le courant de saturation à une tension V_{GS} donnée. Il dépend de la mobilité des charges et de la capacité à accumuler un grand nombre de porteurs dans le canal.

I_{OFF} est le courant de fuite. Il s'agit du courant résiduel circulant dans le semi-conducteur entre drain et source, malheureusement jamais nul, qui se révèle critique pour la consommation statique des dispositifs électroniques. Il révèle en effet une conduction parasite permanente entre le drain et la source sur laquelle la grille n'a aucun effet. Il est un indicateur de la pureté des matériaux et de la qualité des interfaces. Il est exprimé par la formule suivante :

$$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}} = \frac{\mu C_i^2 V_D^2}{q \sigma n_0 d^2} \dots \dots \dots (23)$$

Avec :

- q: la charge élémentaire
- n_0 : la densité de porteurs majoritaires

d : l'épaisseur de la couche

C_i : la capacitance de l'isolant

V_{on} : la tension de bandes plates

σ : la conductivité du film lorsqu'aucun champ électrique n'est appliqué. Cette conductivité s'exprime par l'expression 24:

$$\sigma = \frac{L}{dw} * \frac{I_D}{V_D} \dots \dots \dots (24)$$

L'extraction de courant de fonctionnement (I_{on}) et courant de fuite (I_{off}) se fait sur la courbe de transfert en échelle logarithmique, comme on le montre sur la figure 24 donnée précédemment dans la caractéristique de transfert. On remarque que le courant de fonctionnement est le plus faible et le courant de fuite est le plus fort.

III-6 Comparaison entre les MOSFET et les OFET

➤ Principe de fonctionnement des MOSFET et des OFET

Bien que le transistor organique (OFET) soit un système à grille isolée, il fonctionne en régime d'accumulation et non en régime d'inversion. Ceci constitue une différence importante par rapport à effet de champ inorganiques. et le semi-conducteur organique qui constitue le canal.

En effet, dans ces derniers (MOSFET), le canal se forme dans le substrat par attraction de porteurs minoritaires entre le drain et la source à l'interface de l'oxyde de grille. Par contre, dans l'OFET le canal conducteur est constitué par une couche de matériaux organique dont on améliore la conductivité par accumulation de charges à l'interface entre l'isolant

➤ Régimes de fonctionnement

Les transistors MOSFET classique fonctionnent en régime d'inversion le dopage est opposé aux zones de contact source et drain. Aucun courant ne peut circuler sans qu'une inversion n'ait lieu dans le canal. On doit accumuler des porteurs minoritaires à l'interface pour autoriser la conduction entre le drain et la source. La tension de seuil est alors définie comme étant la tension appliquée sur la grille pour obtenir une concentration de porteurs minoritaires à l'interface égale à celle des majoritaires présents initialement par dopage.

Les OFETs ne fonctionnent qu'en régime d'accumulation, la notion d'inversion n'a donc pas de sens ici. Par convention on utilise en général pour les OFET le même tracé que précédemment, même si le sens est différent.

Le fait que la source et le drain étant métalliques dans un OFET, il n'y a plus de jonction PN à la source et le drain. Par contre, les contacts métalliques OFETs et non pas dans le régime d'inversion des transistors MOSFETs. Quand une tension de grille appropriée (négative pour un semi-conducteur de type p, ou positive pour un semi-conducteur de type n) est appliquée au OFET, une couche d'accumulation de porteurs majoritaires peut être obtenue à l'interface semi-conducteur – isolant ; il en résulte la génération d'un canal injectant (source) ou extrayant (drain) facilement les charges du canal ; il en résulte que l'accroissement du courant peut alors se produire très facilement dans le régime d'accumulation des transistors de conducteur dont la conductivité peut être ajustée à partir de

la valeur de la tension de grille.

Inversement, si une tension de grille négative est appliquée à un OFET dont le semi-conducteur est de type p (ou si une tension de grille positive est appliquée à un OFET dont le semi-conducteur est de type n), une couche de déplétion apparaît à l'interface semi-conducteur –isolant, ce qui génère un canal hautement résistif associé à l'état « off » du OFET (la source étant métallique dans un OFET contrairement au MOSFET elle ne peut pas contribuer à fournir des porteurs minoritaires pour créer une couche d'inversion).

Une conséquence importante du fonctionnement en régime d'accumulation de l'OFET 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.

Finalement, dans le cas d'un semi-conducteur de type P, pour que le transistor fonctionne en accumulation (mode principale de fonctionnement pour les transistors organiques), il faut appliquer une tension de grille négative par rapport à la source. Ainsi on obtient une accumulation de charges positives (majoritaires) à l'interface entre l'isolant et semi-conducteur organique pour former un canal de conducteur entre les électrodes drain et source.

Les deux transistors OFET et MOSFET fonctionnent dans le régime linéaire, la seule différence est que le MOSFET se comporte comme une résistance indépendante, par contre le OFET se comporte comme une résistance commandée par la tension de la grille.

On pourra aussi remarquer que le fonctionnement des transistors en régime d'accumulation implique la suppression de la zone de déplétion qui a l'avantage d'isoler le composant du substrat dans la configuration MOSFET. En effet, compte tenu de la structure renversée d'un OFET, c'est le diélectrique de grille qui isole la zone active du canal par rapport au substrat.

Chapitre IV

Etude d'un transistor OFET de type
ITO/PMMA/Pentacène

IV-1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les étapes technologiques de la réalisation des OFETs. Nous étudions ensuite la structure d'un transistor organique de type ITO/PMMA/Pentacène puis nous présentons les procédures de dépôt et de caractérisation de différents matériaux (ITO ; l'isolant de grille ainsi que le matériau organique semi-conducteurs utilisé).

IV-2 Etapes de réalisation des OFETs

IV-2-1 Géométrie du transistor organique

La configuration des OFETs étudiées est du type "Bottom Gate-Top Contacts" (BG-TC). Comme son nom l'indique, cette configuration consiste à déposer l'électrode de grille en premier et les contacts source et drain en dernier. Cette configuration est la plus utilisée pour les OFETs. Elle est parfaitement adaptée à une application capteur de gaz puisque le semi-conducteur organique est en contact direct avec l'atmosphère contenant les molécules à détecter. Dans une configuration "Bottom Gate", les contacts source et drain peuvent être déposés sur l'isolant avant le semi-conducteur organique. Cette procédure présente les avantages de supprimer toute étape technologique après le dépôt du semi-conducteur organique et de permettre de réaliser des contacts de plus petites dimensions par lithographie. La figure 26 présente une structure d'un transistor dont l'isolant de la grille est le PMMA et le semi-conducteur organique est le Pentacène.

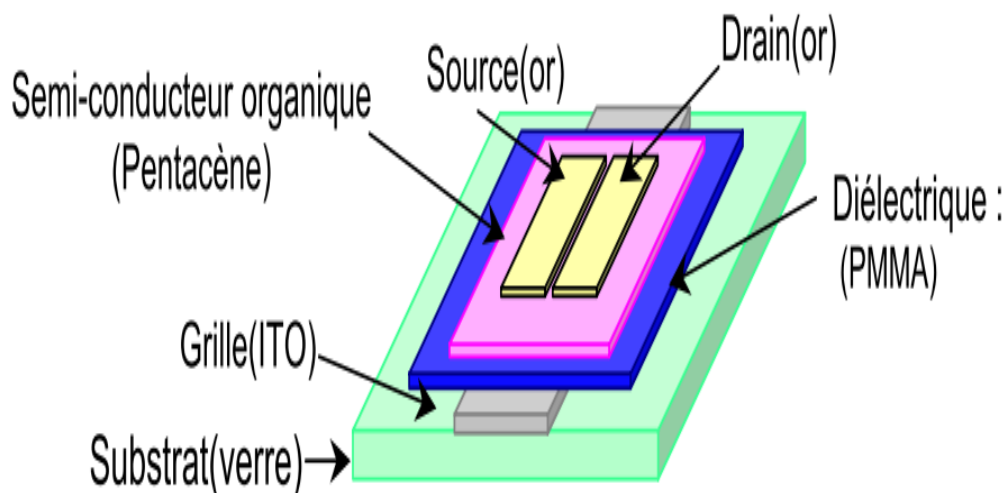


Figure 26 : Structure schématique du transistor organique en géométrie Bottom Gate –Top-Contact [19]

Dans ce qui suit nous donnons les détails de la procédure technologique de réalisation des transistors. [19]

IV-2-2 Présentation des matériaux et technique de dépôt

IV-2-2-1 Présentation de L'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO)

L'ITO (oxyde d'indium et d'étain) est un oxyde transparent conducteur, souvent utilisé sur des substrats isolant, notamment non organiques tels que le verre pour réaliser des électrodes transparentes. Les applications principales se trouvent dans le domaine de l'optoélectronique pour la fabrication des écrans, des diodes électroluminescentes, des cellules solaire et dans notre cas pour les transistors organiques à effet de champ. [17]

IV-2-2-1-1 Propriétés électriques

L'ITO est un conducteur fortement dégénéré qui a une conductivité de l'ordre de 10^4S.cm^{-1} . Cette dernière est liée à une forte concentration de porteurs car le niveau de fermi est situé en dessus de la bande de conduction. La dégénérescence est causée par des lacunes d'oxygène et par le dopage en étain. La conductivité est donc essentiellement assurée par les atomes d'étain et surtout les lacunes d'oxygène.

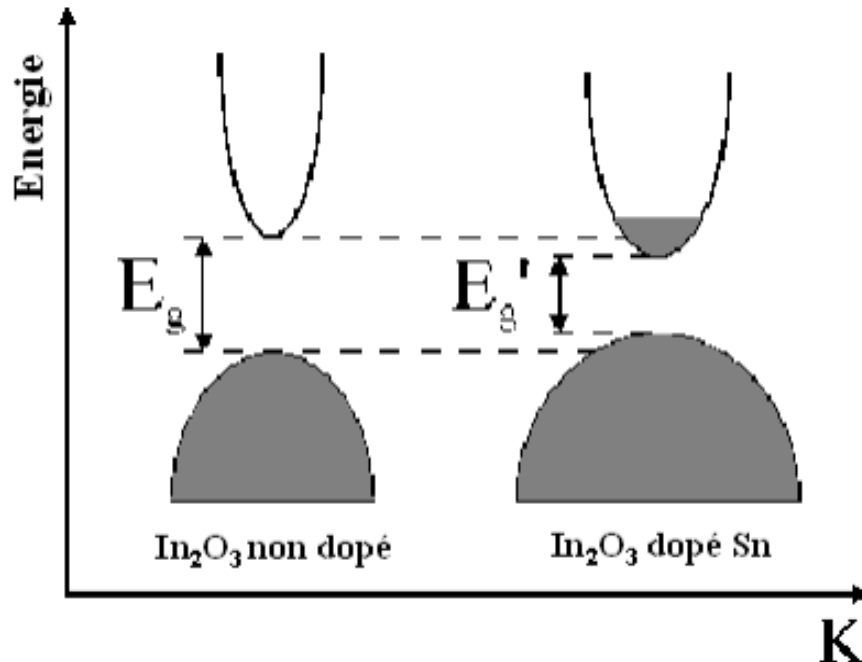


Figure 27 : structure de bandes paraboliques d'In₂O₃ non dopé et effet de dopage par l'étain [14].

IV-2-2-1-2 Propriétés optiques

L'ITO est un semi-conducteur à large gap (3,5-4,3 eV) qui présente une forte transmission dans le spectre visible et infra rouge. [17]

IV-2-2-2 Dépôt d'ITO

IV-2-2-2-1 Choix du substrat (verre)

Les substrats sont des lames de verre de surface carrée $1.5 \times 2 \text{ cm}^2$ [16] et d'épaisseur égale à 1 mm , découpés par un stylo à pointe en diamant. Ce choix de verre est dû en plus du critère économique, à deux autres raisons :

- Il permet d'effectuer une bonne caractérisation optique des films qui s'adapte bien pour leur transparence.
- Après le dépôt, l'échantillon (substrat- couche) va subir un refroidissement de la température de dépôt (300°C) jusqu'à la température ambiante ($\sim 25^\circ\text{C}$) ce qui peut causer des tensions entre les deux matériaux constituant l'échantillon. Ce problème ne se pose pas car leurs coefficients de dilatation sont très proches, d'où une minimisation des contraintes sur l'interface. L'augmentation de la température du substrat entraîne l'augmentation des contraintes. Ceci est lié à la contrainte compressive causée par la différence entre les coefficients de dilatation du substrat et du matériau déposé. [16]

IV-2-2-2-2 Méthode de dépôt de l'ITO sur le verre

La technique de la déposition chimique en phase vapeur APCVD (Atmospheric Pressure Chemical Vapour Deposition) est la plus utilisée. Dans cette partie nous allons détailler le processus APCVD.

Les réacteurs CVD ont pour but de déposer une couche solide sur un substrat à partir de réactifs gazeux. Cette technique est caractérisée par le dépôt de couches fines conductrices, Semi-conductrices ou isolantes à partir d'une réaction chimique des réactifs introduits dans la Phase gazeuse.

Il existe plusieurs types de réacteurs CVD, ils sont tous utilisés pour le dépôt des couches minces mais chaque type fonctionne sous des conditions de pressions et de températures différentes.

- Le réacteur LPCVD : Low Pressure CVD ou CVD à basse pression car les dépôts réalisés dans ce réacteur s'ont réalisés à une pression $P < 1 \text{ bar}$.
- Le réacteur HPCVD : High Pressure CVD ou CVD à haute pression, les réactions chimiques se font à des pressions $P > 1 \text{ bar}$.
- Le réacteur LECVD : CVD assisté par laser

Nous nous intéressons au réacteur APCVD : Atmospheric Pressure CVD ou CVD à pression atmosphérique ($P = 1\text{bar}$).

Dans un réacteur CVD, il se produit des phénomènes physico-chimiques depuis l'introduction des réactifs gazeux dans le réacteur jusqu'à l'extraction des espèces produites. Ces phénomènes se résument par les étapes suivantes :

- transport des précurseurs gazeux dans le réacteur
- réactions chimiques entre les précurseurs gazeux aux hautes températures à l'intérieur du réacteur
- dépôt au contact avec le substrat des espèces chimiques qui participent aux réactions
- évacuations des espèces gazeuses produites par les réactions chimiques.

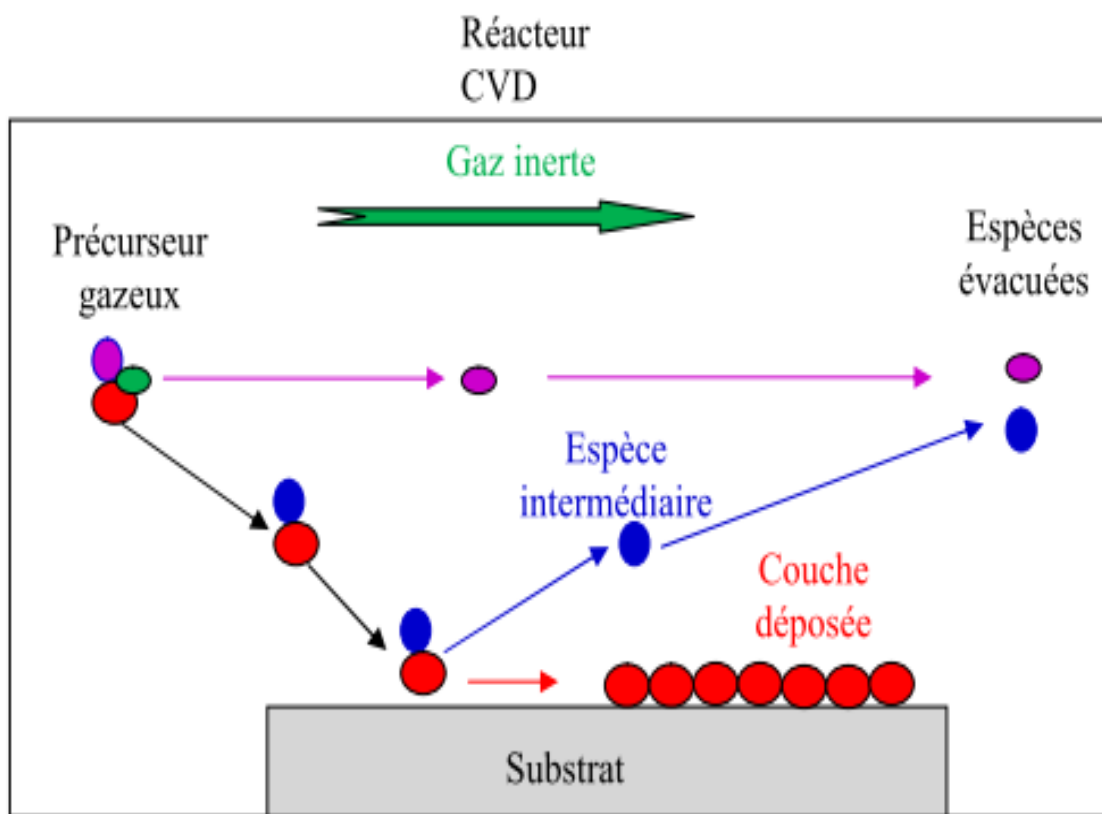


Figure 28 : Phénomènes physico-chimiques dans un réacteur CVD [15].

Pour obtenir un dépôt de bonne qualité par CVD, une optimisation de certains paramètres est nécessaire. Ces paramètres sont :

- La durée de la réaction chimique ;
- La température à l'intérieur du réacteur ;
- Les débits des espèces gazeuses ;
- La pression pour les CVD à basse pression.

Les valeurs de ces paramètres dépendent aussi :

- de la géométrie du four
- du type du précurseur utilisé

IV-2-2-3 Gravure de l'ITO

Pour la gravure d'ITO on utilisera la méthode chimique qu'on peut réaliser selon les étapes suivantes (voir figure 29).

- Protéger la partie I.T.O à conserver avec un film adhésif résistant à l'acide
- Immerger à température ambiante pendant 10 min dans l'acide chlorhydrique (37%)
- Rincer à l'eau dés ionisé
- Retirer le film adhésif
- Flotter légèrement les échantillons à l'aide d'un papier salle blanche imbibé d'acétone
- Immerger pendant 15 minutes dans de l'acétone + bain à ultrasons à 45⁰C
- Immerger pendant 15 minutes dans de l'isopropanol + bain à ultrasons à 45⁰C
- Immerger pendant 15 minutes dans de l'eau dés ionisé + bain à ultrasons à 45⁰C
- Sécher à l'azote U
- Vérifier à l'aide d'un ohmmètre que la face I.T.O se trouve vers le haut

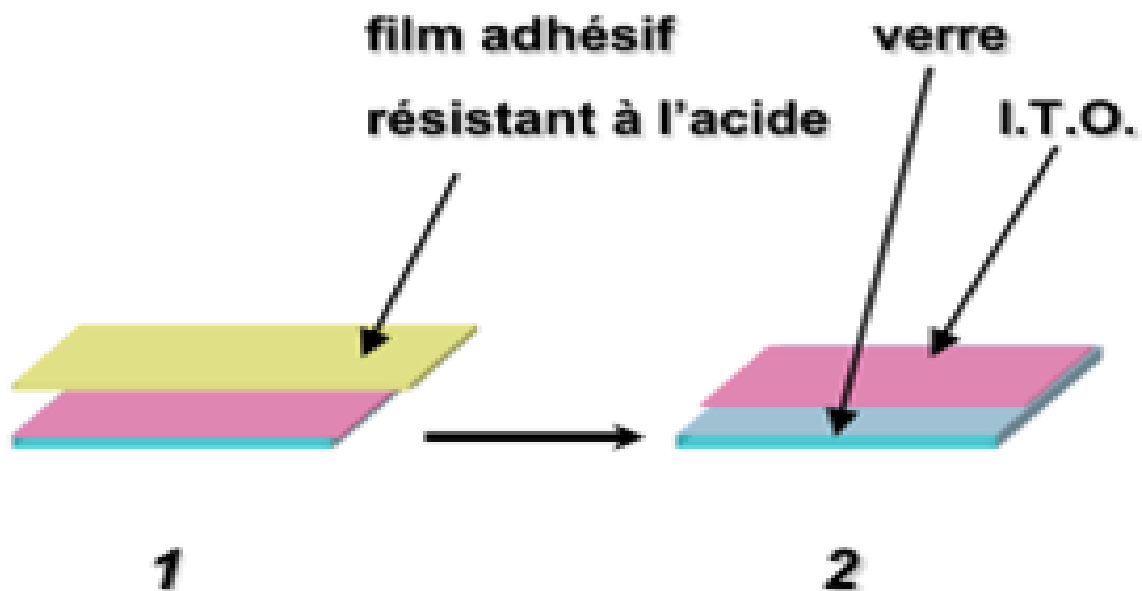


Figure 29 : Gravure d'ITO [18].

IV-2-2-4 Le PMMA et le Pentacène

Des études précédentes ont montré que le PMMA constituait un excellent isolant de grille pour les transistors à base de Pentacène. Dans ce qui suit nous donnons les propriétés et les formules chimiques de chaque matériau.

IV-2-2-4-1 Le polyméthylmethacrylate (PMMA)

Le poly (méthacrylate de méthyle) (souvent abrégé en PMMA, de l'anglais **PolyMethylMethAcrylate**). Récemment, des études ont montré que le PMMA constituait un excellent isolant de grille pour les transistors à base de pentacène. Il peut être déposé par spin coating avec une grande résistivité ($>2 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$), une faible constante diélectrique et une faible rugosité. Le PMMA présente de grands avantages comme isolant dans les dispositifs flexibles et transparents avec une haute résistance mécanique, une faible température de polymérisation (inférieure à 160°C) et une forte transparence sur le spectre visible. Sa formule chimique est donnée sur la figure 30.

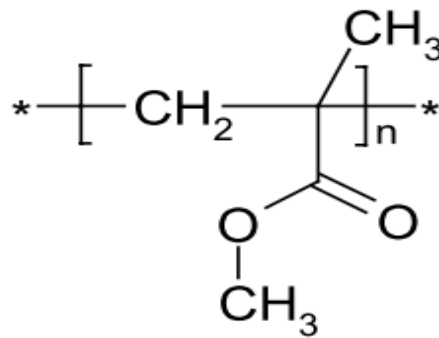


Figure 30 : Structure du PMMA [19].

IV-2-2-4-1-1 Propriétés physiques et mécaniques :

Le PMMA est surtout connu pour ses propriétés optiques exceptionnelles. Ce polymère amorphe est d'une transparence remarquable (92% de transmission lumineuse), dans la visible 380 à 780 nm. L'angle de réflexion totale sur une surface intérieure est de 41 à 42° (ce qui permet la réalisation de "conducteurs" de lumière, fibres optiques...).

Le PMMA est un polymère amorphe dont la température de transition vitreuse est de 110 jusqu'à 135°C , c'est à dire qu'à température ambiante, il est dur, rigide, cassant avec faible allongement. Le PMMA est hygroscopique et dans des conditions extrêmes, l'eau absorbée agira comme un plastifiant et modifiera les propriétés du matériau. Son fluage est assez limité. Au-delà de contraintes critiques, le PMMA est sujet au fendillement (crazing). Ce phénomène est même accentué en présence d'agents agressifs (alcools, essences...). La résistance au choc est relativement faible et le polymère est cassant. Celle-ci peut être améliorée par l'adjonction, d'agent antichoc. Le PMMA résiste bien à la rayure dans des conditions normales d'usage. Cependant lors de nettoyages fréquents ou d'utilisation en milieu poussiéreux, il peut se rayer. Les PMMA se polissent facilement.

IV-2-2-4-1-2 Propriétés électriques :

Les propriétés électriques peuvent être nettement affectées par la reprise d'humidité. Sa résistance à l'arc est excellente. Le PMMA est électrostatique, ce qui peut nuire à sa présentation (attraction de poussière) ; on peut pallier cet inconvénient en utilisant des produits antistatiques.

IV-2-2-4-2 Le pentacène

Les matériaux organiques présentent un potentiel énorme pour le développement de systèmes électroniques et optoélectroniques peu coûteux en raison de leurs propriétés semi-conductrices et de leur facilité de synthèse.

Le pentacène dont la structure est représentée sur la figure 31 est un composé chimique ($C_{22}H_{14}$) de la famille des hydrocarbures aromatiques polycycliques, formé de cinq noyaux benzéniques fusionnés linéairement.

Sa structure conjuguée étendue et sa structure cristalline en font un bon semi-conducteur organique, de type p (donneur d'électrons). Le pentacène est un bon candidat pour la fabrication de transistors organiques à films minces car il possède des caractéristiques exceptionnelles dans les transistors à couche mince notamment une mobilité de $5,5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ce qui est proche de celle du silicium amorphe. Cette molécule permet la formation de films minces polycrystallins sur des surfaces lisses.

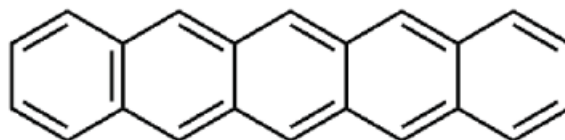


Figure 31 : Structure chimique du pentacène [13].

IV-2-2-5 Méthodes de dépôt

IV-2-2-5-1 Dépôt de la couche isolante (PMMA) par la méthode de "spin-coating"

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 une heure permet l'évaporation du solvant.

Cette méthode est essentiellement utilisée pour le dépôt de polymères. Ces derniers ne peuvent pas être déposés par évaporation car les liaisons chimiques pourraient être rompues, ce qui modifierait les propriétés du matériau.

Pour notre application, nous avons utilisé la tournette pour déposer l'isolant de grille. La figure 32 présente le principe de fonctionnement d'une tournette.

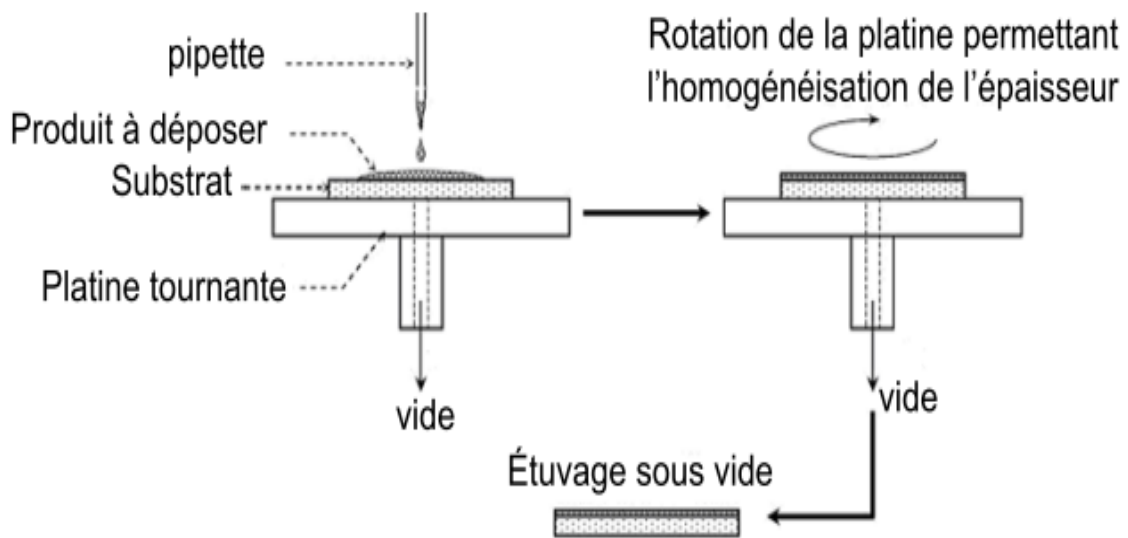


Figure 32 : Schéma de principe d'un dispositif expérimental de dépôt à la tournette [7].

Cette technique de dépôt présente des avantages et des inconvénients ;

Avantage :

- Faible coût du matériel utilisé,
- Possibilité de dépôt de grande surface.

Inconvénients :

- Le matériau doit être soluble
- Structures multicouches difficiles à réaliser (problème de solvant)
- Effets de bord (épaisseur plus importante les bords du substrat)
- Stockage (dégradation et altération)

IV-2-2-5-2 Dépôt de semi-conducteur organique (Pentacène) par évaporation sous vide

Lorsque le type de matériau s'y prête, l'évaporation est produite par effet Joule sous vide ($<10^{-6}$ mbar) ; le matériau à évaporer est alors placé dans une nacelle parcourue par un courant électrique provoquant ainsi son échauffement. Après sublimation, ensuite il va se condenser sur les parties plus froides du bâti et en particulier sur le substrat immédiatement placé en regard pour former un film homogène dont l'épaisseur est contrôlée avec une balance à quartz.

Cette méthode est mise en œuvre dans la réalisation de films à base de petites molécules (Pentacène).

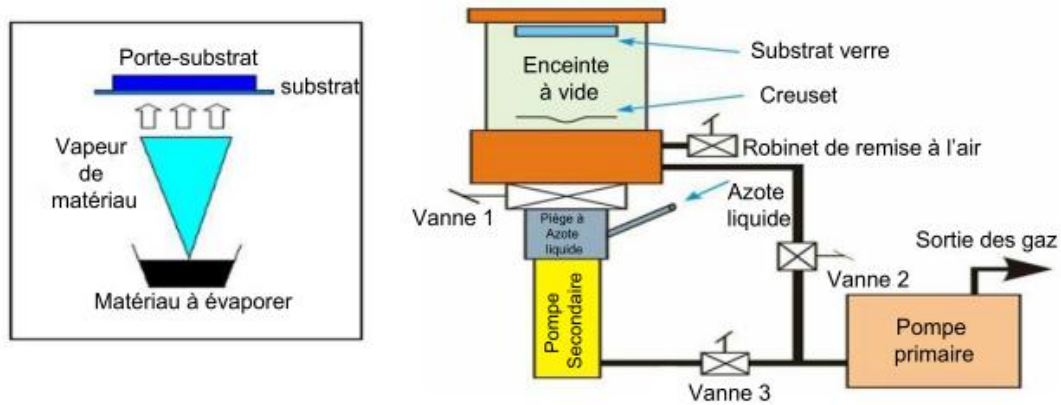


Figure 33 : Schéma de principe d'un évaporateur sous vide [7].

L'ensemble du bâti est constitué d'une enceinte sous vide reliée à un groupe de pompage secondaire (pompe secondaire + pompe turbo moléculaire), d'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 soit la distance entre la source d'évaporation et le substrat, soit les deux,
- La pureté de la matière première,
- Les propriétés de la surface du diélectrique.

Avantages :

- Balance à quartz : contrôle de l'épaisseur du film en croissance,
- Bonne qualité des surfaces : pas de pollution atmosphérique.

Inconvénients :

- Technique lourde et bâti coûteux,
- Effet de rayonnement (creuset) : dégradation chimique, décristallisation,
- Faible rendement du procédé,
- Surface de dépôt relativement réduite.

Enfin le dépôt des électrodes (contacts source et drain) en or se fera par la même technique de dépôt avec des masques bien définis. Le métal déposé sous forme de bâtonnets dans une nacelle en tungstène chauffé par effet joule. Les échantillons sont disposés sur un plateau à une distance verticale d'environ de 10 cm de la nacelle. Des masques (figure 34) sont disposés sur les échantillons, définissant la géométrie finale des électrodes en or. Un vide de $8 \cdot 10^{-7}$ à 10^{-6} mbar est assuré par une pompe à palette et une pompe à diffusion d'huile. Une balance à quartz, située à côté du plateau (porte échantillon) mesure l'épaisseur des films. La

fréquence de vibration de quartz dépend de l'épaisseur et de densité du métal. Pour assurer une meilleure homogénéité de l'épaisseur de la couche métallique, le plateau (porte échantillons) peut être mis en rotation

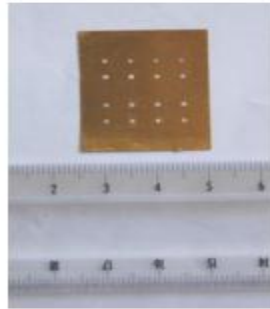


Figure 34: Photographie d'un masque [20].

IV-2-3 Caractérisation électrique des transistors organiques

La figure 35 représente les caractéristiques de sortie et de transfert dans le régime de saturation et dans le régime linéaire d'un transistor avec 40nm de pentacène et 330nm de PMMA. La dépendance de μ_{lin} en fonction de la tension de grille est aussi représentée. La dépendance de la mobilité en fonction de V_G est une spécificité des transistors organiques. Ainsi, la mobilité linéaire maximale du transistor est obtenue pour la plus grande tension de grille.

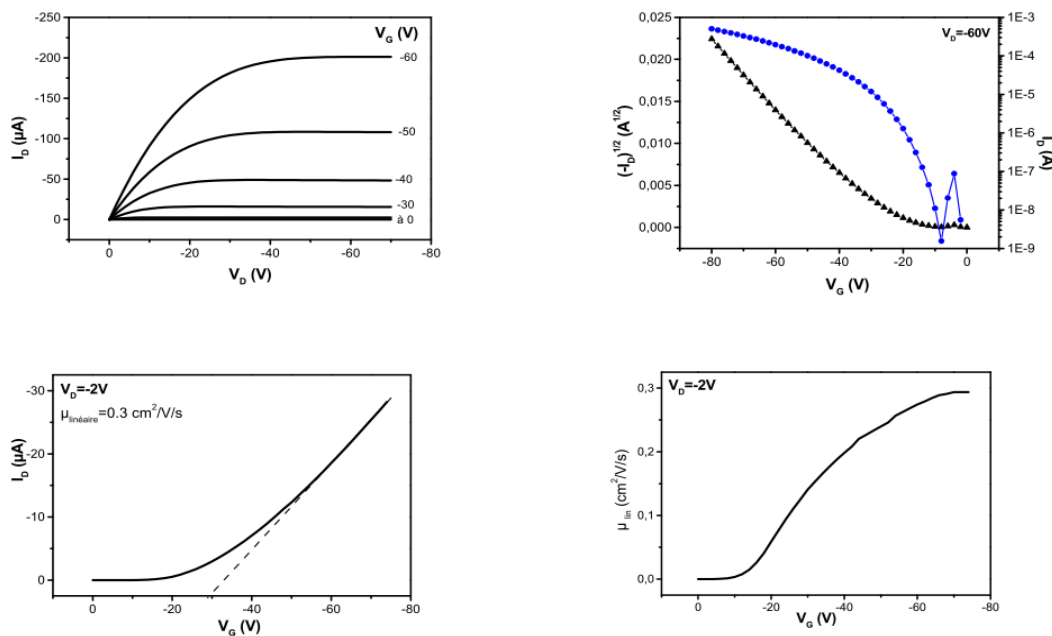


Figure 35 : Caractéristiques de sortie, de transfert dans le domaine linéaire et dans le domaine de saturation et $\mu_{linéaire}$ en fonction de V_G d'un transistor organique en pentacène (40nm) de longueur et de largeur de canal $L=115\mu\text{m}$ et $W=19\text{mm}$ respectivement, avec du PMMA (330nm) comme diélectrique de grille [11].

Les performances obtenues pour des dispositifs avec PMMA comme diélectrique de grille et 40 ou 80 nm de pentacène sont récapitulés dans le tableau 1. Les mobilités en saturation et dans le régime linéaire sont extraites à des tensions de drain de -60V et -2V respectivement. Les mobilités sont du même ordre pour les deux épaisseurs de pentacène. Par contre les rapports On/Off sont généralement son meilleurs quand la couche de pentacène est plus fine. Ces transistors présentent des courants I_{Off} jusqu'à dix fois plus faibles, le courant de bulk étant plus important quand la couche organique est plus épaisse.

Paramètre	PMMA + 40nm pentacène	PMMA + 80nm pentacène
μ_{sat} ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) à $V_D = -60\text{V}$	0.2-0.32	0.17-0.32
μ_{lin} ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) à $V_D = -2\text{V}$	0.2-0.36	Non mesurée
On/Off	$2 \cdot 10^5$ à $4 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^3$ à $2 \cdot 10^5$
S (V/dec)	2 à 2.8	2 à 4
C_i (nF/cm ²)	7.2	7.2
$S \times C_i$ (nC/cm ² /dec)	14.4 à 20	14.4 à 28.8
V_T (V)	-14 à -28V	-14 à -16

Tableau 1: Performances de transistors en pentacène (40 ou 80nm) et avec PMMA comme diélectrique de grille [11].

Les transistors avec PMMA montrent des mobilités plus grandes et les rapports On/Off plus important.

Ces caractérisations électriques $I_{\text{DS}} = f(V_{\text{DS}})$ et $I_{\text{DS}} = f(V_{\text{GS}})$ est un travail d'élaboration à l'université de Limonge.

On polarise le transistor avec des tensions de grilles négatives appartenant à l'intervalle [0V ; -40V] avec un pas de -10V. En appliquant une tension négative sur le drain (source à la masse), on aura circulation d'un courant entre le drain et la source.

Pour déterminer la tension de seuil et la mobilité de porteurs de charges, il faut tracer la courbe $(-I_{\text{DS}})^{1/2} = f(-V_{\text{GS}})$ (figure 36).

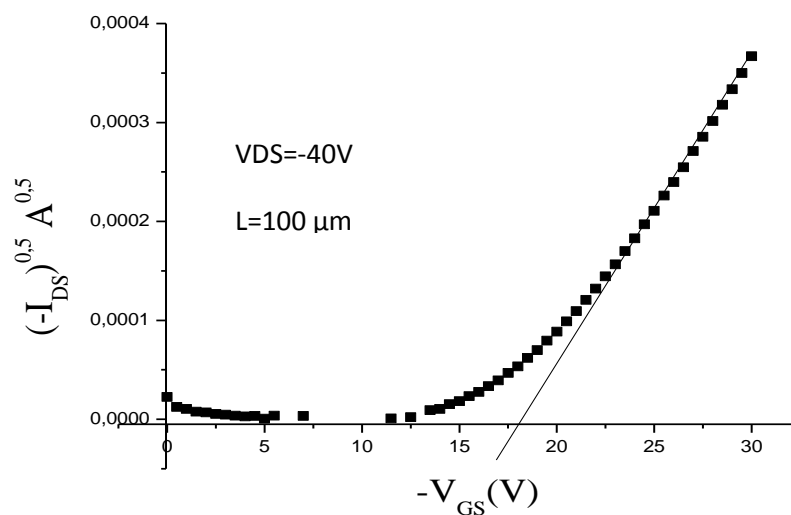


Figure 36 : Courant de drain en fonction de la tension de grille.

On applique la formule : $\left[\frac{(\partial I_{ds,sat})^{1/2}}{V_{gs}} \right]^2 \cdot \frac{2L}{WC_i}$, avec : $C_i = 2,3 \text{ F/cm}^2$, $L = 100 \text{ }\mu\text{m}$ et $W = 4 \text{ mm}$

La mobilité de porteurs de charges de pentacène est de $0,043 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ et la tension de seuil est d'environ -16 V et pour le cas présenté très importante. Une réduction de l'épaisseur de PMMA peut être envisagée, comme l'utilisation d'isolant de grille à forte permittivité d'électrique.

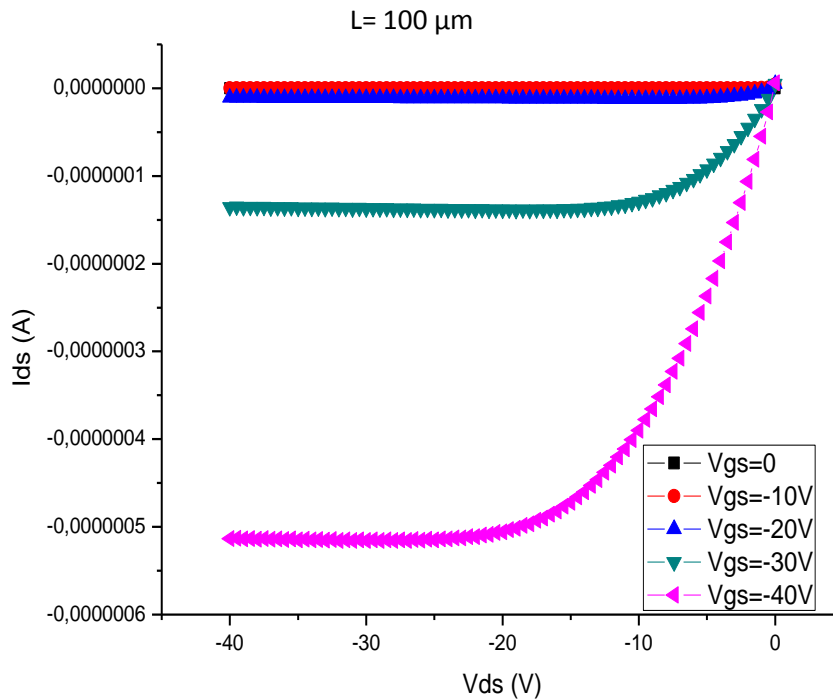


Figure 37 : Courant de drain en fonction de tension de drain.

La figure 37 montre les différents régimes de fonctionnement d'un transistor organique à effet de champ :

- $V_{DS} \in [0, -10] \text{ V}$; $V_G = -40\text{V}$.
- Pour une tension de grille négative ($V_G < 0$), par l'effet de polarisation de l'isolant de grille, une accumulation de charges positives se forme à l'interface de pentacène / PMMA. La densité de charge à cette interface est fonction du potentiel appliqué à la grille.
- Si, on polarise le drain avec une tension inférieure à celle de la grille ($V_D < V_G$), le courant de drain augmente linéairement avec la tension de drain. Le courant de drain, qui traverse le canal entre le drain et la source est en fonction de la densité de charges

accumulées dans le canal c'est à dire du potentiel de grille V_G : *c'est le régime linéaire.*

- Si, $V_G=V_D$, le canal de conduction est pincé de côté drain, cette zone n'est plus en régime d'accumulation de porteurs libres.
- Si, on augmente la tension de drain, le courant de drain n'augmente plus linéairement avec la tension de drain. Lorsque le potentiel de drain devient important que celui de grille, le courant se sature à une valeur presque constante. Ce courant est appelé courant de saturation : *c'est le régime de saturation.*

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail porte sur l'étude de la structure MIS, (Métal- Isolant-Semi-conducteur) à base des matériaux organiques, qui sont la base des transistors MOS à effet de champ. La réduction de la taille de ces composants a poussé la technologie à introduire ces matériaux dans les MOSFET, en maintenant leurs principes de fonctionnement et encore d'autres raisons (coûts, légèreté souplesse etc.....), qui les rends intéressants et de là vient la naissance de l'électronique organique. Pour cela le premier chapitre est consacré à l'étude de ces transistors MOSFET.

Ces matériaux organiques sont devenus intéressants pour plusieurs raisons, qui sont premièrement une forte conductivité qui est dû à l'alternance de simple et double liaison entre les atomes de carbone, qui contiennent principalement ces matériaux. Ils présentent aussi la possibilité d'être déposés en couches minces par des procédés de fabrication de la microélectronique, et dans des conditions de bas coût afin de réaliser des transistors, des diodes, des cellules solaires, des composants optoélectroniques, et même des dispositifs.

Ces matériaux peuvent se présenter sous forme de petite molécule comme dans notre cas le pentacène qu'on a utilisé comme couche active, qui possède des caractéristiques exceptionnelles notamment une mobilité de $5,5 \text{ cm}^2/\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ qui est proche de silicium amorphe, ou longues chaînes appelées polymères, nous avons aussi utilisé le **PolyMethylMethAcrylate** (PMMA) comme isolant de grille et l'ITO (oxyde d'indium et d'étain), qui fait partie des TCO (les oxydes transparents conducteurs) remarquable par sa transparence.

L'introduction de ces matériaux organiques dans les MOSFETs donne les transistors organiques à effet de champ (OFET), qui sont des MOSFETs en couches minces assez similaires au MOSFET en silicium amorphe. Ils se caractérisent aussi par une électrode de grille isolée du reste du dispositif. La faible densité de porteurs des semi-conducteurs organiques fait que les OFETs fonctionnent en accumulation et non en inversion. Ils existent plusieurs géométries des OFETs donner dans ce travail mais nous sommes intéressés par Bottom Gate, Top Contact (BC,TC) pour notre structure MIS ITO/PMMA/PENACENE.

La réalisation de ces transistors est basée sur la structure MIS, cela nous a permis de savoir les procédures de dépôt de chaque couche (matériaux), en tenant compte de l'architecture et l'ordre de dépôt.

Pour cela nous avons commencé par l'étude de la structure ITO qui consiste à déposer ce TCO sur un substrat de verre par la méthode APCVD, ensuite faire la gravure qui est à enlever des deux côtés une partie de l'ITO, et la deuxième étape le dépôt de la couche isolante (PMMA) par la méthode spin coating, qui est faite essentiellement pour les polymères car l'évaporation sous vide peut rompre ces liaisons chimiques ; la troisième étape est le dépôt de pentacène par évaporation sous vide à l'aide d'un évaporateur sous vide, et on termine le travail par le dépôt des contacts source et drain en or (électrodes) par la même méthode.

Références

Références

- [1] J. KAMDEM et P. TSAFACK, *Microélectronique*. UNIVERSITE DE YAOUNDE I CAMEROUN.
- [2] C. Gontrand, F. Calmon, *Eurinsa Approfondissement physique*. Version 0.2 draft.
- [3] T. SKOTNICKI, *Transistor MOS et sa technologie de fabrication*. Docteur en microélectronique, ingénieur de recherche à France télécom, centre national d'études des télécommunications (CENT) de Grenoble.
- [4] O. BOUGHIAS, Comparaison des paramètres physiques, technologiques et électriques des nouveaux isolants de grille (high- K) pour les technologies CMOS. Mémoire de Magister en Electronique /Année 2008.
- [5] J. BALLETT, *Contribution à la réalisation des composants électroniques organiques à base de POLY (3-OCTYLTHIOPHENE)*. Thèse de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PAUL SABATIER Année 2006.
- [6] A. MOLITON, *Electronique et Optoélectronique organiques*. Collection télécom.
- [7] I. EL HOUTI EL JAZAIRI, *Transistors organiques transparents et imprimés à base de pentacène*. Thèse DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LIMONGE 2009.
- [8] A.MOLITON, *Electronique et Optoélectronique organique*. Livre de la Collection Telecom (Springer-Verlag France), 2011.
- [9] A.BELKHIR, *Contribution à la modélisation des transistors organiques*. Thèse DOCTORAT DE L'UNIVERSITE Reims – Champagne – Ardenne 2009.
- [10] M.TURNISIEN, *Contribution à l'étude des transistors à effet de champ organiques : Effet de la fonctionnalisation du diélectrique de grille par des monocouches Auto Assemblées*. Thèse DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LILLE I Année 2008.
- [11] A.L.DEMAN, *Influence du diélectrique de grille et de la structure moléculaire du semi-conducteur sur les performances de transistors organiques*. Thèse DOCTORAT DE L'ECOLE CENTRALE DE LYON.
- [12] V.BERNICAL, *Le transistor organique transparent : modélisation et premier essais avec le pentacène*. Thèse DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LIMONGES 2008
- [13] L.RAPP, *Impression par laser (LIFT) de transistors organiques en films minces*. Thèse DOCTORAT DE L'UNIVERSITE MEDITERRANEE AIX-MARSEILLEII.
- [14] K.DAOUDI, *Elaboration et caractérisation de films minces d'oxyde d'indium dope a l'étain obtenus par voie SOL-GEL*. Thèse DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE GLAUDE DERNARD- LYON 1 2003.
- [15] K.LAGHA-MENOUER, *Etude et réalisation d'une cellule solaire multicouche du type Si-SiO₂-SnO₂-ZnO par APCVD*. Thèse DOCTORAT DE L'UNIVERSITE MOULOU MAMMERI TIZI-OUZOU 2011.

Références

[16] F.YNINEB, *Contribution à l'élaboration de couches minces d'oxydes transparents conducteurs (TCO)*. MEMOIRE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE MAGISTER EN PHYSIQUE 2010.

[17] D.VAUFREY, *Réalisation d'OLED à émission par la surface : Optimisation de structures ITO/Semi-conducteurs organiques*. DOCTORAT DE L'ECOLE CENTRALE DE LYON/Année 2003 No D'ORDRE 2003-19.

[18] Article d'UNIVERSITE DE STRASBOURG (CNRS), *Elaboration Des Cellule Solaire Organiques*.

[19] M.EROUER, *Etude sur les transistors organiques à vocation capteur à gaz : Application à la détection de gaz nitrés*. Thèse DOCTORAT N0 d'ordre 2008 ISAL-0040 Année 2008

[20] S.NENON, *Contribution à l'étude du transport ambipolaire dans les transistors organiques : Impact du procédé de fabrication sur les performances des couches minces*. Thèse DOCTORAT en science à l'université méditerranée Année 2010.