

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI TIZI-OUZOU

FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité: Electronique

Option: Micro-électronique

Présenté par:

ZEDEK Rezika

Thème:

***Etude d'un transistor organique transparent
avec PMMA comme isolant de grille.***

Devant le jury d'examen composé de:

M ^r . ZIANI Rezki	Professeur, UMMTO	Président
M ^r . BELKAÏD M ^{ed} Saïd	Professeur, UMMTO	Rapporteur
M ^r . BENNAMANE Kamal	Maitre de conférences A, UMMTO	Examineur
M ^r . MOUDOUD Mustapha	Maitre de conférences A, UMMTO	Examineur
M ^{elle} . HATEM Djedjiga	Maitre de conférences B, UMMTO	Examinatrice

Dédicaces

A ma mère;

A mon mari;

A mon Beau père et ma belle mère;

A mes frères et mes sœurs;

A mes beaux frères et mes belles sœurs;

A mes neveux et mes nièces;

A la mémoire de mon père.

Remerciement

Au terme de ce travail je tiens à exprimer ma reconnaissance et haute gratitude au Professeur BELKAID M^{ed}Saïd Doyen de la faculté Génie Electrique et d'informatique d'avoir assuré la direction de ce mémoire et d'avoir accepté de m'encadrer.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur ZIANI Rezki, Professeur à l'Université Mouloud MAMMERI de TiziOuzou (UMMTO) d'avoir accepté la présidence de ce jury.

Je remercie également Monsieur BENNAMANE Kamal Maître de conférences A, Mr.MOUDOUDMustapha Maître de conférences A et M^{elle} HATEMDjedjiga Maître de Conférences B à l'Université Mouloud MAMMERI de TiziOuzou (UMMTO), d'avoir bien voulu évaluer mon travail.

Je tiens à remercier vivement Madame O.BOUGHIAS d'avoir assuré la direction et le suivi de ce mémoire. Qu'elle trouve ici ma profonde gratitude pour son encouragement et son soutien qui m'ont été très utile pour mener à bien ce travail.

Je tiens également à remercier ma sœur Nadia docteur et enseignante à l'Université de Limoges pour m'avoir encouragée, orientée durant ces années et d'avoir consacré son temps à la relecture de ce manuscrit travail malgré ses nombreuses responsabilités.

Mes remerciements les plus chaleureux vont aussi à mes parents et à ma belle-famille et surtout à mon mari pour son soutien moral et sa gentillesse.

Enfin, je présente mes très vifs remerciements à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Table des matières

Introduction générale

Chapitre I: Rappels sur les semi-conducteurs et les transistors à effet de champ MOS

Introduction.....	(1)
I.1. Généralités sur les semi-conducteursminéraux.....	(1)
I.1.1. Définition d'un semi-conducteur.....	(1)
I.1.2. Structure cristalline d'un semi-conducteur.....	(2)
I.1.3. Structure électronique d'un semi-conducteur	(2)
I.1.4. La fonction de Fermi-Dirac.....	(6)
I.2.Contact Métal/Semi-conducteur(MS).....	(6)
I.2.1. Contact ohmique.....	(7)
I.2.2. Contact redresseur (Schottky).....	(9)
I.3.La structure Métal/Isolant/Semi-Conducteur (MIS).....	(11)
1) Cas d'une structure MIS où le semi-conducteur est de type N.....	(11)
2) Cas d'une structure MIS où le semi-conducteur est de type P.....	(13)
I.4.Principe de base et structure d'un transistor MOSFET.....	(14)
I.4.1.Effet de champ.....	(14)
I.4.2 Structure d'un transistor MOSFET.....	(15)
I.5. Principe de fonctionnement d'un transistor MOSFET.....	(17)
I.5.1 Tension de seuil.....	(17)
I.5.2.Diagrammes de bandes d'une structure MOS.....	(21)
I.5.2.1. Situation de bande plate ($\psi_s = 0, V_{GS} = V_{FB}$):.....	(21)
I.5.2.2. Situation d'accumulation($\psi_s < 0, V_{GS} < V_{FB}$):.....	(21)

Table des matières

I.5.2.3. Situation de désertion ($\Phi_F < \psi_S < 0$, $V_{GS} > V_{FB}$).....	(22)
I.5.2.4. Situation d'inversion faible ($\Phi_F \leq \psi_S < 2\Phi_F$, $V_{FB} < V_{GS} < V_{th}$):.....	(22)
I.5.2.5. Situation d'inversion forte ($\psi_S \geq 2\Phi_F$, $V_{GS} > V_{th}$).....	(22)
I.6. L'effet de la température sur les paramètres d'un transistor.....	(23)
I.6.1. L'effet de la température sur la tension de seuil.....	(23)
I.6.2. L'effet de la température sur le courant de drain.....	(23)
I.6.3. L'effet de la température sur la mobilité des porteurs.....	(24)
I.7. Régimes de fonctionnement d'un transistor MOSFET.....	(25)
I.7.1. Régime linéaire.....	(25)
I.7.2. Régime de pincement.....	(25)
I.7.3 Régime de saturation.....	(26)
I.8. La transconductance du MOSFET	(26)
I.9. Caractéristiques électriques d'un transistor MOSFET.....	(27)
Conclusion.....	(27)

Chapitre II: présentation des matériaux organiques

Introduction.....	(28)
II.1. Les semi- conducteurs organiques.....	(28)
II.1.1. Notion de conjugaison.....	(29)
II.1.2. Caractère semi-conducteur des matériaux organiques.....	(30)
II.1.3. Les différents états électroniques de l'atome de carbone.....	(31)
II.2 Les polymères et les petites molécules.....	(35)
II.2.1. Les polymères isolants.....	(37)
II.2.2. Les polymères conjugués (semi-conducteur).....	(37)
II.2.2.1 Origine de la conduction dans les polymères conjugués.....	(37)
II.2.2.2 La Structure électronique des polymères conjugués.....	(39)

Table des matières

II.2.2.3 La longueur de conjugaison d'un polymère.....	(40)
II.2.3.Les polymères conducteurs.....	(43)
II.3.Mécanisme de conduction dans les polymères conjugués.....	(45)
II.4.Transport de charge dans le semi-conducteur conjugué.....	(47)
II.5. Propriétés des polymères π -conjugués.....	(50)
II.6.Caractéristiques requises des polymères.....	(50)
II.7. Application des polymères π -conjugués.....	(51)
Conclusion.....	(52)

Chapitre III : Présentation des transistors organiques

Introduction.....	(53)
III.1.Présentation d'un transistor organique à effet de champ.....	(53)
III.1.1.Différentes Géométries des transistors organiques.....	(54)
III.1.2 Comparaison entre les transistors organiques et les transistors inorganiques.....	(56)
III.2.Principe de fonctionnement des OTFTs.....	(58)
III.2.1.Capacité MIS.....	(59)
III.2.2.Diagrammes de bandes.....	(59)
III.3.Régime de fonctionnement.....	(60)
III.4.paramètres essentiels pour caractériser un OTFT.....	(61)
III.4.1. la mobilité.....	(61)
III.4.2.le rapport I_{on}/I_{off}	(62)
III.4.3.la tension de seuil.....	(63)
III.5. Différents méthodes de dépôt des couches pour OTFT.....	(63)
III.5.1.Dépôt à la tournette ou spin-coating.....	(63)
III.5.2.Dépot par évaporation sous vide.....	(65)
III.6.Matériaux utilisés.....	(66)
III.6.1.Les substrats.....	(66)
III.6.2. les contacts de grille, source et drain.....	(66)

Table des matières

III.6.3. les semi-conducteurs organiques.....	(66)
III.6.3.1.Le P3HT (poly 3-hexylthiophène).....	(67)
III.6.3.2.Le pentacène.....	(67)
III.6.4. les isolants de grille.....	(67)
III.6.4.1.Poly-(4-vinylphénol), PVP.....	(67)
III.6.4.2. poly méthyl-méthacrylate (PMMA).....	(68)
Conclusion.....	(69)

Chapitre IV :Elaboration et caractérisation des OFETs de type ITO/PMMA/pentacène

Introduction.....	(70)
IV.1.Généralités sur les oxydes transparents conducteurs (TCOs)	(70)
IV.1.1.Définition d'un oxyde transparent conducteur TCO.....	(71)
IV.1.2.Classification des oxydes transparents conducteurs	(71)
IV.1.3. Méthodes de dépôts des (TCOs) en couches minces.....	(72)
IV.2.Présentation de L'ITO.....	(73)
IV.2.1.Propriétés électriques.....	(74)
IV.2.2.Propriétés optiques.....	(75)
IV.3.Application de l'ITO.....	(76)
IV.4.Transistor organique «BottomGate Top Contact » avec électrode en ITO.....	(76)
IV.5.Différentes étapes de réalisation d'un transistor organique transparent	(77)
IV.6.Caractéristiques électriques d'un transistor organique transparent.....	(81)
Conclusion.....	(84)
Conclusion générale.	
Bibliographies.	

Les premiers transistors à effet de champ étaient de type à jonction ou JFET (Junction Field Effect Transistor). Au milieu des années 70 un nouveau type apparut: le MOSFET (Metal/Oxyde/Semi-conductor Field Effect Transistor) qui a connu un développement très important, notamment dans les circuits intégrés.

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 comme par exemple : les diodes, les cellules solaires et les transistors organiques à effet de champ.

Les transistors organiques à effet de champ sont apparus à la fin des années 80, ils présentent une alternative aux transistors inorganiques classiques pour quelques applications comme les circuits logique/mémoire pour la réalisation d'étiquettes électroniques intelligentes de type RFID (Radio Frequency Identification), les circuits de commande pour, les capteurs de gaz et les détecteurs optiques (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 défi 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'oxygène 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.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux transistors organiques transparents à couches minces à base de pentacène. Deux ambitions ont été envisagées à la fabrication de ces transistors. Le premier est celui de l'électronique transparente, le second vise à réduire les coûts de fabrication d'une part et, d'autre part, à la réalisation sur des grandes surfaces.

Nous allons consacrer le premier chapitre à l'étude approfondie des transistors classiques à effet de champ de type Métal/Oxyde/Semi-conducteur (MOSFETs). Dans un premier temps nous avons fait un rappel sur les semi-conducteurs minéraux et la structure électronique Métal/Isolant/Semi-conducteur. Ensuite, nous présentons la structure de base des transistors MOSFETs, ainsi que le principe de fonctionnement et ces caractéristiques électriques.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les matériaux organiques et leur caractère semi-conducteur, puis nous détaillons la notion de semi conduction et les modes de transports de charges dans les systèmes conjugués. Ensuite nous présentons les différentes structures électroniques de l'atome de carbone qui est l'élément de base dans les systèmes conjugués, nous étudions les polymères semi-conducteurs et les polymères isolants les plus utilisés dans la fabrication des transistors organiques à effet de champ.

Dans le troisième chapitre nous sommes intéressés à l'étude des transistors organiques à effet de champ (OFETs). Dans un premier temps nous présentons les OFETs, puis nous exposons les différentes géométries, ensuite nous abordons le fonctionnement de ces dispositifs.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude et à la caractérisation des transistors organiques transparents en couches minces (OTFTs) dont la structure est de type ITO/PMMA/Pentacène. Dans un premier temps, nous présentons la structure des transistors organiques transparents en géométrie Bottom-Gate Top-Contact (BG-TC) et les différentes étapes de réalisation. Dans un deuxième temps nous exposons les caractéristiques électriques de transfert et de sortie de ces transistors, puis nous terminons par une conclusion générale.

Introduction

Le transistor MOSFET est un transistor à effet de champ qui utilise une structure MOS (Métal/Oxyde/Semi-conducteur), il est ainsi appelé TEC MOS.

Le transistor MOSFET (transistor à contrôle de charges) se caractérise par le fait que la grille, par l'effet de champ électrique, contrôle à travers l'oxyde de grille la densité de porteurs dans le canal du dispositif et ainsi l'intensité du courant. Le canal est relié de part et d'autre part à deux régions fortement dopées par implantation ionique ou diffusion thermique appelées la source et le drain, ils sont formés dans le substrat de chaque côté de la grille [1], entre lesquelles est appliquée une tension donnant lieu à la circulation du courant. Ce transistor n'est qu'un élément d'une famille plus vaste de composants dits FET (Field Effect Transistor) utilisant l'effet de champ pour moduler l'intensité du courant dans un Canal. A la différence des transistors bipolaires le courant n'est constitué que d'un seul type de porteurs de charges (électrons ou trous).

La réalisation d'un transistor à effet de champ MOSFET est basée sur la structure MIS (Métal/Isolant/Semi-conducteur), alors nous allons consacrer une partie de ce chapitre, aux rappels cruciaux concernant les bases de la microélectronique (Semi-conducteurs, structure cristalline, structure électronique et interface métal/isolat/semi-conducteur). Ceci nous aidera mieux à comprendre un transistor MOSFET, son principe de fonctionnement ainsi que ses caractéristiques électriques.

I.1. Généralités sur les semi-conducteurs minéraux

I.1.1. Définition d'un semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau qui conduit l'électricité à température ambiante, mais moins aisément qu'un métal conducteur. La conductivité électrique désigne la capacité d'un corps à conduire un courant électrique lorsqu'une tension lui est appliquée. C'est l'une des propriétés physiques qui varie le plus d'un corps à l'autre. Aux basses températures, les semi-conducteurs purs se comportent comme des isolants. À des températures élevées, ou en présence d'impuretés ou de lumière, la conductivité des semi-conducteurs s'accroît fortement, pouvant même devenir comparable à celle des métaux.

I.1.2. Structure cristalline d'un semi-conducteur

Selon l'arrangement des atomes dans les solides, on distingue deux états possibles :

1) **Etat amorphe:** c'est l'état où l'arrangement des atomes est aléatoire (tel que les verres).

2) **Etat cristallin:** dans cet état les atomes sont arrangés d'une manière régulière au nœud d'un réseau sur une grande distance comparée à la distance interatomique.

Cet état cristallin se divise en deux sous états:

- Etat monocristallin où tous les atomes ont la même orientation, composition chimique et la même position.
- Etat poly-cristallin qui est l'état où l'arrangement des atomes comporte plusieurs orientations.

I.1.3. Structure électronique d'un semi-conducteur

Les mécanismes de conduction et plus particulièrement le transport de charges, sont parfaitement identifiés dans le cas des solides ordonnés. Les propriétés électriques résultent de la répartition des électrons dans les bandes d'énergies, c'est ce qu'on appelle la structure de bande des solides. La figure ci-dessous représente schématiquement la structure électronique de trois grandes familles de matériaux : (les métaux, les semi-conducteurs et les isolants).

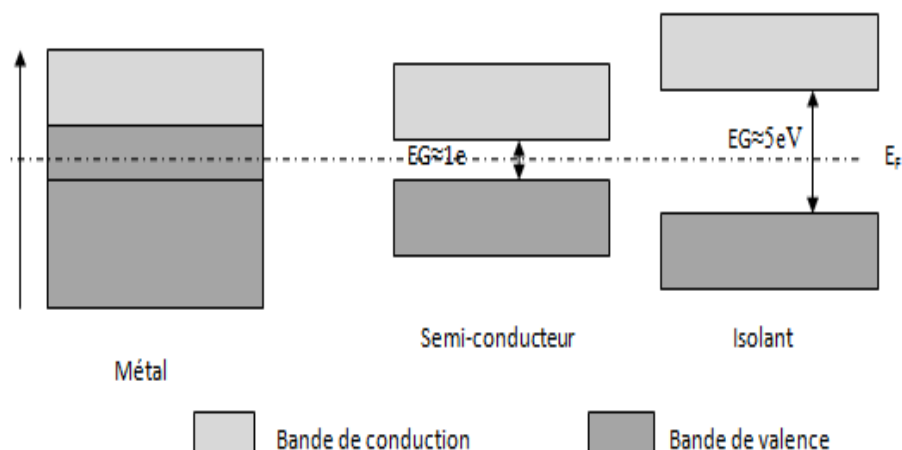


Figure 1: Structure de bandes d'énergies d'un métal, d'un semi-conducteur et d'un isolant à $T = 0 \text{ K}$ [2]

Dans les métaux (conducteurs), la bande de conduction (BC) et la bande de valence(BV) se chevauchent. Les électrons peuvent alors se déplacer librement de proche en proche entre les atomes.

Dans les isolants, la hauteur de la bande interdite séparant la bande de conduction (BC) de la bande de valence (BV) est importante ($E_G > 5\text{eV}$). Il n'y a pas de niveaux d'énergies accessibles pour les électrons, la conduction est impossible (exemple cas du Diamant de gap $E_G = 7\text{eV}$ et d'une résistivité $\rho = 1.10^{12}\Omega.\text{m}$) [2].

Dans les semi-conducteurs, la bande de valence est totalement occupée et la bande de conduction est entièrement vide. Les deux bandes d'énergies sont séparées par une bande interdite dont la largeur correspond à la différence entre le niveau haut de la bande de valence et le niveau bas de la bande de conduction [3], la hauteur de la bande interdite est faible ($E_G \approx 1\text{-}2\text{ eV}$). La conduction est faible et augmente significativement avec la température, par exemple la résistivité de silicium et de germanium à 300 K est: $\rho_{\text{Si}} = 2400\ \Omega.\text{cm}$; $\rho_{\text{Ge}} = 0,5\ \Omega.\text{cm}$.

Lorsque la température augmente, certains électrons possèdent assez d'énergies pour passer de la bande de valence vers la bande de conduction. Chaque absence d'un électron correspond à une lacune de charge positive dans la bande de valence. Ces lacunes sont aussi mobiles et participent à la conduction du courant électrique[2].

Les matériaux conducteurs possèdent une conductivité liée à la mobilité et au nombre de porteurs de charges:

$$\sigma = nq\mu \dots \dots \dots (I. 1)$$

Où: n représente la densité de porteurs de charges, q la charge élémentaire et μ la mobilité des porteurs de charges en cm^2/Vs .

Dans un métal, les états électroniques sont délocalisés sur l'ensemble de la structure cristalline. Le transport de charges est limité par les vibrations du réseau qui augmentent avec la température, provoquant la diffusion des porteurs de charges. Par conséquent, le nombre de porteurs de charges reste constant et la conductivité augmente avec

la diminution de la température, ceci revient à l'augmentation de la mobilité. Dans un semi-conducteur, on observe le phénomène contraire. Les seuls porteurs de charge libres existants proviennent de l'excitation thermique d'électrons avec une énergie supérieure à celle du gap. Leur nombre décroît exponentiellement à basses températures et la conductivité diminue donc de manière exponentielle avec la décroissance de la température.

$$\sigma \approx \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right) \dots \dots \dots (I. 2)$$

Avec $T \neq 0$

$E_G = E_C - E_V$ la largeur de la bande interdite (1.12eV pour le Si et 0.7eV pour le Ge).

kT est l'énergie thermique qui vaut 0.025eV à $T = 300$ K, avec $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ JK⁻¹ la constante de Boltzman.

Un semi-conducteur peut être intrinsèque ou extrinsèque :

a) Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur non dopé, c'est à dire qu'il contient peu d'impuretés ((moins de 1 atome d'impureté pour 10^{13} atomes de l'élément semi-conducteur) [4], il présente un réseau cristallin parfaitement périodique et ayant un taux d'impuretés très faible.

Pour un semi-conducteur intrinsèque, les porteurs de charges sont tous créés par génération thermique, chaque électron de la bande de conduction correspond à un trou dans la bande de valence. De cette constatation, nous déduisons que les densités d'électrons et de trous sont égales pour ce type de semi-conducteur $n = p = n_i$

Avec n_i : densité de charges à l'état intrinsèque, n et p densités de porteurs de charges respectivement des électrons et trous.

b) Semi-conducteur extrinsèque

C'est un semi-conducteur intrinsèque auquel on introduit des impuretés, où en fonction de ces impuretés (atomes pentavalent ou trivalent) on obtiendra respectivement des semi-conducteurs soit de type N(donneurs d'électrons) soit de type P(accepteurs d'électrons).

La position du niveau de Fermi dans un semi-conducteur diffère en fonction du type du Semi-conducteur :

- pour un semi-conducteur intrinsèque le niveau de Fermi est pratiquement au milieu de la bande interdite E_G .
- pour un semi-conducteur extrinsèque type N le niveau de Fermi est proche de la bande de conduction.
- pour un semi-conducteur extrinsèque type P le niveau de Fermi est proche de la bande de valence.

Les densités de porteurs de charges pour chaque type de semi-conducteur sont définies par les expressions (I.3), (I.4) et (I.5) [5] :

-pour un semi-conducteur pur:

$$np = n_i^2 \text{ avec } n_i = \sqrt{N_C N_V} \cdot \exp\left(\frac{E_G}{2kT}\right) \dots \dots \dots (I.3)$$

-Pour un semi-conducteur type N :

$$N = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \dots \dots \dots (I.4)$$

-Pour un semi-conducteur type P:

$$p = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right) \dots \dots \dots (I.5)$$

Avec:

E_F : est appelé niveau de Fermi, il dépend de la nature et de la température du solide et éventuellement des impuretés de dopage;

N_V : la densité d'état dans la bande de valence;

N_C : la densité d'état dans la bande de conduction;

Le niveau de Fermi d'un semi-conducteur pur se situe au milieu de la bande interdite[4]

$$E_{Fi} = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_V}{N_C} \cong \frac{E_C + E_V}{2} \dots \dots \dots (I.6)$$

Avec: E_{Fi} niveau de Fermi intrinsèque

I.1.4. La fonction de Fermi-Dirac

La fonction de Fermi est la suivante:

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)} \dots \dots \dots (I. 7)$$

La fonction de Fermi représente la probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie E par un trou est 1-f(E), car l'absence d'un électron implique la présence d'un trou à la température T (Figure 2) et vice versa[6].

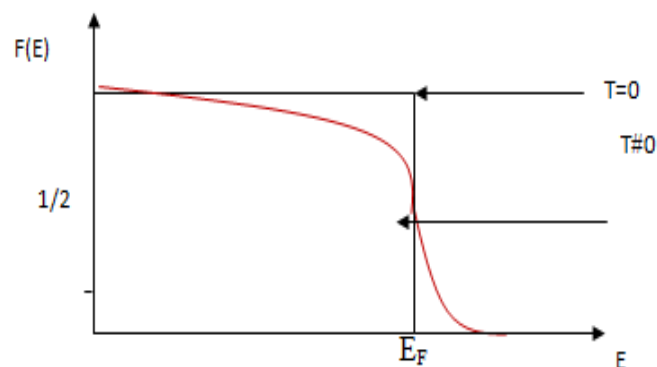


Figure 2: Représentation de la fonction de Fermi-Dirac

Alors à $T = 0K$, tous les états d'énergie au-dessus de E_F sont vides et tous ceux qui se trouvent en dessous de E_F sont occupés (la bande de valence est pleine tandis que la bande de conduction est vide). Un semi-conducteur est un isolant à $T=0K$. Une élévation de température ($T \neq 0K$) permet de faire passer certains électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. La conductivité augmente avec l'augmentation de la température : c'est la caractéristique d'un semi-conducteur.

I.2.Contact Métal/Semi-conducteur(MS)

Nous allons voir ici les différents types de contacts entre un métal et un semi-conducteur:

Par définition le contact métal/semi-conducteur est la juxtaposition d'un semi-conducteur et d'un métal. La mise en contact entraîne l'alignement des niveaux de Fermi et la courbure des bandes de conduction et de valence du matériau semi-conducteur.

Le sens des courbures des bandes et la nature du contact dépendent de la position relative des niveaux de Fermi du métal et du semi-conducteur, autrement dit des valeurs de travaux de sortie Φ_m et Φ_{sc}

En fonction du dopage du semi-conducteur et des valeurs des travaux de sortie des deux matériaux, on distingue deux types de contacts : contact ohmique, et contact redresseur (Tableau 1):

contact	Semi-conducteur de type n	Semi-conducteur de type p
ohmique	$\Phi_m < \Phi_{sc}$	$\Phi_m > \Phi_{sc}$
Redresseur	$\Phi_m > \Phi_{sc}$	$\Phi_m < \Phi_{sc}$

Tableau 1 : Contact ohmique et redresseur selon les travaux de sorties de chaque élément.

- Φ_m est l'énergie à fournir pour arracher un électron au métal sous vide et correspond à la différence d'énergie entre celle de la position du niveau de Fermi et celle du niveau du vide
- Φ_{sc} est l'énergie nécessaire pour arracher un électron au semi-conducteur sous vide.

I.2.1. Contact ohmique

Dans le cas d'un semi-conducteur de type P, il apparaît un contact ohmique lorsque le travail de sortie du semi-conducteur Φ_{sc} est inférieur au travail de sortie du métal Φ_m .

Après la mise en contact, les électrons de la bande de valence du semi-conducteur diffusent dans le métal jusqu'à l'alignement des niveaux de Fermi. Il se forme alors une zone enrichie (zone d'accumulation) en porteurs majoritaires (trous) dans le semi-conducteur proche de l'interface. Le métal se charge négativement et le semi-conducteur positivement. Aucune barrière de potentiel ne se forme à l'interface Métal/Semi-conducteur et le courant peut passer dans un sens comme dans l'autre (le courant circule librement dans les deux sens), le contact est dit ohmique (Figure 3).

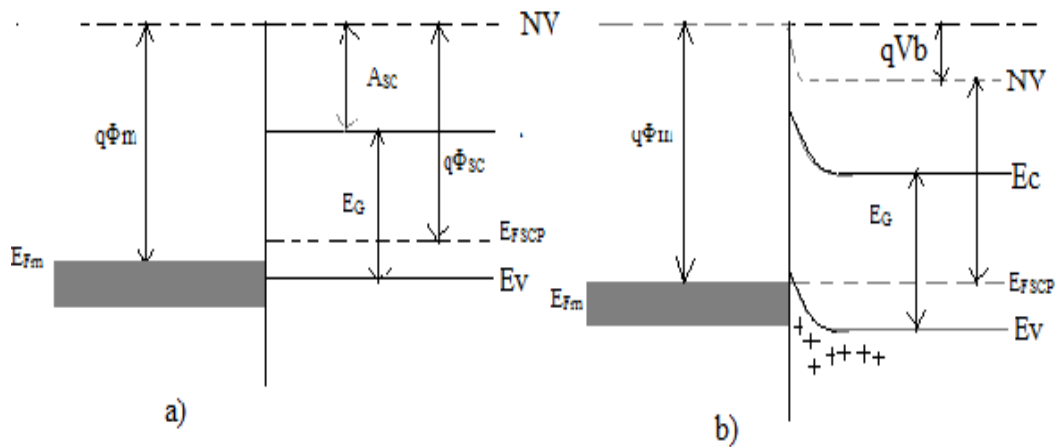


Figure 3: contact ohmique entre un métal et un semi-conducteur de type P

(a) avant contact. (b) après contact [7].

Le contact entre un métal et un semi-conducteur de type N, peut être ohmique quand le travail de sortie du semi-conducteur $q\Phi_{SC}$ est supérieur au travail de sortie du métal $q\Phi_m$, dans ce cas les électrons doivent être transférés du métal vers le semi-conducteur pour équilibrer les niveaux de Fermi. Une zone d'accumulation d'électrons est formée dans le SC près de l'interface. Quelle que soit la tension externe appliquée, aucune barrière d'énergie ne s'élève contre le courant. La barrière d'énergie entre le métal et le SC est:

$$qv_b = q\phi_m - A_{sc} \dots \dots \dots (I.8)$$

Où

$A_{E_{sc}}$ désigne l'affinité électronique du semi-conducteur qui est la différence d'énergie entre le bas de la bande de conduction et le niveau du vide NV.

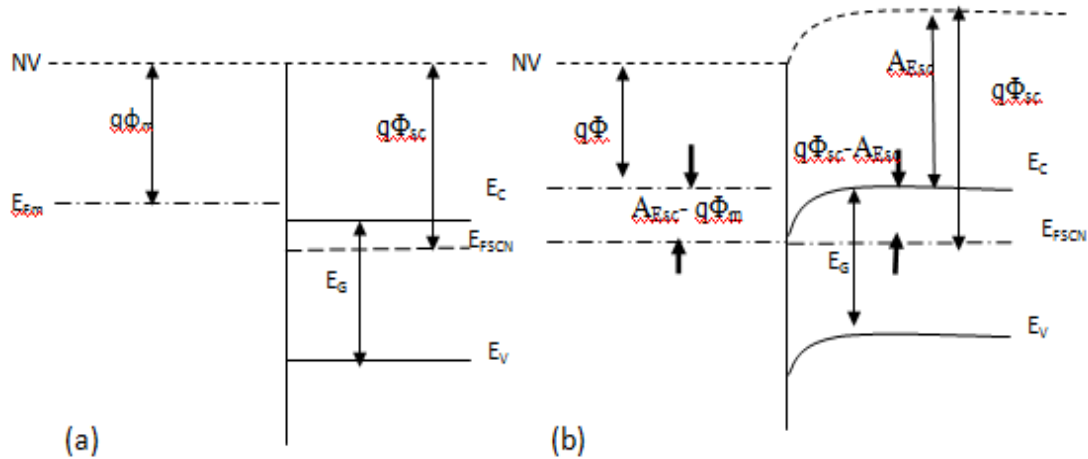


Figure 4 : contact ohmique entre un métal et un semi-conducteur de type N. (a) avant contact.
(b) après contact.

I.2.2. Contact redresseur (Schottky)

Pour un semi-conducteur de type P, le contact est redresseur si le travail de sortie du semi-conducteur $q\Phi_{sc}$ est supérieur au travail de sortie du métal $q\Phi_m$.

Lorsque les deux matériaux se trouvent en contact, les électrons du métal diffusent dans la bande de valence du semi-conducteur. La migration des porteurs à travers l'interface se fait jusqu'à égalisation des niveaux de Fermi.

Il ya alors création d'une zone de charge d'espace due à ce transfert de charges. Ceci est décrit par une courbure des bandes de valence et de conduction à partir de l'interface, l'énergie du gap étant conservée.

Le mouvement de charges s'interrompt lorsque le champ électrique créé par la zone de charge d'espace est suffisant pour compenser le courant de diffusion. On est en présence d'un contact redresseur ou contact Schottky (Figure 5).

Pour un semi-conducteur de type N, le contact est redresseur lorsque le travail de sortie du semi-conducteur est inférieur au travail de sortie du métal.

A la mise en contact, les électrons du SC diffusent vers le métal jusqu'à égalisation des niveaux de Fermi. Il se crée une zone de déplétion à l'interface SC/Métal qui produit une courbure d'énergie au voisinage de l'interface. Une barrière de potentiel s'établit à l'interface SC/Métal pour un électron allant du SC vers le métal:

$$\Delta E_{sm} = q(\phi_m - \phi_{sc}) = qV_d \dots \dots \dots (I.9)$$

Cette barrière va empêcher la diffusion des électrons dans SC vers le métal. La barrière de potentiel du contact SC/Métal qui empêche la diffusion des électrons du métal vers le SC s'exprime par.

$$\Delta E_{ms} = q\phi_m - A_{Esc} \dots \dots \dots (I.10)$$

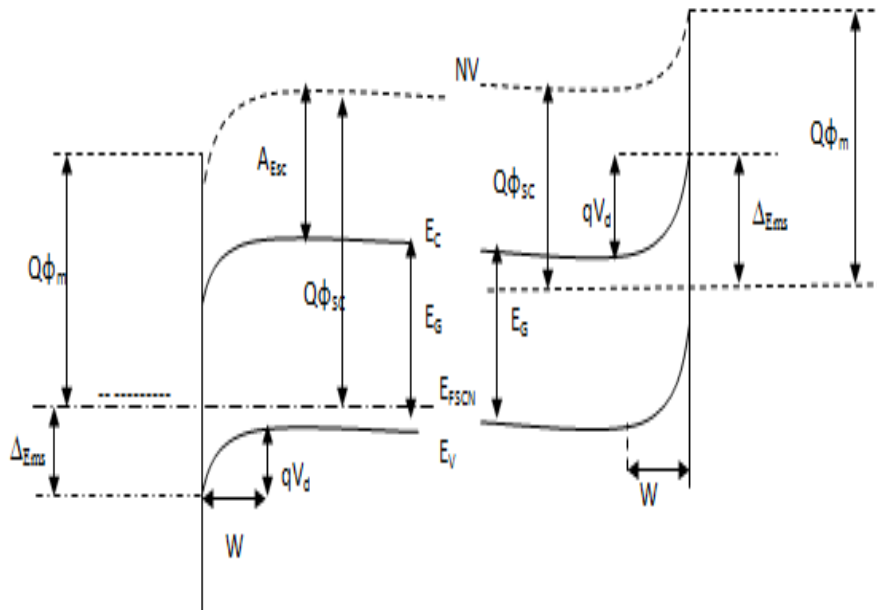


Figure 5: contact Schottky entre un métal et un semi-conducteur: (a) type P, (b) type N.

I.3. La structure Métal/Isolant/Semi-conducteur (MIS)

Dans le cas de la structure MIS (Métal/Isolant/Semi-conducteur) l'intervalle entre le métal et le semi-conducteur est rempli par un isolant. En technologie silicium cet isolant est l'oxyde de silicium SiO_2 d'où le nom plus communément utilisé de structure MOS (Métal/oxyde/Semi-conducteur). Le principe de fonctionnement de la structure dépend de la nature de porteurs de charges ainsi que de la valeur de travail de sortie du métal et de semi-conducteur.

1) Cas d'une structure MIS où le semi-conducteur est de type N

a) Cas où $q\Phi_m < q\Phi_{sc}$

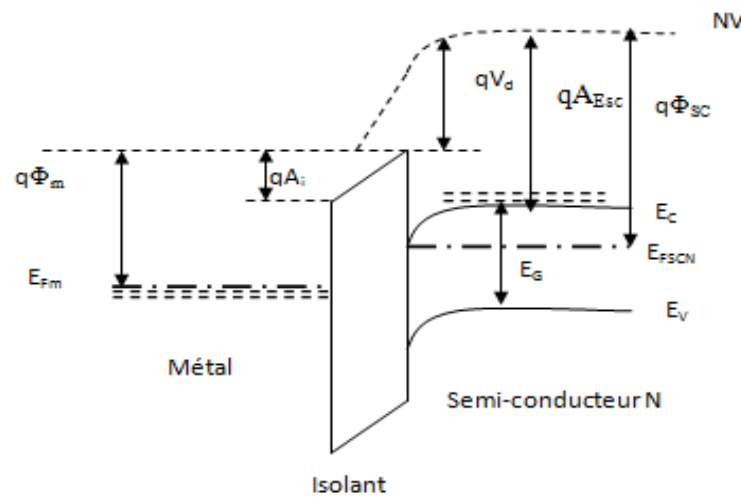


Figure 6 : Structure MIS où le semi-conducteur est de type N Cas où $q\Phi_m < q\Phi_{sc}$

Les électrons se déplacent du métal et s'accumulent dans le semi-conducteur. Les charges positives résultent d'un départ d'électrons de la surface du métal et les charges négatives de l'accumulation des électrons du côté semi-conducteur. La bande de valence et la bande de conduction se courbent vers le bas. Le semi-conducteur est en régime d'accumulation.

b) Cas où $q\Phi_m = q\Phi_{sc}$

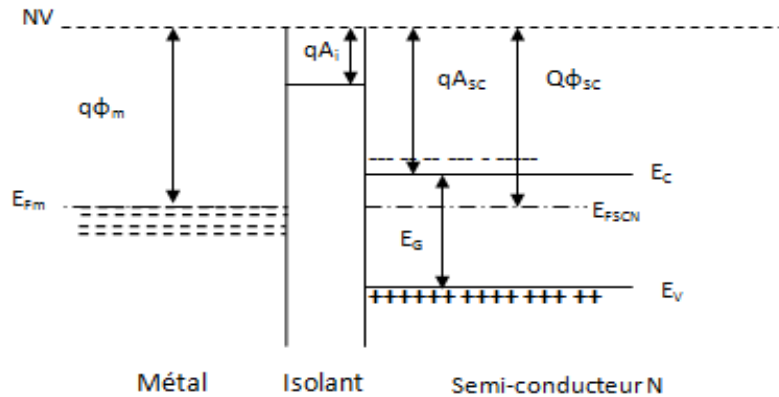


Figure 7 : Structure MIS où le semi-conducteur est de type N Cas où $q\Phi_m = q\Phi_{sc}$

c) Cas où $q\Phi_m > q\Phi_{sc}$

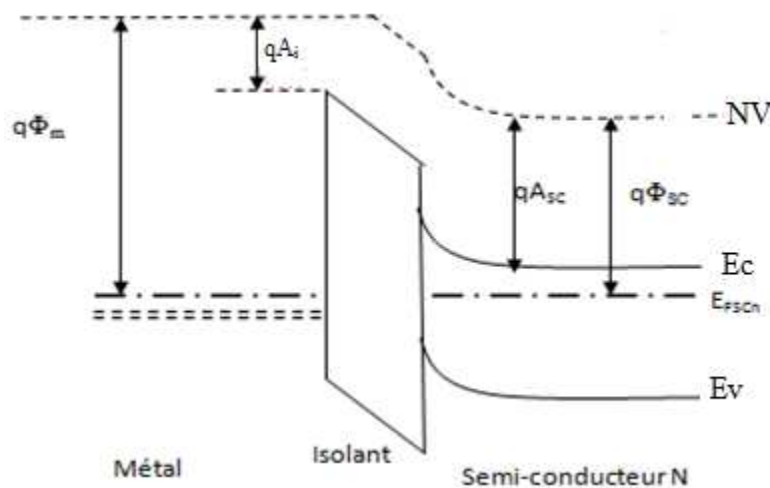


Figure 8 : Structure MIS où le semi-conducteur est de type N

Cas où $q\Phi_m > q\Phi_{sc}$

Dans ce cas, les électrons passent du semi-conducteur vers le métal. Ceci implique l'apparition de charges positives fixes du côté semi-conducteur près de l'interface. Donc il apparait un déficit en porteurs majoritaires et les bandes d'énergies se courbent vers le haut. Ce régime est appelé « régime de déplétion ».

2) Cas d'une structure MIS où le semi-conducteur est de type P

a) Cas où $q\Phi_m > q\Phi_{sc}$

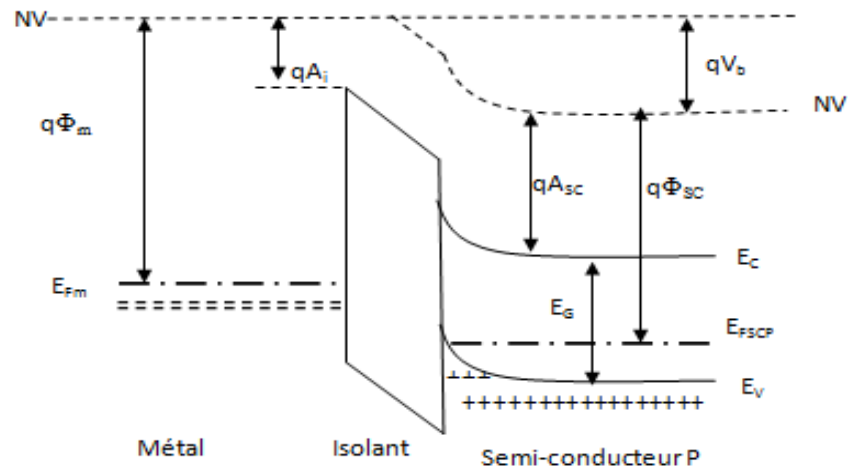


Figure 9: Structure MIS où le semi-conducteur est de type P Cas où $q\Phi_m > q\Phi_{sc}$

Les électrons passent du semi-conducteur vers le métal d'où à l'augmentation de la densité des trous du côté semi-conducteur. Il se crée alors une zone de charge positive à l'interface Isolant/Semi-conducteur, entraînant ainsi une courbure de bande d'énergie vers le haut. C'est le régime d'accumulation.

b) Cas où $q\Phi_m < q\Phi_{sc}$

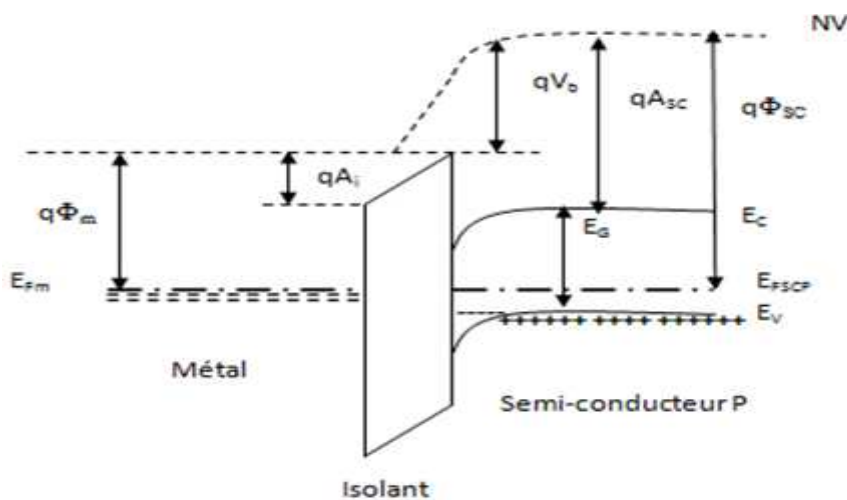


Figure 10 : Structure MIS où le semi-conducteur est de type P Cas où $q\Phi_m < q\Phi_{sc}$

Il est plus facile dans ce cas, aux électrons de passer du métal vers le semi-conducteur que du semi-conducteur vers le métal. Une fois que les électrons arrivent dans le semi-

conducteur, ils se recombinent avec les trous qui sont les porteurs majoritaires, il y'aura donc apparition d'une zone désertée en porteurs majoritaires, c'est le régime de déplétion.

Si $q\Phi_m \ll Q\Phi_{sc}$ les charges négatives qui apparaissent dans le semi-conducteur sont dues à la recombinaison à l'interface Isolant/Semi-conducteur des trous avec les électrons qui arrivent du métal, les ions accepteurs ne seront plus compensés. C'est le début de régime d'inversion [8].

La hauteur de barrière entre le métal et le semi-conducteur est toujours donnée par la différence des travaux de sortie du métal et du semi-conducteur $V_d = \Phi_m - \Phi_{sc}$

I.4.Principe de base et structure d'un transistor MOSFET

I.4.1.Effet de champ

Le principe de base d'un transistor MOS (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 de 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.
- ✓ l'autre possède deux contacts à ses extrémités, entre lesquels est appliquée une différence de potentiel. La région sur laquelle le potentiel appliqué est le plus élevé est le drain (D), l'autre est la source (S) généralement à la masse [9].

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 électro-statiquement 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 [10]. Dans cette structure, la tension de grille (V_{GS}) commande la quantité des charges et la tension de drain (V_{DS}) les met en mouvement.

I.4.2 Structure d'un transistor MOSFET

En général, un transistor MOSFET contient une grille(G) en silicium poly-cristallin séparée du substrat en silicium monocristallin par une mince couche de diélectrique, le plus souvent le dioxyde de silicium SiO_2 , les régions source et drain font partie du substrat, dont elles diffèrent par leur type de conduction.

On considère un substrat du silicium dopé P, dans lequel sont implantées les deux électrodes source et drain, elles sont équivalentes à des réservoirs d'électrons de chaque côté du canal. Une couche mince de SiO_2 isole le canal d'une métallisation constituant l'électrode de grille. La tension appliquée sur l'électrode de grille assure le contrôle de la conductivité du canal. Le choix judicieux de la tension de grille va permettre le passage d'un courant électrique entre la source et le drain.

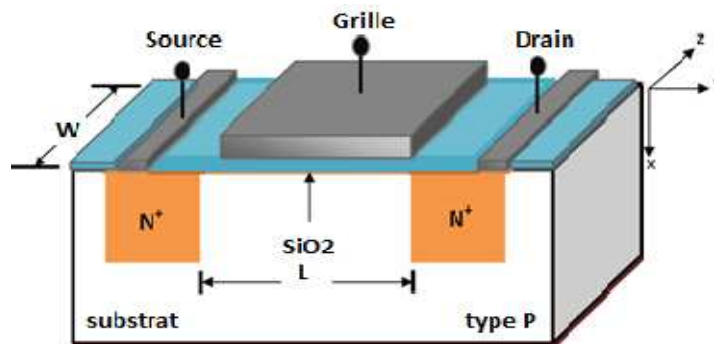


Figure 11: structure d'un transistor MOSFET [11].

Lorsqu'une tension négative est appliquée à la grille, les trous majoritaires sont attirés vers l'interface Oxyde/Semi-conducteur, on dit que la capacité MOS fonctionne en régime d'accumulation. Un canal de conduction de type p est alors créé entre la source et le drain.

Lorsqu'une tension positive est appliquée à la grille, les électrons minoritaires sont attirés vers l'interface Oxyde/Semi-conducteur ; un canal conducteur de type n est alors créé entre la source et le drain, on dit que la capacité MOS fonctionne en régime d'inversion.

Suivant le type des porteurs assurant le passage du courant, on peut parler des transistors à canal N qu'on appelle NMOS et des transistors à canal P appelé PMOS.

Pour un NMOS, la grille doit être polarisée positivement pour créer un canal de conduction rempli d'électrons mobiles à la surface d'un semi-conducteur de type P. La tension

V_{DS} doit être positive afin de drainer ces électrons ; le courant circule donc du drain vers la source.

Pour un PMOS, la grille doit être polarisée négativement pour créer un canal de conduction rempli de trous mobiles à la surface d'un semi-conducteur de type N. La tension V_{DS} doit être négative afin de drainer ces trous ; le courant circule donc de la source vers le drain.

Chacun de ces deux transistors peut avoir une construction à canal « surfacique » ou à canal « enterré » [10].

Le canal surfacique (aussi appelé canal d'inversion) est induit électro-statiquement par l'effet de champ, il est de type des porteurs, N ou P, et donc opposé (d'où le nom d'inversion) à celui du substrat, mais de même type que les régions de source et de drain, rendant ainsi 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 (Figure 12).

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 de source et de 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(Figure 12).

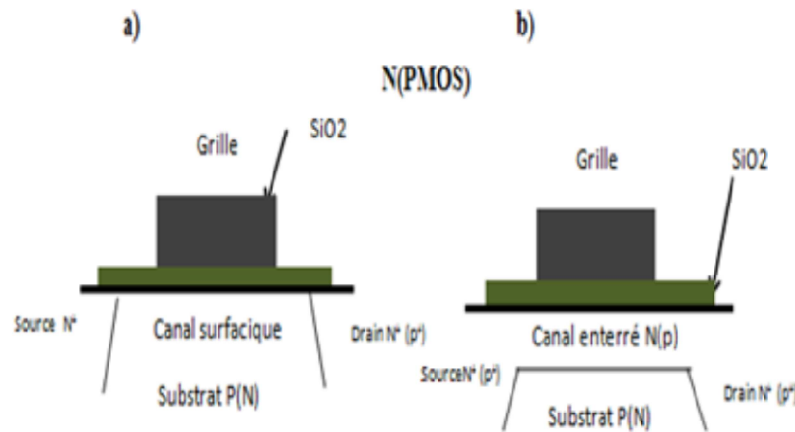


Figure 12 : différents types de canal pour un transistor MOSFET [10].

a) à canal surfacique; b) à canal enterré

I.5. Principe de fonctionnement d'un transistor MOSFET

Le fonctionnement d'un transistor MOSFET dépend de la formation d'un canal de conduction sous la grille métallique entre la source et le drain. Un canal de conduction entre la source et le drain peut être formé soit en utilisant une couche implantée ou enterrée dans le substrat, soit en appliquant une tension de grille [12].

I.5.1 Tension de seuil

Avant d'aborder le principe de fonctionnement d'un transistor MOSFET, nous allons développer la notion de tension de seuil (V_{th} threshold voltage) ; c'est une notion fondamentale pour un TMOS, car elle gouverne la mise en conduction du transistor (V_{th} est aussi appelé tension de mise en conduction). Dans ce qui suit du chapitre, nous prendrons pour exemple un transistor NMOS (type P), mais les mêmes raisonnements et les mêmes équations (au changement de signe près) peuvent s'appliquer aux dispositifs PMOS (type N).

Examinons ce qui se passe à l'interface Si/SiO₂, lorsque le potentiel de grille V_{GS} croît, les autres potentiels étant nuls, sauf celui du drain, qui est tout de même suffisamment faible pour que l'on puisse considérer le canal comme équipotentiel [10].

Le dioxyde de silicium SiO₂ va jouer le rôle de l'oxyde de grille de la structure MOS, car il permet d'obtenir une bonne qualité électrique de l'interface isolant/substrat silicium dans la région du canal.

Un potentiel V_{GS} suffisamment négatif conduit à un appel de trous en surface, laquelle est alors en accumulation. Le potentiel de surface (canal) est inférieur au potentiel de la source [10], constituant ainsi une barrière de potentiel pour les électrons. Cette barrière est le seuil de conduction de la jonction N^+P (source-canal). Autrement dit, la jonction est polarisée en inverse ; aucun courant ne peut passer : le transistor est bloqué.

Lorsque le potentiel de grille augmente, les trous sont progressivement repoussés de la surface, jusqu'à la création d'une zone surfacique ne comportant que des charges fixes négatives d'une densité surfacique Q_{dep} , on dit que la surface est en déplétion.

Lorsque le potentiel de grille continue à croître, il est de même du potentiel du canal, et il arrive un moment où cette tension approche le niveau du potentiel de la source. Autrement dit, la barrière du potentiel entre la source et le canal disparaît et des électrons affluent dans le canal. Ils se trouvent alors attirés vers le drain par l'action du champ électrique longitudinal créé par la tension positive V_{DS} . Tout le long de l'interface, il se crée donc une couche très fine contenant des électrons. La surface est dite en inversion, car on y trouve un excès d'électrons dans une zone de type P, initialement riche en trous. Il se forme ainsi un canal de conduction qui relie la source et le drain. La tension de grille qui initie l'apparition de la couche d'inversion à l'interface est appelée tension de seuil V_{th} ou tension de mise en conduction. L'ensemble source-canal-drain est alors équipotentiel et présente une résistance N^+NN^+ , où la résistance de la partie N (canal) est modulable moyennant la polarisation de grille. La densité de charge en électrons libres Q_{inv} dans le canal, précédemment nulle, augmente alors avec V_{GS} . La figure 13 représente les charges induites dans le semi-conducteur (a), et un modèle capacitif de la structure MOS (b).

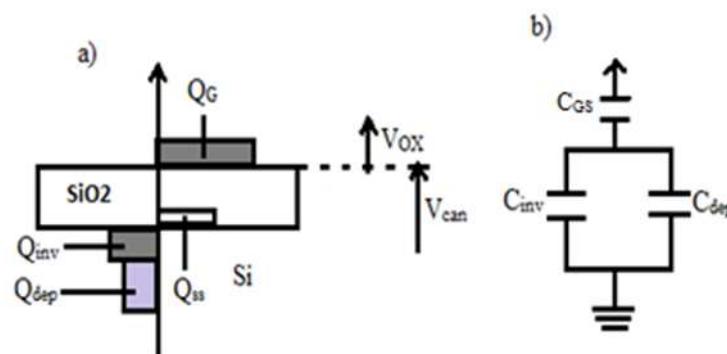


Figure 13:(a)Charges induites dans le semi-conducteur, (b) modèle capacitif de la structureMOS[10].

La capacité totale d'une structure MOS est équivalente à la mise en série de la capacité de l'oxyde avec la somme des capacités présentes dans le silicium.

Calcul de la tension de seuil:

La tension de seuil d'un transistor MOSFET est définie comme étant la tension minimale de la tension de grille qui doit être appliquée pour former une couche d'inversion [9]. Cette tension est donnée par la somme de:

- la chute du potentiel dans le diélectrique

$$V_{OX} = \frac{Q_{dep}}{C_{OX}} \dots \dots \dots (I. 11)$$

Avec Q_{dep} : charge de déplétion, C_{OX} : capacité dans l'oxyde et V_{OX} : tension dans l'oxyde

Pour la tension $V_{GS} = V_{th}$, la charge totale du semi-conducteur vaut Q_{dep} , la densité d'électrons dans la couche d'inversion Q_{inv} est négligeable [10].

- la chute du potentiel sur la zone désertée, qui est la tension pour laquelle le canal devient équipotentiel par rapport à la source. Autrement dit, elle définit la tension de seuil à la conduction. Elle vaut ψ_s .

En réalité, cette somme ($V_{ox} + \psi_s$) doit encore tenir compte de deux autres paramètres qui sont :

- 1) La différence de travaux de sortie Φ_{ms} entre le matériau de la grille et le semi-conducteur.
- 2) la présence de charges électriques fixes dans le volume du diélectrique et celles piégées à l'interface Si/SiO₂, ces charges physiques sont souvent représentées par une charge effective Q_{ss} amenant ainsi à une chute du potentiel égale Q_{ss}/C_{ox} .

En résumant, la tension de seuil V_{th} se calcule par l'expression [13] :

$$V_{th} = V_{FB} + \psi_s + \frac{Q_{dep}}{C_{OX}} \dots \dots \dots (I. 12)$$

Où V_{FB} la tension de bande plate, ψ_s potentiel de surface et Q_{dep}/C_{OX} la chute du potentiel dans l'oxyde.

I.5.2. Diagrammes de bandes d'une structure MOS[9]

L'état électrique de la structure MOSFET est conditionné par l'état de la capacité MIS (Métal/Isolant/Semi-conducteur). On distingue principalement cinq régimes de fonctionnement [15]. Le diagramme de bandes d'une structure MOS avec un substrat de type P va nous aider à expliquer leur origine.

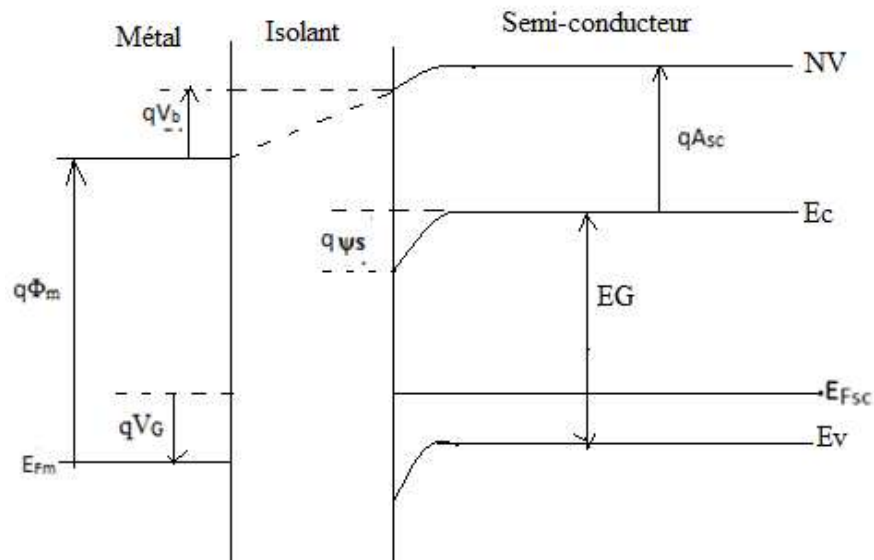


Figure 14: Diagramme de bande d'une structure MOS à substrat de type P [9].

Où :

E_c : Energie du bas de la bande de conduction du semi-conducteur ;

E_v : Energie du haut de la bande de valence du semi-conducteur ;

E_{Fsc} : Energie du niveau de Fermi du semi-conducteur ;

E_{Fm} : Energie du niveau de Fermi du métal ;

E_G : Energie de la bande interdite ;

Φ_m : Travail de sortie du métal ;

Φ_{sc} : Travail de sortie du semi-conducteur ;

A_{sc} : Affinité électronique du semi-conducteur ;

V_G : Tension appliquée sur la grille ;

V_b : chute de potentiel dans l'isolant ;

Ψ_s : potentiel de surface.

I.5.2.1. Situation de bande plate ($\psi_s = 0, V_{GS} = V_{FB}$):

Pour obtenir la condition de bande plate où le potentiel de surface ψ_s est nul, c'est-à-dire la courbure de bande est nulle à la surface du semi-conducteur, il faut appliquer une tension V_{FB} appelée la tension de bandes plates (ou Flat Band) sur la grille, afin de pouvoir compenser la différence des travaux de sortie, et la charge dans l'oxyde et à l'interface Oxyde/Semi-conducteur.

Cette tension est donnée par [16]:

$$V_{FB} = - \left[(\Phi_m - \Phi_{SC}) - \frac{Q_{SS}}{C_{OX}} \right] \dots \dots \dots (I. 13)$$

Avec

$$C_{OX} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \dots \dots \dots (I. 14)$$

Où ϵ_{ox} et t_{ox} la permittivité électrique et l'épaisseur de l'oxyde.

I.5.2.2. Situation d'accumulation ($\psi_s < 0, V_{GS} < V_{FB}$):

Lorsque la tension V_{GS} est négative, les niveaux de Fermi du métal et du semi-conducteur sont décalés. Des porteurs majoritaires (trous) sont attirés vers la surface du Semi-conducteur provoquant une courbure des bandes d'énergies à l'interface Oxyde/Semi-conducteur. Il apparaît une charge Q_{SC} positive et un champ électrique, et il apparaît à la surface du métal une charge égale en valeur absolue à Q_{SC} et de signe opposé, c'est ce qui correspond au régime d'accumulation. Une barrière de potentiel qui existe entre la source et le substrat va interrompre la circulation des électrons de la source vers le drain, le transistor se trouve à l'état bloqué.

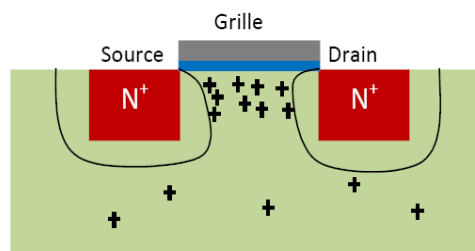


Figure 15: Transistor NMOSFET en régime d'accumulation[15]

I.5.2.3. Situation de désertion ($\Phi_F < \psi_S < 0$, $V_{GS} > V_{FB}$):

Lorsque la tension V_{GS} positive, les trous sont repoussés vers l'intérieur de semi-conducteur alors que les électrons (minoritaires) sont attirés vers la surface. Il y'a dépeuplement en trous majoritaires dans le volume du semi-conducteur au voisinage de l'interface Si/SiO₂. L'éloignement des trous laissent apparaitre dans le volume du semi-conducteur une charge d'espace de densité volumique égal a $-qN_A$ Sur une profondeur de SC. La densité des électrons en surface reste négligeable dans la concentration des charges à l'interface du semi-conducteur : $Q_{sc} = -qN_A$

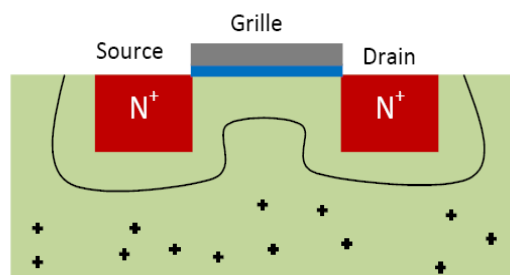


Figure 16: Transistor NMOSFET en régime de désertion[15].

I.5.2.4. Situation d'inversion faible ($\Phi_F \leq \psi_S < 2\Phi_F$, $V_{FB} < V_{GS} < V_{th}$):

Lorsque la tension V_{GS} augmente plus, les électrons minoritaires qui se concentrent à la surface du semi-conducteur commencent à constituer une charge globale non négligeable par rapport à la charge d'espace due à la désertion des trous. Cette charge électronique croît plus rapidement avec V_{GS} que la charge d'espace, nous définirons un seuil entre les deux régimes (désertion et inversion)

La condition $\psi_S = \Phi_F$ correspondant au seuil de l'inversion faible pour lequel les concentrations en surface des porteurs majoritaires et minoritaires sont égales à la concentration intrinsèque n_i , le dispositif peut alors commencer à conduire. Le régime d'inversion faible est maintenu.

I.5.2.5. Situation d'inversion forte ($\psi_S \geq 2\Phi_F$, $V_{GS} > V_{th}$):

La condition $\psi_S = 2\Phi_F$ définit le seuil d'inversion forte. Cette valeur correspond au point où la densité volumique d'électrons à la surface devient égale à la densité de trous de SC dopé p à l'équilibre.

Pour lequel le canal est formé d'une forte densité d'électrons à $\psi_S > \Phi_F$ avec:

$$\phi_F = \frac{kT}{q} \log \frac{N_A}{n_i} \dots \dots \dots (I.15)$$

$$\psi_S = 2\phi_F = \frac{2kT}{q} \log \frac{N_A}{n_i} \dots \dots \dots (I.16)$$

La polarisation de la structure MOS par une tension V_{GS} , entre la grille métallique et le substrat, implique l'apparition d'une charge Q_G dans la grille et d'une charge opposée Q_{SC} dans le semi-conducteur, la variation de la tension V_{GS} modifiée la valeur de ces charges, ce qui a pour conséquence les changements de régimes de fonctionnement de MOS.

I.6.L'effet de la température sur les paramètres d'un transistor

I.6.1.L'effet de la température sur la tension de seuil

La figure 17 représente la variation de la tension de seuil en fonction de la température, obtenue au moyen de tracer de la caractéristique $I_{DS} = f(V_{GS})$. On remarque que la tension de seuil diminue linéairement avec l'augmentation de la température[14].

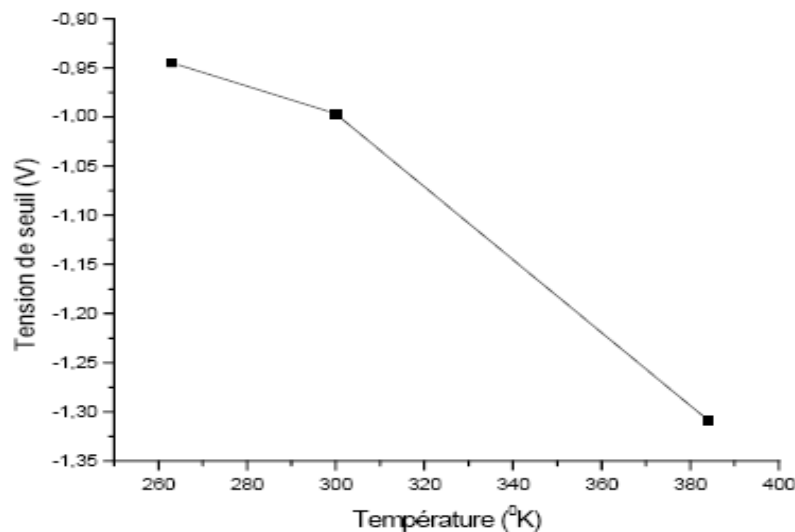


Figure 17 : l'effet de la température sur la tension de seuil du dispositif [14].

I.6.2. L'effet de la température sur le courant de drain

La figure ci-dessous représente la variation de courant de drain d'un dispositif MOSFET en fonction de la température obtenu au cours de tracer de caractéristique de transfert $I_{DS} = f(V_{GS})$. Ce courant de drain diminue avec l'augmentation de la température.

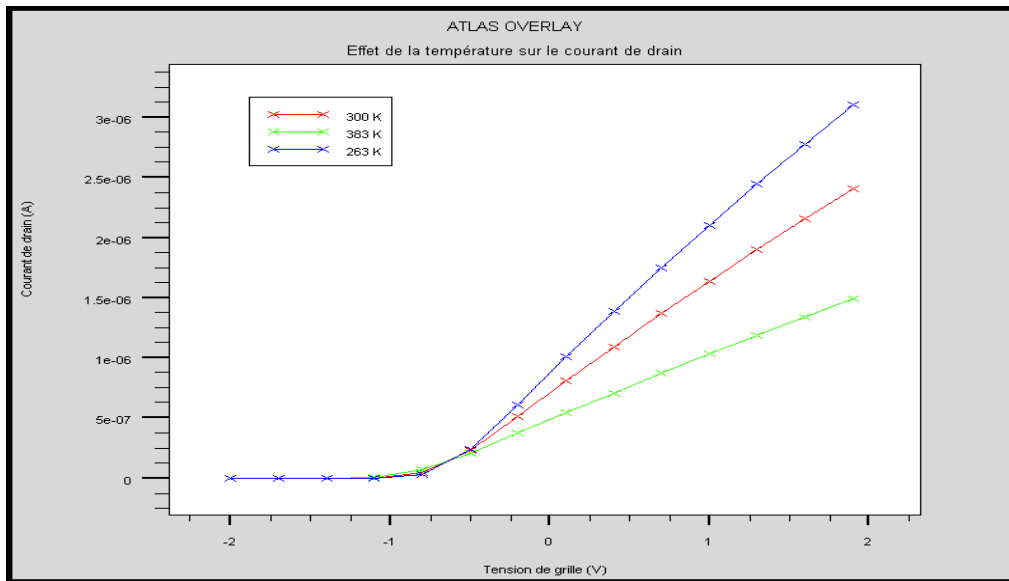


Figure 18 : l'effet de la température sur le courant de drain

I.6.3. L'effet de la température sur la mobilité des porteurs

La mobilité des porteurs de charges dans la structure MOS et en particulier dans la zone d'inversion est fortement liée à la température. La figure ci-dessous montre l'influence de la température sur la mobilité des électrons de la couche d'inversion dans le canal du MOSFET en fonction du champ électrique appliqué. On constate, sur cette figure, que la mobilité de porteurs dépend de la température.

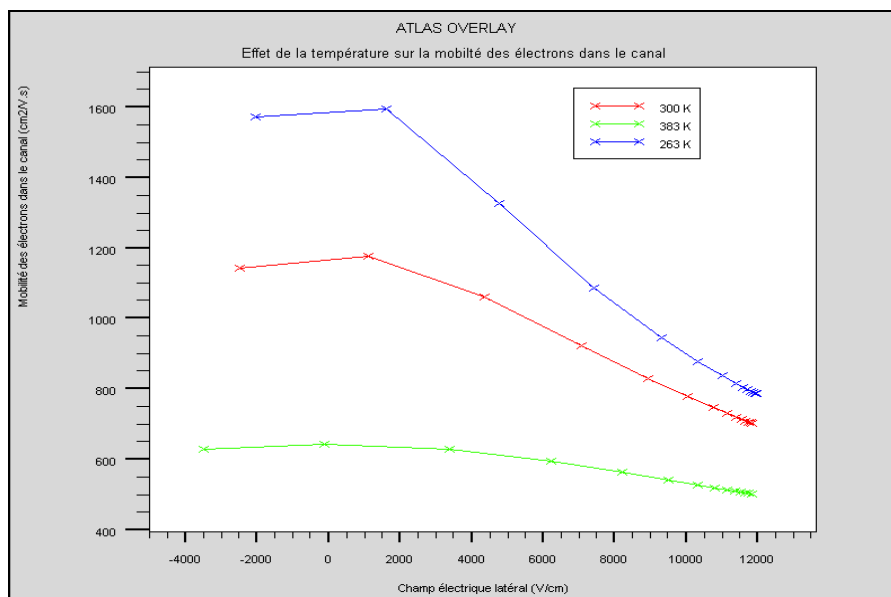


Figure 19 : Influence de la température sur la mobilité des électrons dans la couche d'inversion[11]

En conclusion, l'effet de la température sur le comportement électrique du MOSFET, nous pouvons dire que nous devrions faire des mesures à basses températures, pour observer un meilleur fonctionnement électrique de ce dispositif.

I.7. Régimes de fonctionnement d'un transistor MOSFET

Une fois les porteurs mobiles induits dans le canal par l'effet de champ, le flux de courant I_{DS} peut survenir. Pour comprendre le fonctionnement d'un TMOS, il est indispensable de remarquer qu'à la modulation de la résistance du canal par l'effet de champ (appliqué une tension V_{GS}), s'additionne une autre modulation provenant de la polarisation du drain. Il en résulte que le canal polarisé entre source et drain, voit 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 le long du canal. Par conséquent, l'effet de champ devient lui aussi 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'opérations du transistor MOSFET:

I.7.1. 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 donc 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[9]. Le MOSFET travaille en régime ohmique ou linéaire. Dans cette zone, le courant reste linéaire avec la tension de drain appliquée :

$$I_{DS} = \frac{\mu W C_{OX}}{L} (V_{GS} - V_{DS}) V_{DS} \dots \dots \dots (I. 17)$$

On remarque que le courant I_{DS} croît linéairement avec les tensions V_{GS} et V_{DS} .

I.7.2. Régime de pincement:

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

$$V_{DS} = (V_{GS} - V_{th}) = V_P \dots \dots \dots (I. 18)$$

Le canal devient, par conséquent, de plus en plus résistif. Cela se traduit par une augmentation de I_{DS} moins 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.

I.7.3 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} (Figure 20)

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.

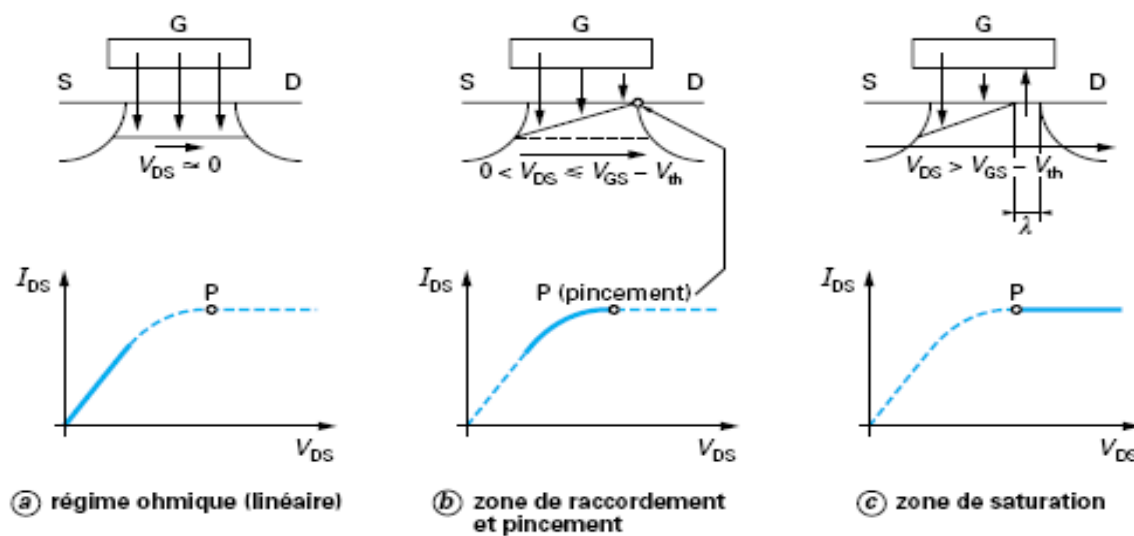


Figure 20: différents régimes de fonctionnement en fonction de V_{DS} [10].

I.8. La transconductance du MOSFET :

La transconductance g_m est l'un des paramètres les plus importants pour la mesure du gain des dispositifs, elle est définie comme étant la dérivée du courant de drain par rapport à la tension de grille V_{GS} [9]:

$$g_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \dots \dots \dots (I. 19)$$

Pour le régime linéaire, la transconductance est donnée par la relation suivante :

$$g_m = \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) V_{DS} \dots \dots \dots (I.20)$$

Et pour le régime de saturation, la transconductance est donnée par :

$$g_m = \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{th}) \dots \dots \dots (I.21)$$

I.9. Caractéristiques électriques d'un transistor MOSFET[17]

Pour étudier la réponse en courant de notre dispositif MOSFET sous la polarisation de tension de drain. Nous avons donné le réseau de caractéristiques 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 (Figure 21) :

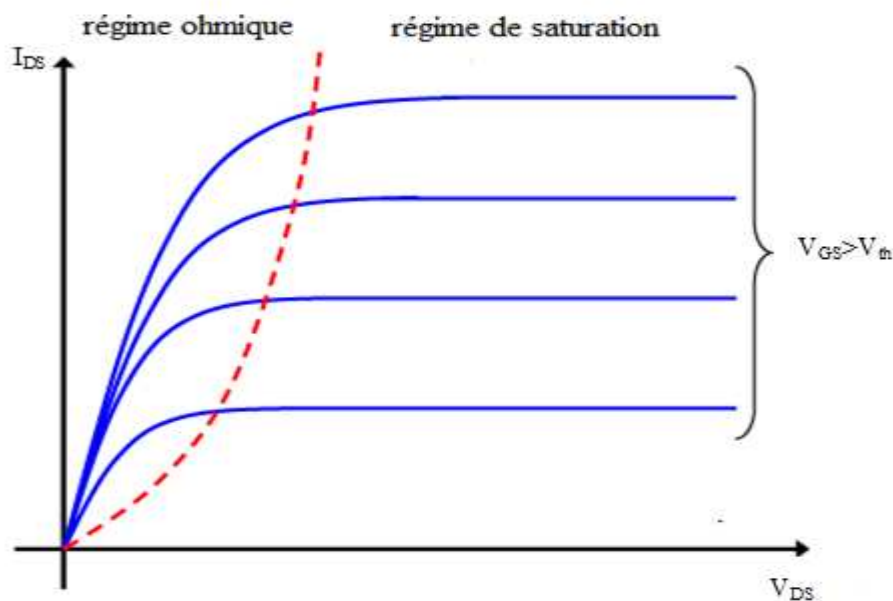


Figure 21: Réseau de Caractéristique $I_{DS} = f(V_{DS})$ d'un transistor MOSFET

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les notions de bases des transistors à effet de champ de type MOS. L'influence des tensions de polarisations grille, drain et l'effet de la température sur les performances d'un dispositif MOSFET ainsi que ses caractéristiques électriques.

Introduction

Les matériaux organiques (plastiques) à la différence des métaux, sont réputés ne pas conduire le courant. De fait, ils sont utilisés pour isoler les fils de cuivre des câbles électriques ordinaires. En effet, alors qu'ils sont communément utilisés comme isolants, leur propriété de conduction a été découverte dans les années 70 et a donné lieu en 2000 à l'attribution du prix Nobel de chimie à Alan J Heeger, Alan G Mac Diannid et Hideki Shiraka [17], et vers la fin des années 1970 ils ont montré qu'après certaines modifications, un plastique peut devenir conducteur de l'électricité, c'est-à-dire « métal synthétique » [18]. Pour ce faire, ce matériau doit être conjugué, c'est-à-dire que sa chaîne principale doit comporter alternativement des liaisons simples (C-C) et multiples (C=C); de plus il doit être dopé ce qui consiste à enlever des électrons (par oxydation) ou à en ajouter (par réduction). Les trous ou électrons supplémentaires peuvent alors se déplacer tout le long de la chaîne moléculaire qui devient ainsi conductrice d'électricité [19].

Les matériaux organiques peuvent se classer en deux catégories : les petites molécules 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 trouve aux niveaux de la taille de la molécule. Ils ont le même principe de fonctionnement, par contre les techniques de fabrication sont différentes.

II.1. Les semi- conducteurs organiques

Les semi-conducteurs organiques sont des matériaux qui possèdent des propriétés identiques aux semi-conducteurs inorganiques, dont la conductivité se trouve entre celles des métaux et celles des isolants. La figure 1 montre quelques valeurs de conductivité de matériaux organiques et inorganiques.

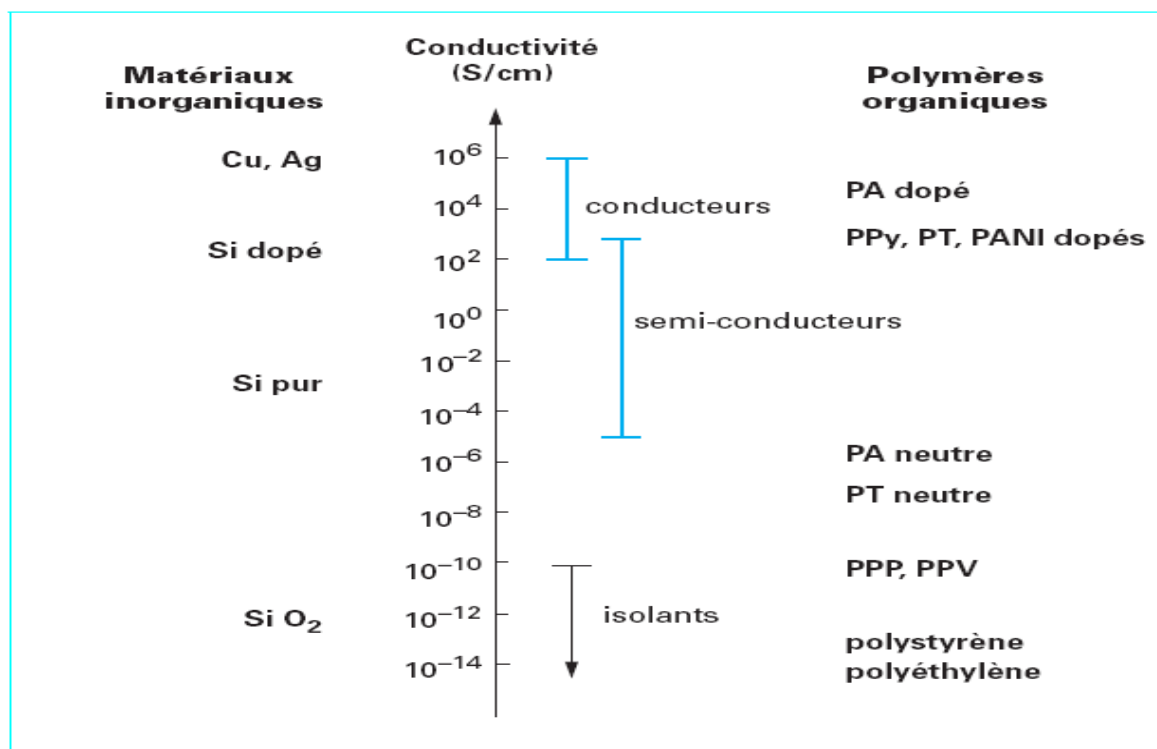


Figure 1: Conductivité électrique de quelques matériaux organiques et inorganiques.

La majorité des semi-conducteurs organiques sont des polymères conjugués, dans ces matériaux la structure carbonée insaturée alternant les liaisons simples (σ) et les liaisons doubles ($\sigma+\pi$).

Les systèmes conjugués font l'objet d'un développement considérable en raison de leurs propriétés Optoélectroniques qui, associées à la flexibilité et à la légèreté des matériaux organiques, sont utilisés pour élaborer de nouveaux dispositifs optoélectroniques et électroniques comme des diodes électroluminescentes, des cellules photovoltaïques et des transistors à effet de champ.

II.1.1. Notion de conjugaison

Avant d'aborder en détails le principe des matériaux organiques, nous allons d'abord expliquer la notion de conjugaison dans ces matériaux*

Le phénomène de conjugaison dans les matériaux organiques est lié à la succession de liaisons simples et doubles dans leur structure, les molécules constituant les matériaux organiques contiennent toujours des atomes de carbone. L'atome de carbone possède quatre électrons de valence. Lorsqu'un atome de carbone forme des liaisons chimiques avec quatre

autres électrons, il est dans un état d'hybridation sp^3 . Les extrémités des quatre liaisons forment un tétraèdre centré sur l'atome de carbone. Elles sont appelées liaisons simples ou (liaisons σ) et assurent la cohésion de la chaîne polymère. Les électrons sont fortement localisés autour des noyaux. Par conséquent, les électrons ne peuvent pas participer au transport de charges et un matériau possédant ce type de liaison ne peut pas être conducteur; c'est un isolant.

Quand l'atome de carbone forme des liaisons chimiques avec trois autres atomes, il est dans un état d'hybridation sp^2 . Les trois orbitales sont coplanaires et forment un angle de 120° . L'atome de carbone possède toujours quatre électrons périphériques, le 4^{ème} électron ne participe pas aux trois liaisons qui se trouvent sur une orbitale atomique (OA) $2p_z$ perpendiculaire au plan des orbitales hybrides sp^2 . Les orbitales $2p_z$ des électrons non liés ont la possibilité de se recouvrir et de former une liaison π . Ces électrons présents sur ces orbitales π peuvent passer librement d'un atome de carbone à un autre; ils sont délocalisés. Une liaison carbone-carbone constituée d'une liaison σ et d'une liaison π . Étant donné la nature du recouvrement des orbitales, les liaisons σ sont plus longues et plus fortes que les liaisons π .

Dans une chaîne polymère, des atomes voisins possèdent entre eux 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 de 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.

II.1.2. Caractère semi-conducteur des matériaux organiques

Le caractère semi-conducteur organique provient de ses propriétés physiques. Il s'agit d'un solide moléculaire construit à partir de molécules conjuguées.

L'élément principal des matériaux organiques conjugués est le carbone. De ce fait il convient de détailler ses caractéristiques et son rôle dans un système conjugué. Le carbone est un élément de tableau périodique qui appartient à la classe des semi-conducteurs. Il possède

quatre électrons de valence. La configuration électronique de la couche externe de l'atome de carbone est ($1s^2 2s^2 2p^2$).

II.1.3. Les différents états électroniques de l'atome de carbone

a) Etat isolé : C'est l'état naturel décrit par la structure électronique fondamentale (Figure 2).

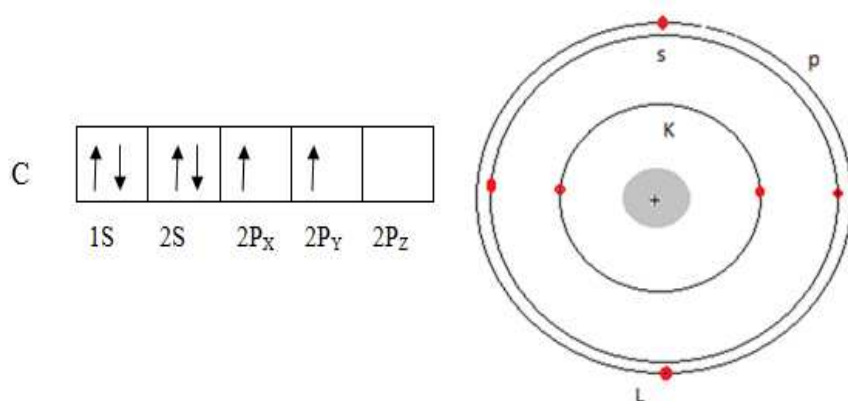


Figure 2 : schéma simple de l'état isolé d'atome de carbone.

Par exemple dans le cas de CO_2 l'atome de carbone est bivalent, mais comment expliquer l'existence d'une molécule de méthane CH_4 où l'atome de carbone semble tétravalent ?

Pour comprendre l'existence de la molécule CH_4 , il est nécessaire de faire l'hypothèse de l'existence d'un état excité intermédiaire de l'atome de carbone.

b) Etat excité : cet état correspond au passage d'un électron de la couche 2s à la couche 2p, la structure électronique résultante est : $1s^2 2s^1 2p^3$ (Figure 3).

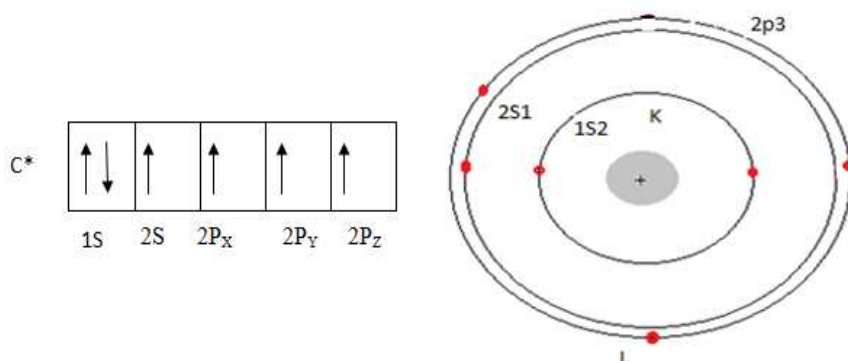


Figure 3 : schéma simplifié de l'état excité C^* de l'atome de carbone.

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 nouvelles orbitales hybridées. Parmi les différents types d'hybridation on trouve l'hybridation sp^3 , sp^2 et sp .

c) L'état hybridé SP^3 :

Pour la molécule comme le méthane CH_4 , l'atome de carbone apparaît tétravalent, les états atomiques de l'état excité précédant se présentent dans une configuration où les quatre électrons de la deuxième couche sont dans un état énergétique équivalent, l'électron unique de la sous-couche 2s et les trois électrons de sous-couche 2p sont réunis sur un même niveau $2sp^3$, dit hybridé parce qu'il résulte du mélange d'un niveau s à un électron et d'un niveau p à trois électrons, ($1s^2 2sp^3$) ; quatre électrons sont concernés par l'hybridation. On dit que l'atome de carbone est hybridé sp^3 (Figure 4).

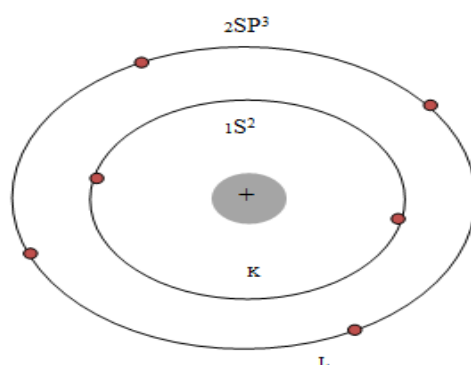


Figure 4: schéma simplifié de l'état hybridé de l'atome de carbone.

Les quatre orbitales sp^3 se recouvrent avec les quatre orbitales 1s des quatre atomes d'hydrogène ce qui conduit à la formation de quatre liaisons simples (σ_{C-H}), la figure ci-dessous illustre le diagramme énergétique de la molécule CH_4 .

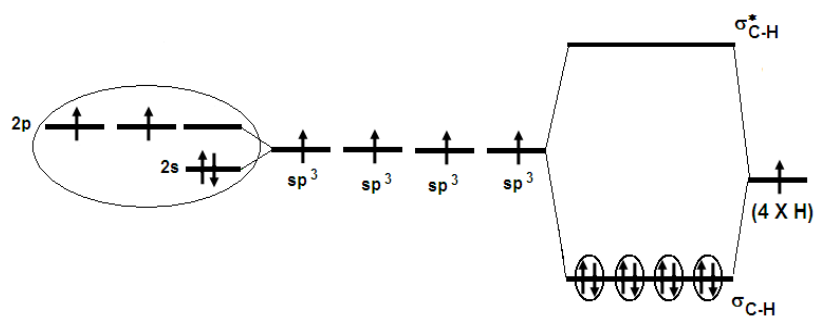


Figure 5 : diagramme énergétique de la molécule CH_4

L'atome de carbone se situe au centre d'un tétraèdre et les directions des liaisons avec ses voisins sont celles qui lient cet atome aux quatre sommets du tétraèdre. La distance C-H = 1,07 Å, ces quatre liaisons ont la même longueur et la même énergie, l'angle entre deux directions de liaison est de $109^{\circ}.28'$ comme illustré sur la figure 6.

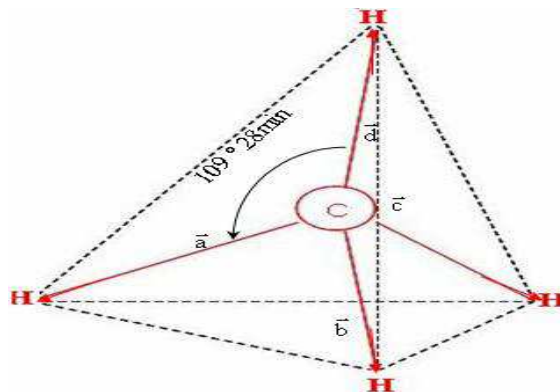


Figure 6 : structure tétraédrique de l'hybridation sp^3 . La longueur et l'angle entre liaison C-H dans la molécule CH_4 .

L'hybridation sp^2 et sp se fait de la même manière que l'hybridation sp^3 , à la différence d'un recouvrement des orbitales p et des orbitales s.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'hybridation sp^2 . En effet; c'est ce type d'hybridation qui 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 à la figure 7; dans le cas par exemple de la molécule d'éthylène C_2H_4 , qui 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 hybridées sp^2 formant une géométrie trigonale coplanaire.

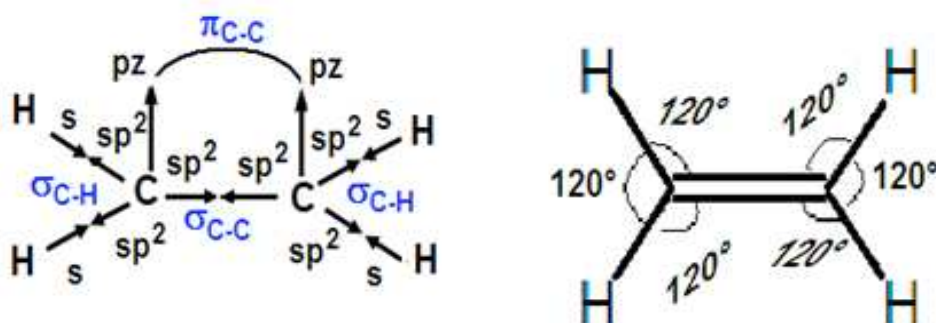


Figure 7 : l'angle de la molécule C_2H_4 .

Ainsi, après la formation de double liaison, l'atome de carbone est entouré de trois orbitales hybridées sp^2 et d'une orbitale $2p_z$ orientée perpendiculairement au plan des orbitales sp^2 . Chaque orbitale hybridée sp^2 pointe vers l'atome voisin et par recouvrement les orbitales de chacun des atomes forment une liaison covalente. La figure 8 illustre le diagramme énergétique de la molécule C_2H_4 . Toutefois, rappelons que l'atome de carbone possède 4 électrons de valence et les orbitales hybrides sp^2 ne forment des liaisons qu'avec trois voisines, 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 sp^2 qui sont au nombre de trois et qui contiennent chacune un électron forment par recouvrement axial les liaisons σ entre atomes de carbone.
- L'orbitale $2p_z$ perpendiculaire au plan des orbitales sp^2 qui contient un électron, le recouvrement latéral de cette orbitale forme la liaison π .

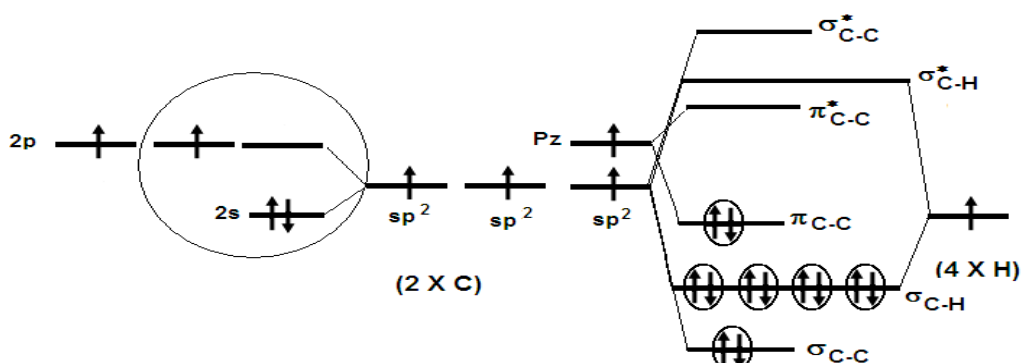


Figure 8 : diagramme énergétique de la molécule C_2H_4 .

L'utilisation des matériaux organiques conjugués comme matériaux de base pour la réalisation des transistors organiques est relativement nouveau. Ces matériaux caractérisent par des propriétés très différentes de celles des semi-conducteurs inorganiques classiques comme par exemple le silicium; pour cela il est important de comprendre leurs caractéristiques afin d'assurer leurs performances dans l'application des transistors organiques. Nous allons donc consacrer ce chapitre à l'étude des matériaux organiques.

II.2 Les polymères et les petites molécules

Il est habituel de distinguer deux catégories de matériaux organiques, selon la valeur de leur masse moléculaire : les polymères semi-conducteurs et les petites molécules qui ont tous les deux en commun une chaîne carbonée conjuguée. Quelques exemples sont donnés en figure 9.

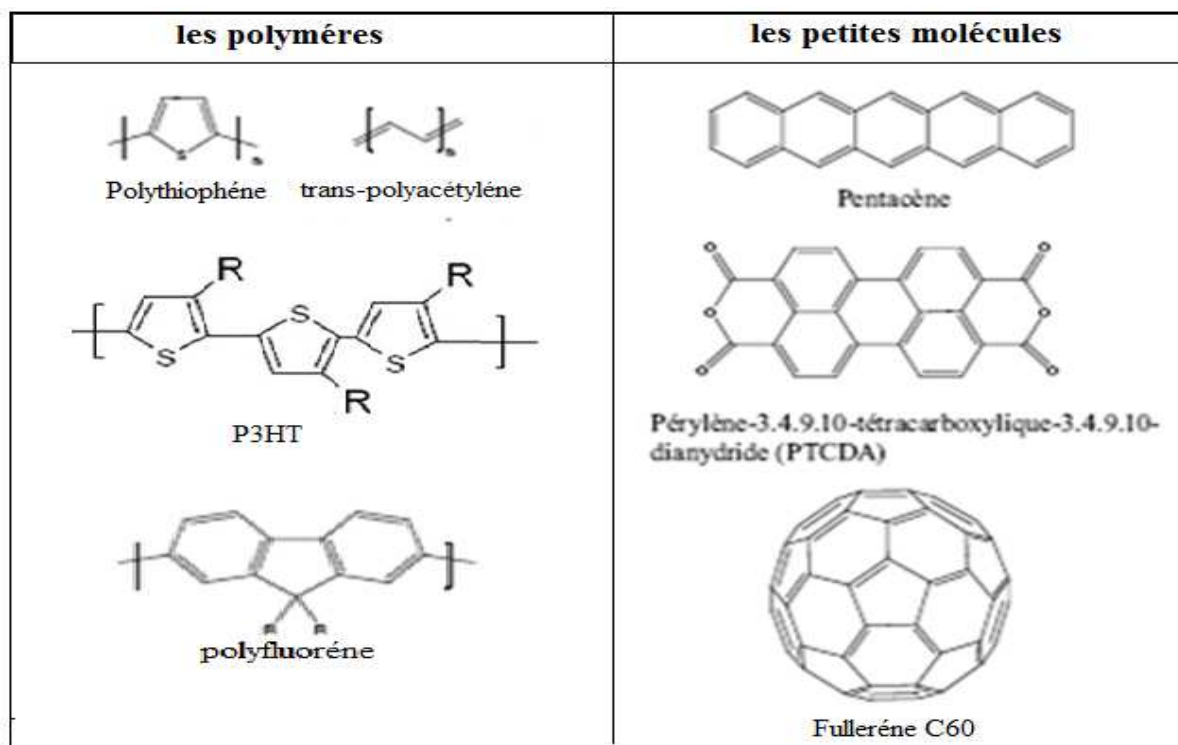


Figure 9: exemples des polymères et petites molécules.

Les petites molécules sont caractérisées par une masse moléculaire généralement inférieure à 1000g/mol et par l'enchaînement de quelques unités conjuguées [21]. Ce type de matériaux sont souvent évaporés thermiquement sous vide et présentent l'avantage de pouvoir s'organiser plus facilement que les polymères

Les polymères sont caractérisés par une chaîne macromoléculaire de masse moléculaire généralement supérieure à 5000g/mol et ont une bonne stabilité thermique [21], ils sont réputés pour leur aptitude à être facilement déposés à la tournette (spin coating) sur des grandes surfaces ; en contre partie, ils nécessitent l'usage de solvants, qui rendent délicate la réalisation de différentes structures et ils agissent comme des semi-conducteurs à gap direct.

Les polymères, de par leur grande masse moléculaire, sont principalement mis en œuvre par voie humide, c'est la présence de groupements alkyls sur la chaîne de polymère qui assure de la solubilité au matériau. En revanche ces groupements latéraux peuvent modifier la conformation des molécules et donc perturber les propriétés optoélectronique.

Les polymères sont constitués de longues chaînes moléculaires, elles-mêmes formées de molécules élémentaires (unités monomères) assemblées entre elles par le biais de liaisons chimiques covalentes. Tandis que les petites molécules ne sont formées que de quelques unités monomères. Ces chaînes sont principalement composées d'atomes de carbone sur lesquels sont fixés d'autres éléments tel que : l'oxygène, chlore, l'azote ou le fluor, peuvent encore intervenir dans la composition de la chaîne.

Il existe deux types de polymères :

- 1) Les homopolymères : ce sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité de répétition comme le polystyrène (PS).
- 2) Les copolymères : ils sont constitués de plusieurs unités différentes par exemple le polyéthylène téréphtalate (PET), qui est utilisé comme support pour la nouvelle technologie.

Tout monomère comporte au minimum deux sites réactifs (Figure 10)

Exemple : cas de l'éthylène

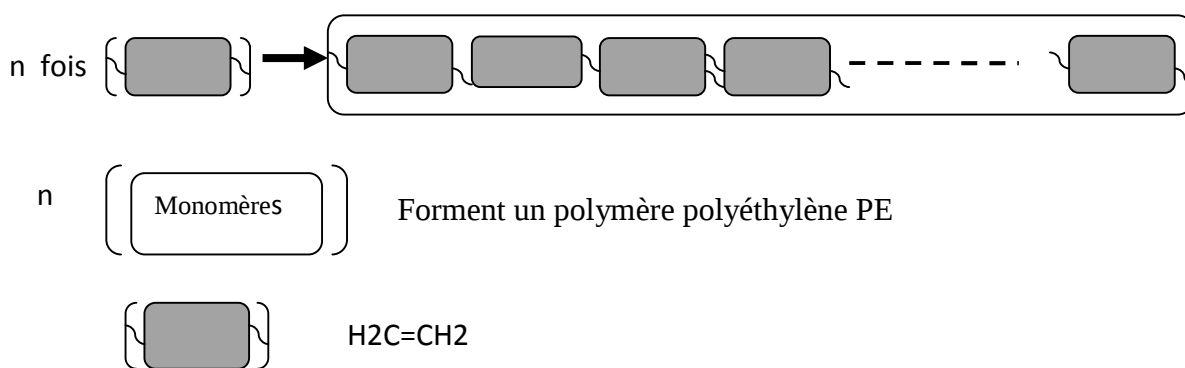


Figure 10: Formation d'un polymère à partir d'un monomère

La différence structurale et géométrique des polymères entraîne une différence marquante des propriétés physiques, mécaniques et optiques. Chaque polymère a des propriétés qui lui

sont propres. Les propriétés physiques et mécaniques (flexibilité, souplesse.....) des polymères sont conditionnées par:

- ✓ leurs masses.
- ✓ leurs structures.
- ✓ la température du milieu.

On peut les classer en trois catégories:

II.2.1. 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 de 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 antiliant σ^* ; l'énergie entre les niveaux étant de l'ordre de 6eV, ce gap d'énergie large explique le caractère isolant et la transparence dans le domaine visible de ces matériaux, les polymères saturés sont des isolants.

II.2.2. Les polymères conjugués (Semi-Conducteur)

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 similaire 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.

II.2.2.1 Origine de la conduction dans les polymères conjugués

Les atomes de carbone constituent l'essentiel du squelette des polymères. Dans leurs liaisons, seuls les électrons de l'unique orbitale s et des trois orbitales p ($2p_x$, $2p_y$, $2p_z$) interviennent.

Quand on associe deux atomes de carbone, leurs orbitales atomiques se recouvrent et forment des orbitales moléculaires. Ce phénomène s'appelle l'hybridation des orbitales moléculaires, c'est-à-dire, le regroupement en des niveaux énergétiques identiques de l'orbitale s et d'une, deux ou trois orbitales p, pour former des liaisons triples, doubles ou simples.

Les polymères conjugués sont formés d'une chaîne principale comportant une alternance de simples liaisons (σ) et doubles liaisons (σ et π). Les électrons de la liaison π sont beaucoup moins localisés que les électrons liés à la liaison σ . La molécule ainsi constituée possède un nuage d'électrons délocalisés et répartis le long de sa chaîne carbonée

Par conséquent, les polymères organiques conjugués présentent un caractère semi-conducteur ; celui-ci est associé à la délocalisation électronique dans leurs systèmes conjugués le long de la chaîne moléculaire.

D'un point de vue énergétique l'assemblage d'atomes, pour former une chaîne de polymères, se traduit par la formation de bandes d'énergie correspondant à des orbitales moléculaires liantes (π et σ) et anti-liantes (π^* et σ^*).

Les électrons π jouent un rôle majeur dans les systèmes conjugués puisque leur ionisation (éjection ou capture des électrons) est aisée. Au niveau moléculaire, les électrons peuvent être éjectés des plus hauts niveaux électroniques (π) occupés de la molécule (HOMO : highest Occupied Molecular Orbital) ou capturés dans les plus bas niveaux électroniques (π^*) inoccupés (LUMO : lowest unoccupied Molecular Orbital). En effet au fur et à mesure de l'allongement de la molécule, l'écart entre chacun des niveaux π (ou π^*) diminue, et la différence d'énergie entre les niveaux HOMO et LUMO diminue aussi.

A la limite de la chaîne infinie, les orbitales sont si proches qu'elles forment une bande d'énergie. On parle alors de bande de conduction (BC, ensemble des orbitales π^*) et de bande de valence (BV, ensemble des orbitales π) séparées par une bande interdite d'énergie E_G . Le modèle des bandes permet alors d'expliquer les propriétés originales des systèmes conjugués.

Deux composantes de la conduction sont distinguées:

La conduction intramoléculaire pour laquelle les charges sont conduites le long d'une même chaîne moléculaire. C'est le cas principalement des polymères conjugués qui assurent une conduction des porteurs le long de la chaîne principale dans le cas où la conjugaison n'est pas brisée.

La conduction intermoléculaire pour laquelle les charges passent d'une chaîne polymérique à une autre. Ce type de conduction est d'autant plus facile que l'on a des motifs conducteurs s'imbriquant facilement les uns dans les autres et que l'on n'a pas de conjugaison le long d'une même chaîne polymérique.

Pour que le polymère conjugué fonctionne comme semi-conducteur il faut que:

a) La liaison σ soit forte afin de maintenir la molécule intacte même en cas de présence d'un électron ou d'un trou dans la liaison π (état excité). En effet, un état excité affaiblit le lien π et la molécule se scinderait en absence de la liaison σ [22].

b) Les orbitales π des molécules voisines doivent se chevaucher afin de permettre le déplacement des électrons et des trous entre les molécules.

c) La bande interdite des polymères conjugués est généralement assez large : de l'ordre de 2,7eV [23] et de 3eV [24] pour le PPV et le PPP respectivement. Ces matériaux sont donc des isolants naturellement (semi-conducteurs large à gap). Cependant, un polymère peut devenir conducteur grâce à l'introduction de charges « dopage des polymères ».

II.2.2.2 La Structure électronique des polymères conjugués.

La structure électronique des polymères conjugués peut être décrite par un modèle de bandes, analogue à celui des semi-conducteurs inorganiques. En effet, les polymères sont constitués d'un grand nombre de motifs (monomères). Chaque motif possède des niveaux d'énergies discrets. L'ajout d'un grand nombre de ces motifs entraîne une hybridation des niveaux d'énergie conduisant à des états plus nombreux puis à des bandes d'énergie continues pour un nombre infini de motifs [25]. Dans le cas des polymères conjugués, lors de l'association de deux orbitales atomiques, une orbitale moléculaire est formée de deux niveaux d'énergie (π et π^*).

Dans le cas de la liaison π 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). Ce band gap confère le caractère semi-conducteur (Figure 11).

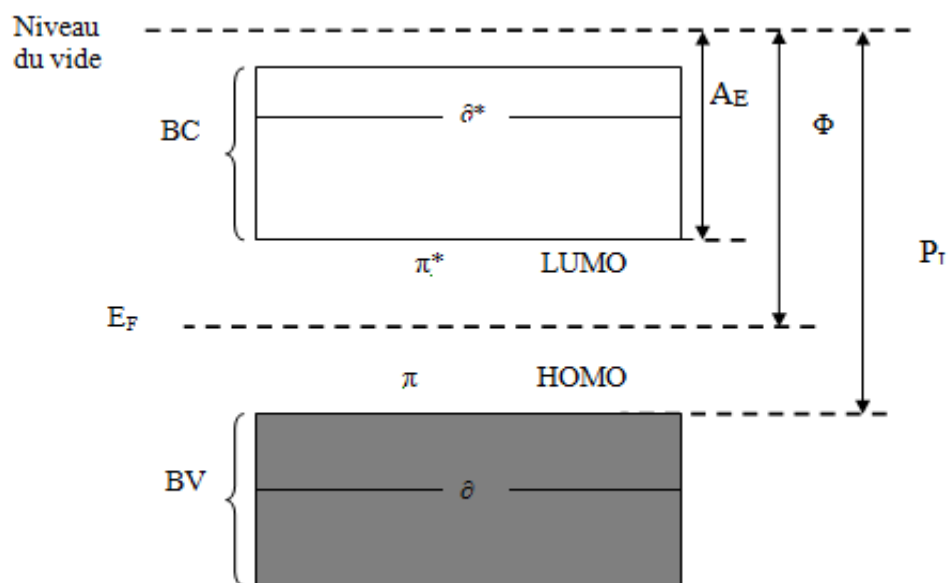


Figure 11: Structure de Bande d'énergie d'un polymère semi-conducteur conjugué [24]

La zone comprise entre la BV et la BC est appelée bande interdite <gap>, elle est caractérisée par sa largeur E_G , il n'y a pas de niveau permis dans cette bande. Elle peut aussi être décrite comme la différence entre le potentiel d'ionisation (P_I : énergie nécessaire pour céder un électron du plus haut état HOMO) et l'affinité électronique (A_E : énergie nécessaire pour l'acceptation d'un électron dans l'état le plus bas LUMO).

II.2.2.3 La longueur de conjugaison d'un polymère

Au niveau de la bande HOMO et LUMO les états d'énergie sont discrets mais d'autant plus proches que le nombre d'atomes constituant la molécule augmente, en plus l'augmentation du nombre de niveaux d'énergie contribue à la diminution du Gap entre le niveau HOMO et LUMO de la macromolécule en diminuant l'écart énergétique entre les liaisons liantes π et anti-liantes π^* de chaque molécule.

Les niveaux des orbitales moléculaires d'une macromolécule dépendent de sa longueur de conjugaison. C'est-à-dire du nombre de répétitions n du monomère (unité de répétition de base).

On peut indiquer de façon générale l'évolution du gap en fonction de la taille du système de molécule.

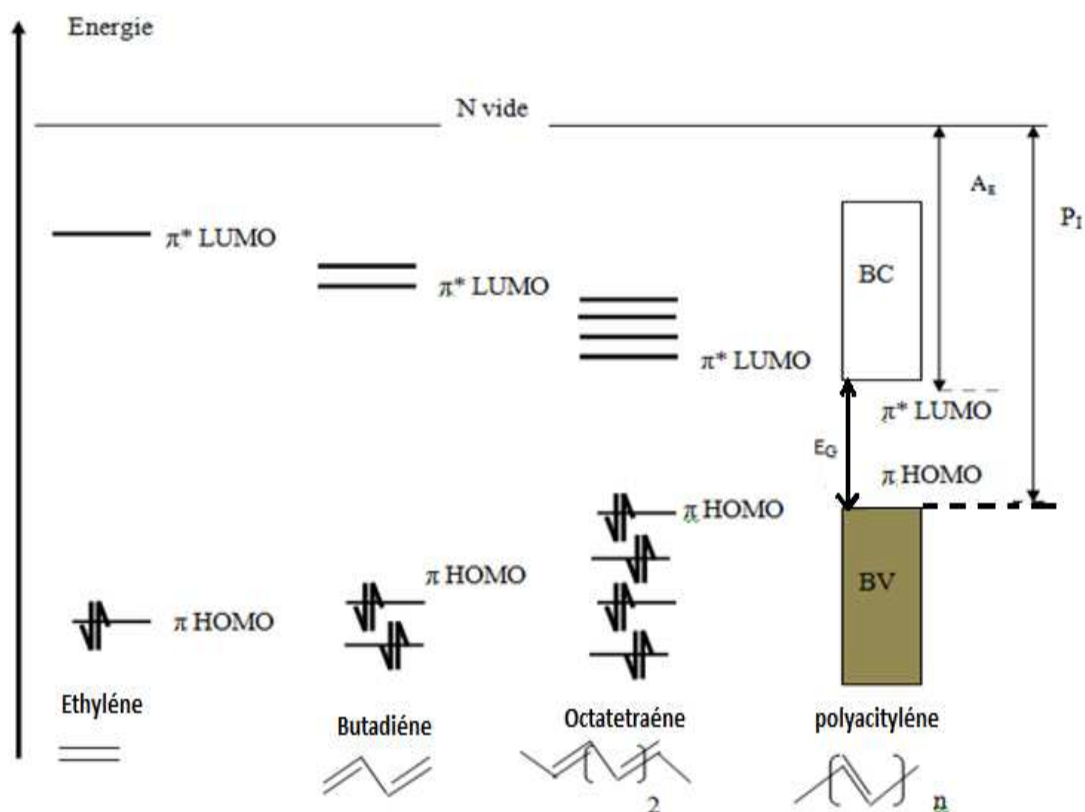


Figure 12 : diagramme d'énergie des orbitales moléculaires π et π^* en fonction de la longueur de la chaîne [26].

P_I : potentiel d'ionisation

A_E : affinité électronique

Avec l'augmentation de nombre d'unités monomères constituées la molécule, il devient impossible de différencier les niveaux d'énergies. A partir d'une suite discrète de niveaux, on passe à une situation où les niveaux sont assemblés en deux bandes d'énergies appelés : bande de valence (BV) qui regroupe les états HOMO, et la bande de conduction (BC) qui fusionne les états LUMO :

Ce caractère de bande d'énergie est similaire à celui des semi-conducteurs classiques.

Le tableau suivant représente la différence entre semi-conducteur inorganique et organique:

	semi-conducteurs inorganiques	semi-conducteurs organiques
Porteurs de charge	Les porteurs de charges sont des électrons et trous libres (délocalisés)	Les porteurs de charges sont des excitons liés (localisés)
Type de dopage	Dopage par injection d'impuretés	Dopage par réaction d'oxydoréduction ou par injection via un champ électrique
Mobilités de porteurs de charges	Forte mobilité de porteurs de charges ($\sim 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)	Faible mobilité de porteurs de charges ($\sim 6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)
La largeur du gap	Gap ≈ 0.7 à $1,5 \text{ eV}$	Gap entre $1,5$ à 3 eV [27]
Dépôt	substrat rigide (verre)	substrat souple
Résistance mécanique	Faible	Forte
Polarisation	Forte	Faible
Energie de liaison	Faible	Forte

Tableau1: La différence entre semi-conducteur inorganique et organique.

Le tableau ci-dessous représente quelques valeurs des bandes interdites de certains polymères conjugués.

Polymère semi-conducteur conjugué	Bande interdite (eV)
Pentacene	1,9-2,8
Poly (p-phénylène) (PPP)	3 [24]
Poly (p-phénylènevinylène) (PPV)	2 ,7 [23]
Poly [2-methoxy-5-(2-ethyl-hexyloxy)-1,4-phénylène vinylène] MEH-PPV	2,1[28]
Poly [2-methoxy-5-(3-7-ethyl-hexyloxy)-1,4-phénylène vinylène] MDMO-PPV	2,48
P3HT	1.67 [29]

Tableau 2: Valeurs des bandes interdites de certains polymères conjugués

II.2.3.Les polymères conducteurs

Pour obtenir un polymère conducteur on effectue une modification chimique de polymères semi-conducteurs 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), ou des accepteurs (dopage de type p) dans le matériau par substitution des atomes d'origines. Du fait de la rigidité du réseau cristallin le diagramme des bandes du matériau n'est pas modifié et le dopage n ou p revient à introduire dans le bas de la bande de conduction (ou le haut de la bande de valence) un niveau délocalisé comme le montre la figure 13.

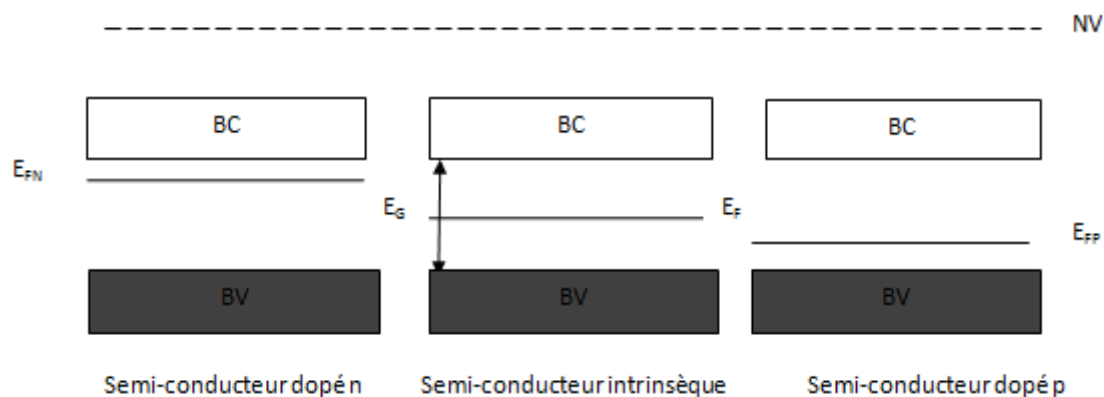


Figure 13: dopage de semi-conducteur inorganique

En revanche, le dopage des polymères conjugués consiste en une réaction d'oxydoréduction du polymère. Celle-ci peut être effectuée soit par voie électrochimique, soit par exposition 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 (Figure14). Cette situation est différente du cas classique d'un schéma de bandes rigides.

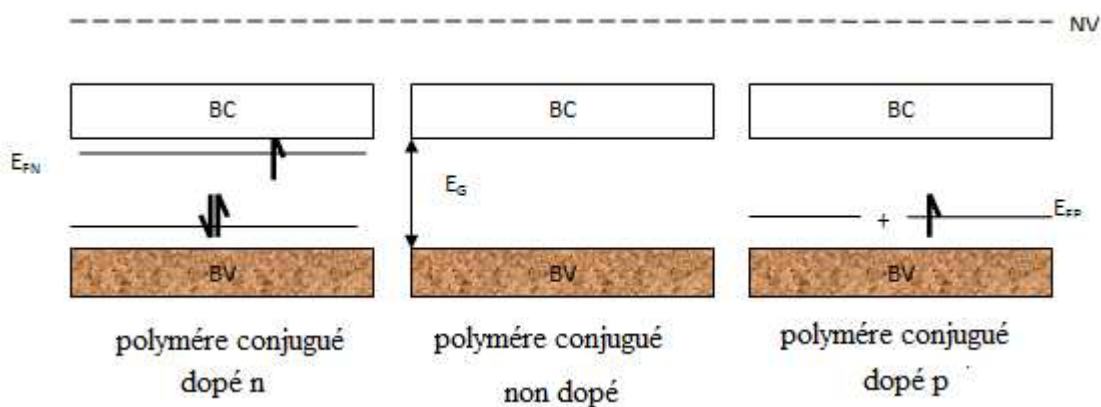


Figure 14: dopage des polymères conjugués

Il existe différentes méthodes de dopage:

- Dopage chimique,
- Dopage électrochimique
- dopage par implantation ionique

➤ **Dopage chimique:**

Doper un polymère consiste à donner (réduire) à celui-ci ou extraire (oxyder) de celui-ci des électrons au matériau à doper. Ce mécanisme entraîne la modification de la structure de la molécule (géométrie) et même les propriétés électriques et optiques des polymères.

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 [30].

➤ **Dopage électrochimique:**

Ici, le polymère à doper est placé sur une électrode métallique et plongé dans une solution organique. L'application d'une tension entre cette électrode et l'électrode de référence (Li, Pt), entraîne par passage du courant, l'ionisation du polymère et par conséquent, son dopage.

Ce type de dopage est plus homogène et plus facilement contrôlable que le dopage chimique. De plus, il peut permettre le dépôt d'un film mince de polymère dopé ou non sur une électrode métallique.

➤ **Dopage par implantation ionique :**

Il s'agit de bombarder les films de polymères par des ions alcalins (Na^+ , Cs^+ ...) et de générer ainsi, des défauts par rupture des liaisons chimiques. Cette technique est peu utilisée car coûteuse et destructive.

II.3.Mécanisme de conduction dans les polymères conjugués

Lors du processus de dopage, l'introduction de porteurs de charges modifie localement l'alternance des simples et doubles liaisons. Sous certaines conditions ces quasi-particules peuvent se déplacer librement dans les matériaux polymères sous forme de polaron et bipolaron lorsqu'il s'agit d'un polymère constitué de cycles benzéniques ou d'un soliton dans le polyacétylène.

1) Les polarons et bipolarons

Le polaron est une charge positive ou négative, unique résulte d'une déformation locale de la chaîne polymère qui passe de la forme aromatique à la forme quinonique. Le polaron est localisé sur un nombre fini d'unités de répétition. Il présente une relation spin-charge différente de celle du soliton; il est à la fois un porteur de charge (valeur $+e$ ou $-e$) et un porteur de spin (valeur $\frac{1}{2}$). Le déplacement des polarons le long de la chaîne polymère contribue au transport électronique dans les matériaux. En enlevant (ou rajoutant) un électron supplémentaire au polaron existant, une nouvelle espèce peut se créer, le bipolaron dans lequel deux charges sont arrangées dans la même déformation locale de la chaîne. Le bipolaron possède un spin nul. Un exemple de dopage P du poly-thiophène est représenté dans la figure ci-dessous [31].

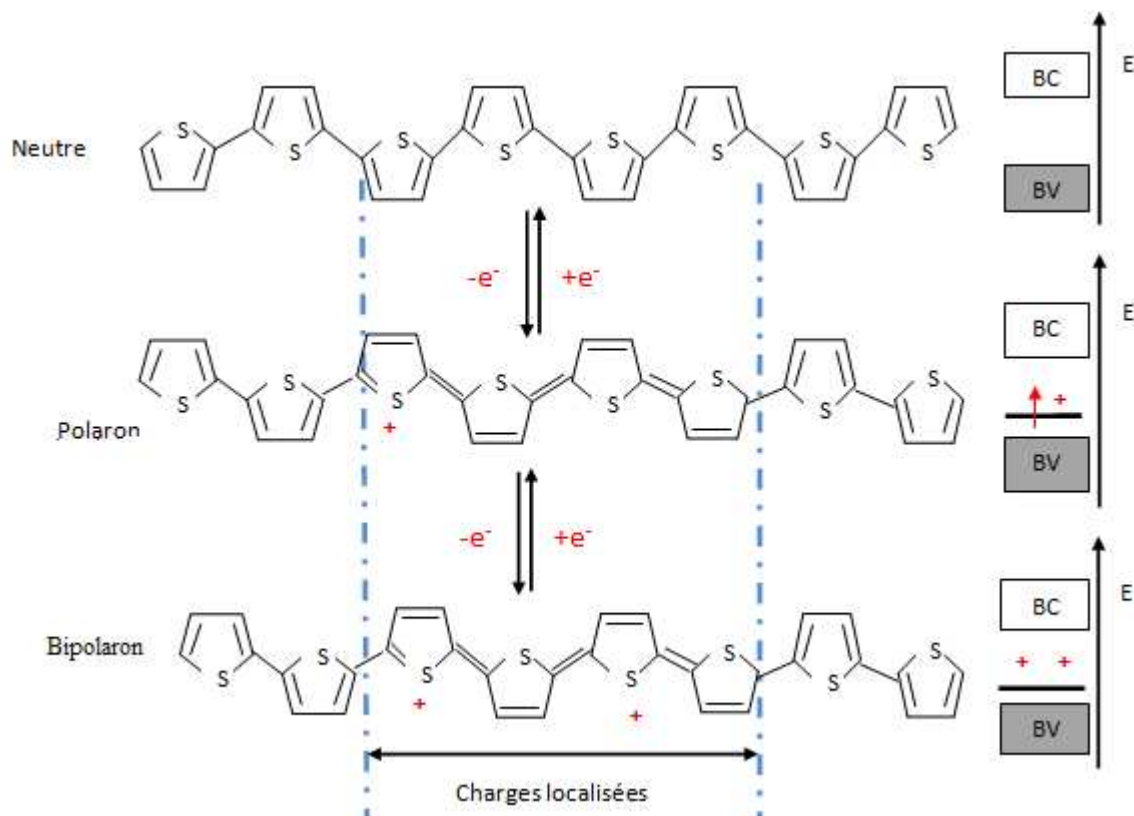


Figure 15: Evaluation de la structure au cours du dopage du poly-thiophène

2) Les solitons

Lors de l'opération du dopage des matériaux à l'état fondamental dégénéré (cas du trans-poly-acétylène) il apparaît un porteur de charge appelé « soliton chargé ». Le soliton se présente comme un défaut séparant deux parties de la chaîne présentant une phase inverse de l'alternance des doubles et simples liaisons. Les solitons présentent une relation spin-charge différente de celle des polarons. Le soliton chargé possède une charge q mais un spin nul ($S=0$) alors qu'un soliton neutre ($q=0$) possède un spin $S=1/2$. A fort taux du dopage les solitons peuvent former une bande de solitons. Dans ces systèmes, les solitons chargés assurent le transport électronique.

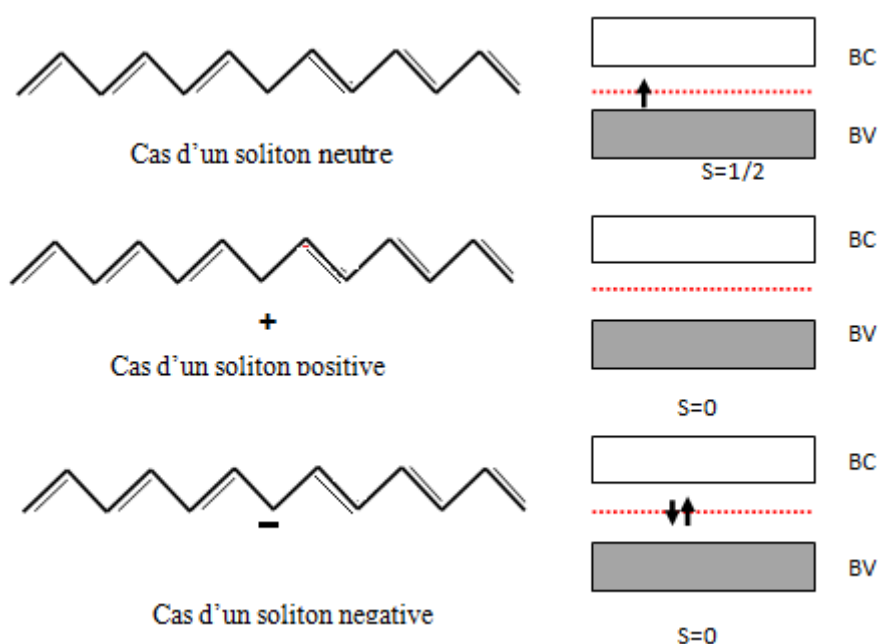


Figure 16: mécanisme de dopage avec des solitons pour le trans-poly-acétylène

II.4. Transport de charges dans les polymères conjugués

Le transport de charges dans les matériaux Semi-conducteurs organiques se fait principalement selon un mécanisme par sauts successifs ou «hopping» entre états localisés. Le modèle de transport cohérent observé dans les Semi-conducteurs inorganiques et les métaux n'est que très rarement observé dans les SCO du fait des nombreux défauts de conjugaison présents et du fort couplage électron-phonon.

Les polymères conjugués (semi-conducteur conjugué) diffèrent des semi-conducteurs classiques par la nature de porteurs de charge, qui ne sont pas des électrons et des trous délocalisés. Ils sont des défauts chargés localisés appelés polarons, bipolarons ou solitons.

La structure d'un semi-conducteur peut être parfaitement ordonnée pour un matériau inorganique ou désordonnée pour un matériau organique. Dans ce dernier, le porteur de charge est localisé par le désordre. Il doit être activé par l'agitation thermique pour pouvoir être transféré par un saut sur le prochain site moléculaire. C'est pourquoi on parle dans ce cas de transport activé par saut ou hopping. Le terme hopping en fait est le franchissement des barrières de potentiel par effet tunnel, assisté par des phonons ; ce processus peut être limité par deux facteurs :

- La distance séparant les deux sites R .
- L'écart énergétique entre les deux sites $\Delta E = E_i - E_j$.

Le saut du porteur de charge d'un site localisé à un autre se fait en trois étapes :

- L'agitation thermique fait vibrer la charge autour de sa position d'équilibre.
- Le site de départ doit être au même niveau d'énergie que le site final.
- Passage de porteur de charge au site final par effet tunnel lorsque les deux niveaux coïncident.

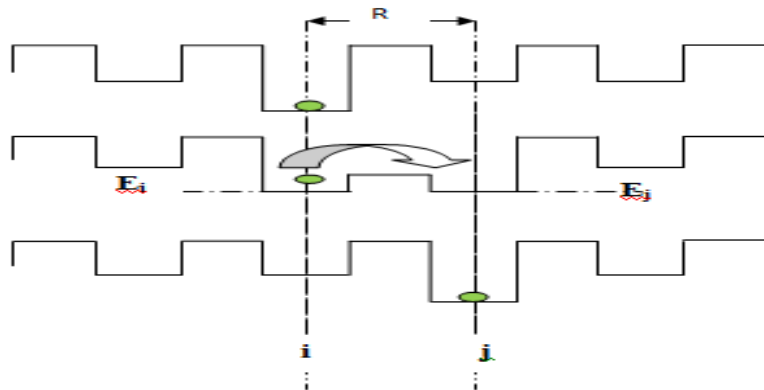


Figure17 : mécanisme de transport par saut (hopping)

La vitesse de saut site inter-sites est donnée par [8] :

$$\gamma = \gamma_0 f(E_i) [1 - f(E_j)] \exp \left[\frac{E_i - E_j}{kT} \right] \exp \left[\frac{-2R_{ij}}{a} \right] \dots \dots \dots (II.1)$$

$f(E_i)$: probabilité d'avoir une charge dans le site i

$[1 - f(E_j)]$: probabilité de n'avoir aucune charge dans le site j

$\exp\left[\frac{E_i - E_j}{kT}\right]$: Probabilité de passer de i vers j

γ_0 : Constante représentant le couplage charge-phonon et la densité d'états des phonons [8].

Dans les matériaux Semi-conducteurs organiques conjugués on rencontre principalement deux types de transport :

- Transport intramoléculaire ;
- Transport intermoléculaire.

- Le transport intramoléculaire (ou intra chaîne) se fait le long d'une même chaîne polymère conjugué. Du fait de l'existence de défauts structuraux (torsions ; ruptures de doubles liaisons, repliement de la chaîne...). Ce transport intramoléculaire n'est pas suffisant pour permettre le déplacement des charges sur des distances macroscopiques.

- Le transport intermoléculaire (ou inter chaîne) permet aux charges de passer d'une molécule à l'autre. Ce mécanisme est lié au couplage entre orbitales pi de deux chaînes voisines et est étroitement dépendant de l'organisation des chaînes macromoléculaires les unes par rapport aux autres. Les polymères étant généralement amorphes ou semi-cristallins [21], la mobilité des charges est généralement limitée par ce transport inter chaîne [32].

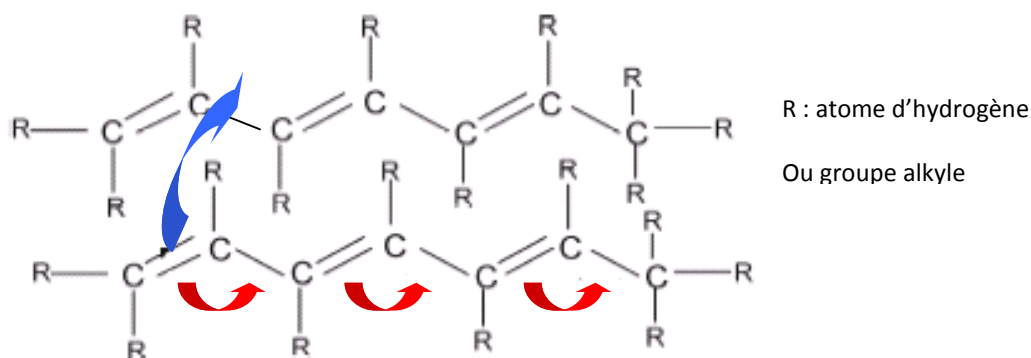


Figure 18: transport dans les polymères conjugués.

Le transport de charge est caractérisé par une grandeur macroscopique : la mobilité de charges. Cette mobilité de charges est une propriété particulière des porteurs de charges, définie comme étant le rapport entre la vitesse v et le champ électrique E .

Les mobilités de charges dans les polymères Semi-conducteurs sont très inférieures à celles dans le silicium ($1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) et sont généralement plus faibles que celles mesurées dans les Semi-conducteurs moléculaires ($\approx 1\text{-}15 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) [33]

II.5. Propriétés des polymères conjugués

Par analogie aux matériaux inorganiques, on distingue deux classes des matériaux SCO:

Les matériaux à caractère donneur d'électrons et les matériaux à caractère accepteur d'électrons. On définit le caractère donneur ou accepteur d'un matériau en comparaison des positionnements relatifs des niveaux HOMO et LUMO de chacun de ces matériaux, comme indiqué sur la figure 19. Le matériau donneur d'électrons est celui qui possède le plus faible potentiel d'ionisation (différence entre le niveau HOMO et le niveau du vide P_I). Le matériau accepteur d'électrons est celui qui présente la plus forte affinité électronique (différence entre le niveau LUMO et le niveau du vide A_{SC}).

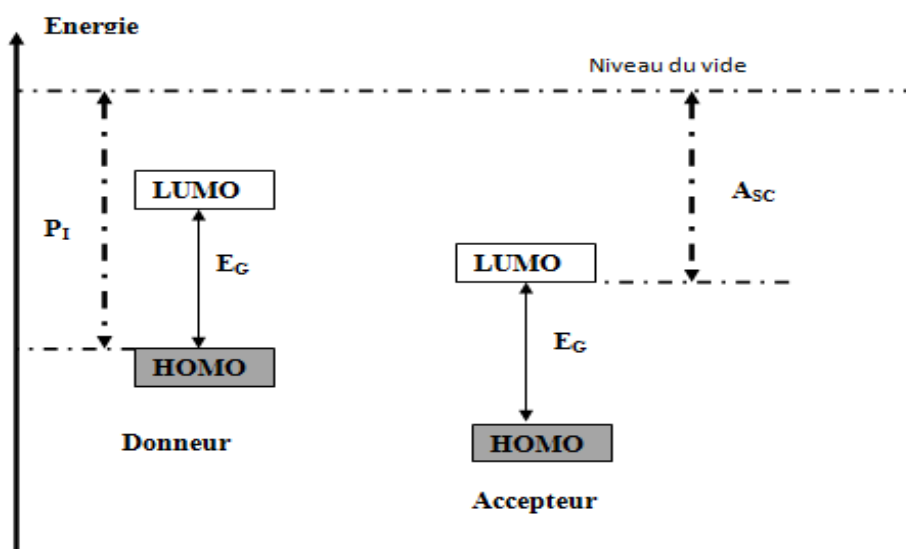


Figure 19: diagramme énergétique d'un matériau semi-conducteur donneur et accepteur d'électrons

II.6. Caractéristiques requises des polymères

Les polymères conjugués ne sont pas tous de bons candidats pour des applications en électronique organique. Effectivement, les polymères doivent posséder quelques caractéristiques primordiales. Tout d'abord, ces polymères doivent être solubles dans les solvants usuels pour pouvoir être mis en œuvre facilement. De plus, les polymères doivent être stables à l'air, ils doivent aussi posséder une oxydation réversible pour que le dispositif

puisse avoir un long temps de vie active. De plus, une bonne mobilité de charge ainsi qu'un bon rapport de courant lorsque le transistor est ouvert ou fermé sont nécessaires pour que le polymère soit un bon candidat à appliquer dans les transistors organiques.

En résumé, pour avoir un bon candidat pour des transistors organiques à effet de champ, il faut avoir un polymère stable à l'air, soluble et préféablement plan pour avoir de bons empilements des plans π . En ayant ces caractéristiques, de bonnes mobilités devraient être atteignables.

II.7. Application des polymères π -conjugués

L'utilisation des polymères π -conjugués en électronique organique provient d'une découverte faite dans les années 1970. En effet, auparavant, les polymères étaient perçus comme n'étant que des matériaux isolants ayant de bonnes propriétés mécaniques et présentant un coût de fabrication très faible. En 1977, les travaux des professeurs MacDiarmid, Shirakawa et Heeger ont démontré que lorsqu'on dope un polymère-conjugué (poly-acétylène), il devient un matériau conducteur. Cette découverte démontrant la possibilité de combiner les propriétés des plastiques (isolants) à celles des métaux, la conductivité électronique du polymère pouvait être augmentée de plusieurs ordres de grandeur et atteindre un régime métallique. Les polymères-conjugués ont été intensivement étudiés pour des applications en microélectronique. Depuis ce jour, un nouveau domaine d'étude a pris sa place soit celui de l'électronique plastique

Il y a trois principales applications pour les polymères- π -conjugués en électronique organique:

- Réalisation des cellules solaires,
- Des diodes électroluminescentes et OLED,
- Des transistors organiques à effet de champ.

A l'inverse de l'électronique classique, ce nouveau domaine permet d'obtenir des dispositifs qui sont légers, flexibles et moins coûteux à fabriquer ce qui représente un net avantage. Généralement, les performances des dispositifs organiques ne sont pas aussi bonnes que leurs analogues inorganiques, mais le domaine de l'électronique organique est récent et nécessite encore beaucoup de recherche pour arriver à égaler le domaine inorganique. Certaines applications de hautes performances restent inatteignables pour l'électronique organique. Par

contre, dans les applications demandant des performances moins élevées il est possible d'utiliser des semi-conducteurs organiques conjugués.

Conclusion

Nous avons conclu que les matériaux organiques (polymères et petites molécules) présentent la possibilité d'être déposés en couches minces par différents procédés de fabrication de la microélectronique, dans des conditions de faible coût afin de réaliser des dispositifs électroniques et optoélectroniques (diodes, cellules solaires, transistors..... etc.)

Les matériaux organiques conjugués présentent une alternance de simples et doubles liaisons, une condition nécessaire et importante qui conduit à un faible gap d'énergie dans les systèmes délocalisés, leur découverte offrent des nouvelles perspectives dans le domaine de l'électronique plastique, ils sont utilisés comme couche active dans les transistors organiques



à ef

fet de champ qui

est l'objectif de notre travail.

Introduction

Beaucoup de laboratoires ont menés des recherches sur des transistors utilisant des matériaux organiques semi-conducteurs. Contrairement aux semi-conducteurs minéraux classiques, les semi-conducteurs organiques peuvent être déposés sous forme de couches minces selon différentes techniques, qui coûtent moins cher et sur des supports flexibles.

Ces transistors présentent un grand intérêt en raison notamment de leurs vastes champs d'application: circuits intégrés (logique et analogique), dispositifs pour l'affichage (écrans plats), circuits de commandes.....etc.

Dans ce chapitre, nous présentons les transistors organiques à effet de champ, Nous exposons; en premier lieu, les différentes géométries des transistors organiques, puis nous présentons les procédures de dépôt et de caractérisation des différents matériaux utilisés dans les OFETs, isolants de grille, matériaux organiques semi-conducteurs ainsi que les électrodes.

III.1.Présentation d'un transistor organique à effet de champ

Les transistors organiques à effet de champ connaissent un envol remarquable pour leurs applications potentielles dans l'électronique de demain. Ces dispositifs utilisent comme éléments actifs des semi-conducteurs organiques «plastiques», c'est-à-dire à base de carbone et d'hydrogène. Parmi les avantages de ces matériaux par rapport aux transistors classiques à base de silicium on peut citer, la flexibilité, la légèreté et la transparence.

Un transistor organique à effet de champ OFET (Organic Field Effect Transistor), a la possibilité d'utiliser l'effet du champ électrique pour contrôler la densité de porteurs de charges dans le dispositif et ainsi l'intensité du courant qui le traverse. Il est constitué de plusieurs éléments essentiels qui sont les suivants :

- ✓ Le substrat (support) sur lequel le transistor sera fabriqué et utilisé.
- ✓ Le semi-conducteur est le cœur du transistor. Celui qui définira les propriétés électroniques du transistor, étant le siège du transport de charges dans le canal de conduction.
- ✓ la source à partir de laquelle proviennent les charges qui seront transportées par la couche active.
- ✓ Le drain sur lequel est appliquée une tension qui permet de déplacer les charges dans le canal semi-conducteur.

- ✓ La grille est l'électrode de base, permet de polariser le semi-conducteur afin de rendre possible le transport de charges. La polarisation se fait en appliquant une tension appropriée entre la grille et la source, créant ainsi un champ électrique responsable de l'appellation "transistor à effet de champ". Entre la grille et le semi-conducteur se trouve l'isolant de grille qui permet d'empêcher le passage du courant.

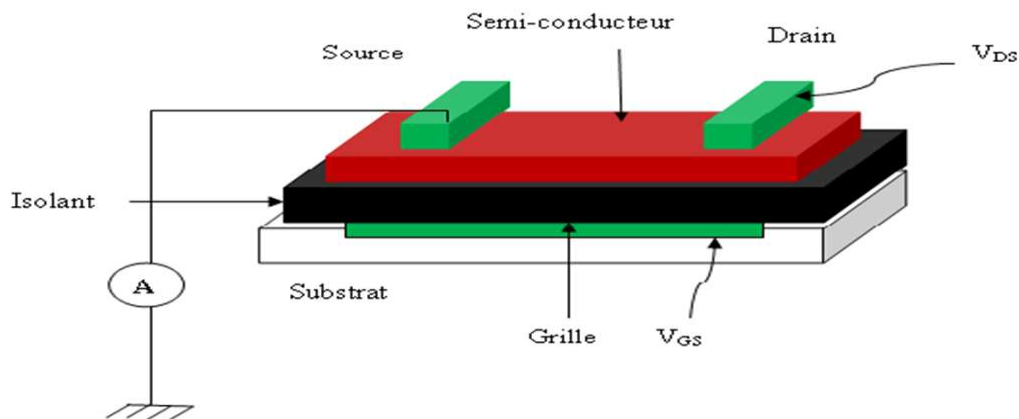


Figure 1: schéma d'un transistor organique à effet de champ [34].

En effet un transistor organique à effet de champ (OFET) est constitué de trois électrodes conductrices source (S), drain (D), grille (G), d'un isolant et un semi-conducteur.

III.1.1. Différentes géométries des transistors organiques

Plusieurs géométries de transistors organiques sont envisagées. La figure 2 montre les quatre architectures de base utilisant un empilement « classique » des différentes couches d'un transistor. On les classifie comme grille basse (Bottom-Gate) ou grille haute (Top-Gate) selon que la grille soit respectivement au-dessous ou au-dessus du semi-conducteur, et contacts au-dessus (Top-Contact) ou contacts au-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. Dans 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 (OTFT), la grille est au-dessous « Bottom-Gate » alors que dans un MOSFET, elle est au-dessus « Top-Gate ». De plus les électrodes source et drain sont de type métallique (ou 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 [35].

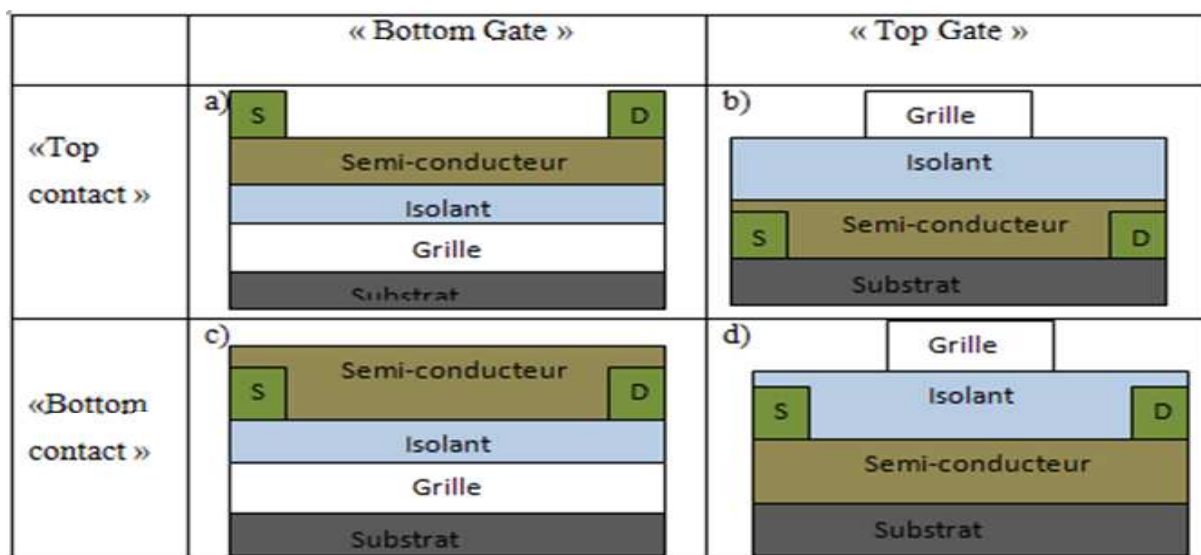


Figure 2: Structure d'un transistor organique en différentes géométries[35]

Chaque géométrie présente des avantages et des inconvénients, comme illustre dans le tableau 1:

	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 du diélectrique Traitements 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 du dépôt du diélectrique
Bottom Gate Top Contact	Meilleur contact électrode/semi-conducteur organique	Traitements 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 1 : récapitulatif des avantages et des inconvénients de chaque géométrie

Donc il n'y a que deux configurations beaucoup utilisées pour fabriquer des transistors organiques en couches minces: les contacts sont déposés en haut ou en bas selon la position du semi-conducteur. Dans les deux cas, le dispositif comporte trois électrodes: la source et le drain sont généralement faits de métal ainsi que l'électrode de grille. Les deux configurations comportent aussi une couche isolante, et une couche active composée du polymère conjugué, l'électrode grille est déposée sur un substrat de verre (rigide), ou plastique (souple). Dans le cas d'un transistor en géométrie Top-Contact, la couche active est déposée en première position, ensuite, les contacts source et drain. Pour ce qui est du transistor avec contact par le bas (Bottom-Contact), la source et le drain sont déposés en première position, puis la couche active en dernière position (Figure 3).

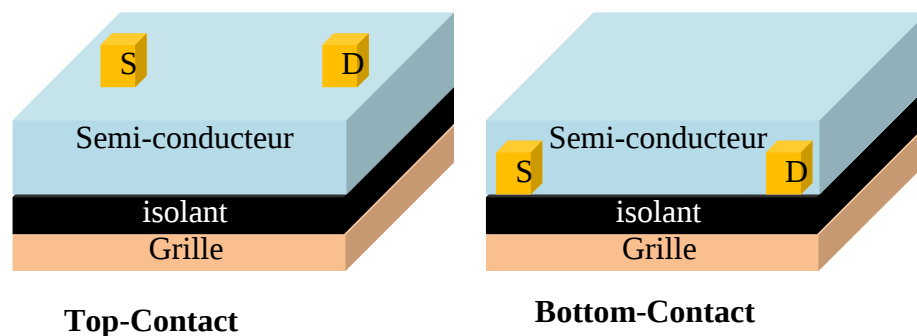


Figure 3: Géométries des transistors en Top-Contact et Bottom-Contact [34].

III.1.2. Comparaison entre les transistors organiques et les transistors inorganiques

Les transistors à effet de champ sont des dispositifs qui sont largement utilisés dans le monde de l'électronique actuel, la plupart 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 soit sous sa forme amorphe dans des applications qui demandent de faibles performances. La mobilité de charge est le paramètre essentiel pour caractériser les transistors à effet de champ, elle est définie par la vitesse à laquelle les charges circulent dans le dispositif électronique. Dans le cas du silicium à structure cristallin, les mobilités varient entre 300 et 1000 cm²/V.s, elles sont beaucoup faibles dans le silicium à structure amorphe,

En effet les transistors inorganiques classiques disposent de bonnes performances, mais ils comportent certains désavantages 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- π -conjugués possèdent déjà des mobilités intéressantes et de nets avantages sur les dispositifs inorganiques, c'est pourquoi l'étude de nouveaux polymères pour des applications en TOEC a connu une progression inimaginable au cours des dernières années. Le transistor à effet de champ organique se distingue du transistor 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, ils injectent (source) ou extraient (drain) facilement les charges du canal dans l'organique. Il n'y a plus de jonction PN à la source et au drain comme dans les MOSFETs ; il en résulte que l'accroissement du courant peut alors se produire très facilement dans le régime d'accumulation et non plus 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 TFT, 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 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), seule 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). Par conséquent ; les 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 de porteurs minoritaires entre la source et le drain à l'interface de l'oxyde de grille. Au contraire, dans l'OTFT le canal conducteur est constitué par une couche de matériau organique dont on améliore la conductivité par accumulation de charges à l'interface entre l'isolant 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.

III.2.Principe de fonctionnement des OTFTs

Les transistors organiques (OFET) ou MISFETs (Métal-Isolant-Semi-conductor-Field-Effect-Transistor) sont basés, pour la plupart, sur le principe du transistor à couche mince appelé thin film transistor (TFT) assez similaires au MOSFET (Metal-Oxyde-Semi-conducteur-Field-Effect-Transistor) en silicium amorphe qui est utilisé en microélectronique inorganique.

Le fonctionnement d'un TOEC est relativement simple. Quand il n'y a aucun potentiel d'appliquer à la grille, il n'y a qu'un courant très faible entre la source et le drain. Si un potentiel négatif est appliqué à la grille, il y a une formation de charges positives à l'interface semi-conducteur/diélectrique ce qui donne un transistor de type p. Si le potentiel appliqué à la grille est positif, il y a formation de charges négatives à l'interface, ce qui donne un transistor de type n.

Dans les deux cas, lorsque le potentiel appliqué à la grille atteint un potentiel de seuil, les charges deviennent mobiles et circulent entre la source et le drain. À ce moment, le transistor est ouvert. Les charges qui se forment à l'interface semi-conducteur/diélectrique circuleront à une vitesse qui dépend de l'efficacité du semi-conducteur organique.

Le principe de l'OFET repose sur le fait qu'un courant circule entre les deux électrodes source et drain. L'intensité du courant est modulée par la troisième électrode(G).

À la différence du MOSFET inorganique qui fonctionne en régime d'inversion de porteurs minoritaires, le transistor organique à effet de champ fonctionne en régime d'accumulation de porteurs majoritaires. Ces porteurs peuvent être préférentiellement des trous, on parle alors de transistor à canal p, ou des électrons, on parle alors de transistor à canal n. Comme dans le cas du transistor MOSFET inorganique, lorsqu'aucune polarisation n'est appliquée entre la source et le drain, le transistor peut être considéré comme une capacité MIS.

La caractérisation de la capacité MIS s'effectue à partir de la structure du transistor en court-circuitant à la masse toutes les alimentations des électrodes à l'exception de celle de grille.

III.2.1.Capacité MIS

On considère un semi-conducteur organique conduisant à un transistor à canal p. Avec un tel semi-conducteur, lorsqu'une capacité MIS est polarisée négativement, des trous s'accumulent à l'interface isolant-semi-conducteur. La capacité est en régime d'accumulation (Figure 4 (a)). Le nombre de charges accumulées va alors dépendre de la capacité de l'isolant et du potentiel appliqué sur l'électrode de la grille. Lorsqu'une polarisation inverse est appliquée, c'est-à-dire une polarisation positive, la capacité est en régime de déplétion (Figure 4 (b)), l'interface entre l'isolant et le semi-conducteur va au contraire se dépeupler de trous

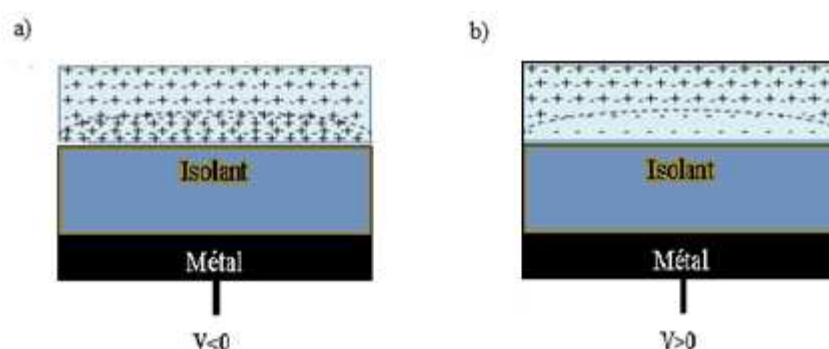


Figure 4 : Structure de la capacité MIS [36]

a) Régime d'accumulation b) régime de déplétion

Au contraire, si on considère un semi-conducteur conduisant à un transistor à canal n, le régime d'accumulation aura lieu pour une polarisation positive, tandis que le régime de déplétion va s'établir dans une polarisation négative.

Les porteurs de charges majoritaires dépendront du type de semi-conducteur utilisé. Ce seront des trous dans le cas d'un semi-conducteur de type-p (charges positives), et des électrons dans le cas d'un semi-conducteur de type-n (charges négatives), mais la majorité des semi-conducteurs organiques présentent un comportement de type p (les porteurs libres sont des trous positifs).

III.2.2.Diagrammes de bandes

A la différence de leurs homologues inorganiques, on ne parlera pas de bande de valence et de bande de conduction dans un semi-conducteur organique mais de HOMO

(HighestOccupiedMolecular Orbital) qui correspond au sommet de la bande d'énergie des orbitales π liantes et de LUMO (LowestUnoccupiedMolecular Orbital) qui correspond au bas de la bande d'énergie des orbitales π^* anti-liantes.

Lorsqu'un potentiel est appliqué sur la grille, sous l'effet de champ électrique ainsi créé, les niveaux HOMO et LUMO du semi-conducteur (p) vont se décaler vers les plus hautes énergies si cette polarisation est négative (accumulation) et vers les plus basses énergies si cette polarisation est positive (déplétion) (Figure 5). Alors on peut distinguer deux modes de fonctionnement en fonction de la polarisation de grille :

- grille polarisée négativement ($V_{GS} < 0$) mode d'accumulation
- grille polarisée positivement ($V_{GS} > 0$) mode de déplétion

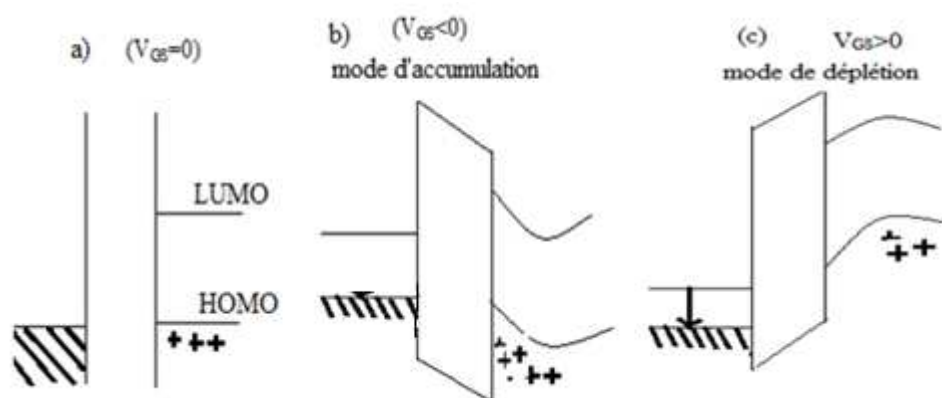


Figure 5: Diagramme de bandes d'énergie d'un transistor organique de type p : (a) régime de bande plate, (b) régime d'accumulation, (c) régime de déplétion [37].

Pour un OFET de type n, 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.

III.3. Régime 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 ci-dessous illustre le diagramme simplifié des niveaux d'énergies électroniques avec et sans polarisation. Les

parties (b) et (c) montrent les positions des bandes HOMO et LUMO du semi-conducteur relativement au niveau de Fermi de la source et le drain après polarisation de la grille.

En première approximation, pour avoir une injection de charges efficace, le niveau de Fermi du métal constituant les électrodes source et drain doit être au même niveau que la HOMO du semi-conducteur pour un transistor à canal p et au niveau de la LUMO pour un transistor à canal n. En réalité, ces niveaux sont toujours décalés

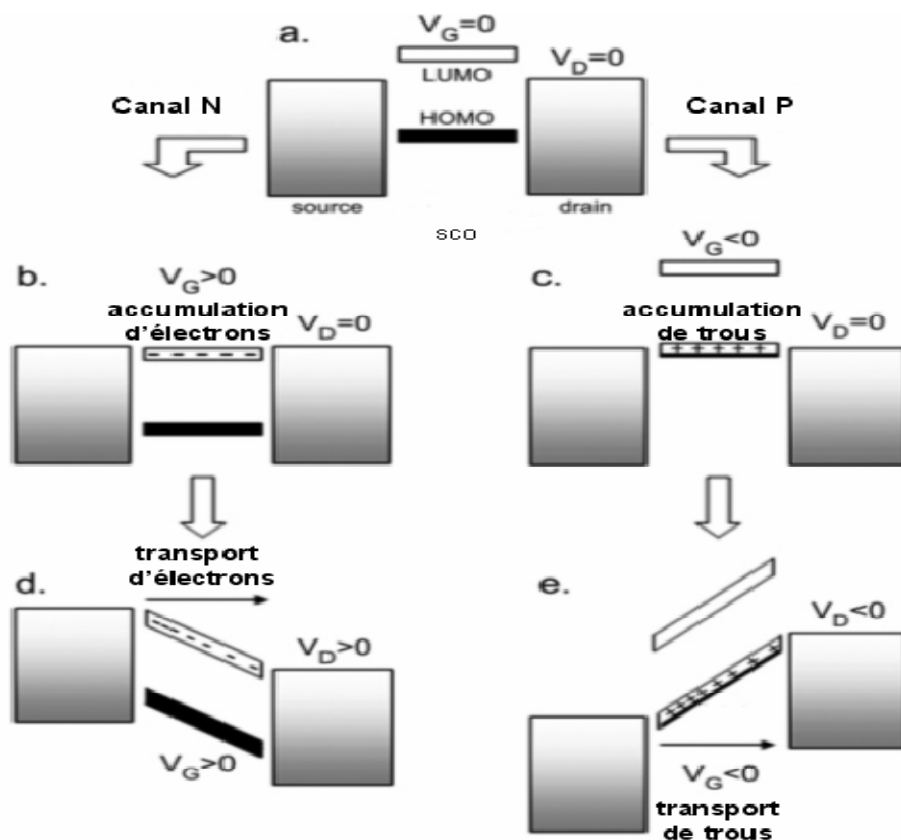


Figure 6: a) Diagramme des niveaux d'énergie dans un transistor organique à $V_{GS}=V_{DS}=0$ b) principe de fonctionnement en accumulation d'électrons et transport associé(d),

(c) accumulation de trous et transport associé(e) [34]

III.4.paramètres essentiels pour caractériser un OTFT

Trois paramètres importants dans les dispositifs OTFTs sont envisagés ; la mobilité des porteurs de charges μ , le rapport de courant I_{on}/I_{off} et la tension de seuil.

III.4.1. 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 majeur de l'électronique organique. Le PPV (polymère) par exemple a une mobilité de l'ordre de $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 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 $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ou le silicium monocristallin d'environ $1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [38].

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.

III.4.2. le rapport $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$

Le courant I_{off} est le courant qui existe 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 du semi-conducteur, et on trouve donc un courant ohmique I_{Ω} en parallèle avec le courant de conduction dans le canal.

Pour des applications des transistors organiques le rapport de courant doit être important, donc il est nécessaire d'améliorer ce rapport On/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 rapports $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$.

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.

III.4.3. 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 du 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 semiconducteur organique. En réalité, la présence de pièges à l'interface semiconducteur/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).

III.5. Différents méthodes de dépôt des couches pour OTFT

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 la nature de ceux-ci. La mise en phase vapeur des polymères est délicate (nécessité 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 (méthode classique), on dispose de deux méthodes plus utilisées dans les matériaux organiques.

III.5.1. Dépôt à la tournette ou 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 quelques minutes est nécessaire pour 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 électriques et optiques du matériau. La figure 10 représente le principe de fonctionnement d'une tournette.

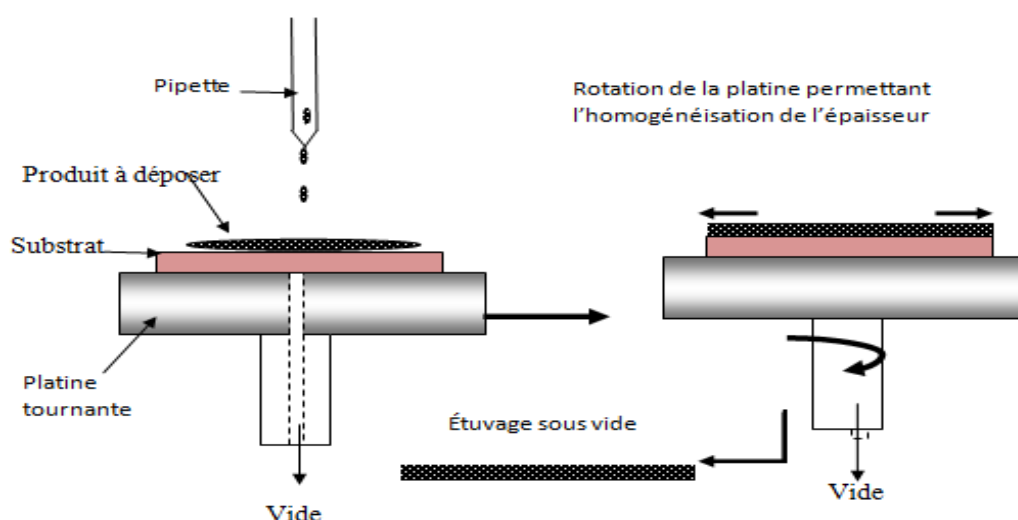


Figure 10 : Schéma de principe d'un dispositif expérimental de dépôt à la tournette [8]

Notons qu'il est nécessaire après le dépôt d'évaporer le solvant, 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 [34].

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 ;

Avantages:

- ✓ Faible coût du matériel utilisé ;
- ✓ Possibilité de dépôt sur grande surface;

- ✓ Facile à mettre en œuvre.

Inconvénients :

- ✓ Le matériau doit être en solution;
- ✓ Structures à plusieurs couches difficiles à réaliser;
- ✓ Stockage (dégradation et altération).

III.5.2.Dépôt par évaporation sous vide

L'évaporation sous vide consiste à chauffer le matériau placé dans un récipient métallique. Cet échauffement peut se faire soit par effet joulesous 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 toutes la surfaces d'une enceinte, en particulier sur le substrat placé en regard pour former un film homogène, dont épaisseur est contrôlée avec une balance à quartz voir figure 11.

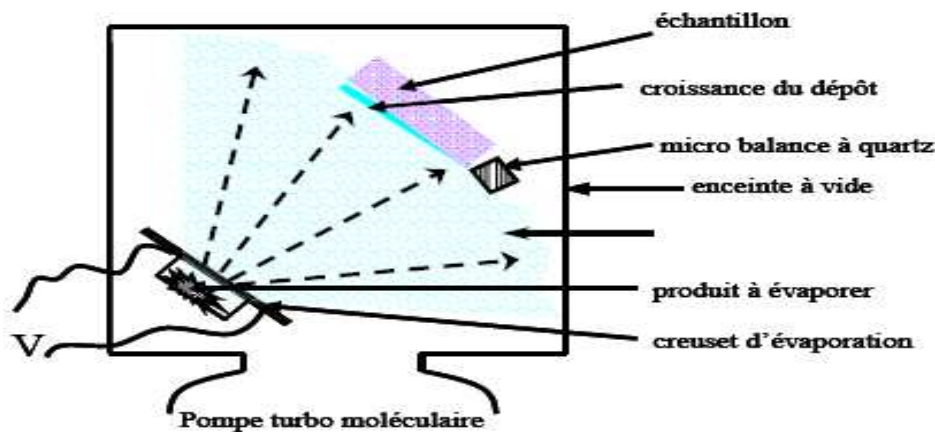


Figure 11 : procédé de dépôt par évaporation sous vide

Avantages

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

Inconvénients

- ✓ Technique lourde et bâti coûteux ;
- ✓ Faible rendement du procédé ;
- ✓ Surface de dépôt relativement réduite.

III.6. Matériaux utilisés

Nous présentons ici les différents matériaux entrant dans la fabrication des composants électroniques, en précisant ceux utilisés dans les transistors organiques à effet du champ.

III.6.1. Les substrats

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

III.6.2. les contacts de grille, source et drain

La réalisation des électrodes nécessitent la mise en œuvre des matériaux qui présentent une faible résistivité. Le but est de choisir un matériau présente une conductivité satisfaisante à une transparence la meilleure possible, deux matériaux sont beaucoup utilisés : l'or, et l'ITO. Les deux seront détaillés dans le chapitre IV

III.6.3. les semi-conducteurs

III.6.3.1. Le P3HT (poly 3-hexylthiophène)

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

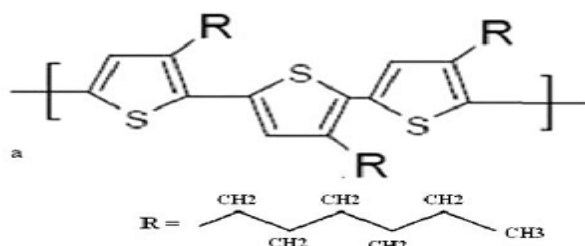
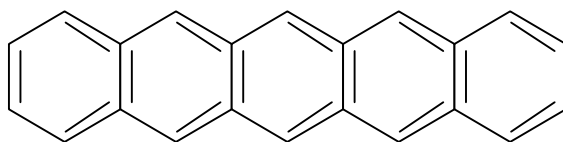


Figure 12 : Structure chimique du P3HT

III.6.3.2. Le pentacène

C'est un composé chimique ($C_{22}H_{14}$) de la famille des hydrocarbures aromatiques polycycliques, formé de cinq noyaux benzéniques fusionnés linéairement (Figure 13). 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.

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 [6]; 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 $5 \text{ cm}^2/\text{V.s}$).

**Figure 13 :** Structure chimique du Pentacène

III.6.4. les isolants de grille

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, par exemple, ils sont à bas coût, flexibles et souples. Nous nous intéresserons aux transistors organiques à effet de champ. Pour cela, nous allons présenter les polymères isolants (PMMA, PVP.....) les plus utilisés dans la fabrication des transistors. Tous les deux sont étendus à la tournette.

III.6.4.1. Poly-(4-vinylphénol), PVP

Le PVP est un polymère transparent en couches minces. Le PVP est vendu sous forme d'une poudre. Il doit donc être dilué pour pouvoir être déposé par spin coating.

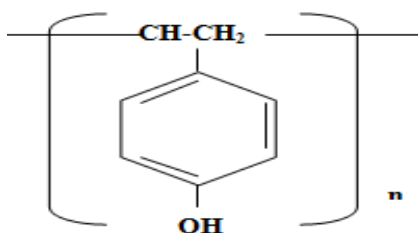


Figure.14 : formule semi-developpée du PVP

III.6.4.2. 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

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. La figure 15 représente le polymère de PMMA.

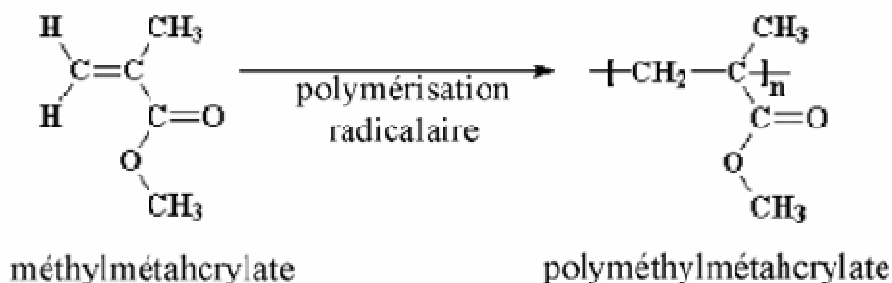


Figure 15: formation du PMMA par polymérisation radicalaire du méthacrylate de méthyle.

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 $1,9\text{g/cm}^3$, il offre d'excellentes caractéristiques. Il ne jaunit pas (incolore) et ne se fragilise pas.

Le Poly(methylmethacrylate) PMMA, à l'instar des autres polymères, présente, par rapport aux isolants classiques, l'avantage d'avoir des propriétés mécaniques meilleures, une mouillabilité plus faible, d'être plus légers et mis en œuvre plus facilement [39]

Conclusion

Nous avons conclu que l'intérêt des transistors organiques à effet de champ provient du fait que leurs performances se rapprochent de celles du transistor MOSFETs classiques.

En résumé, les transistors organiques ne peuvent concurrencer en terme de rapidité les MOSFETs en silicium, ils sont cependant très intéressants pour leurs applications dans des conditions à bas coût, et la possibilité d'être réaliser sur des grandes surfaces et leur dépôts en couches minces.

Introduction

Dans la famille des semi-conducteurs, l'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO en anglais Indium Tin Oxide) est le matériau le plus utilisé dans la fabrication des transistors organiques transparents en couches minces à cause de ses intéressantes propriétés optiques et électriques.

Dans ce chapitre, nous présentons les principales caractéristiques des oxydes transparents conducteurs (TCOs) en anglais (Transparent Conductor Oxide) et en particulier celles d'oxyde d'indium dopé à l'étain, puis nous donnons la géométrie des OFETs en configuration « Top Contact ». Ensuite les procédures de dépôt de différents matériaux utilisés : oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO), l'isolant de grille (PMMA) et le semi-conducteur organique pentacène (pn), qui est le matériau le plus répandu dans la fabrication des OFETs à couches minces, ainsi que les contacts source et drain. Ensuite nous donnons ses caractéristiques électriques.

IV.1. Généralités sur les oxydes transparents conducteurs (TCOs)

Les recherches sur la transparence et la réalisation des couches minces d'oxyde semi-conducteur attirent l'attention de nombreux chercheurs à cause de leur large gamme d'applications. Les TCOs sont connus depuis plus d'un siècle. En effet, le premier TCO étudié et composé est l'oxyde de cadmium en 1907 par K. Badeaker [40]; il a remarqué qu'après exposition à l'air d'un film d'oxyde de cadmium, celui-ci devient transparent tout en maintenant son aspect conducteur [41]. Les avancées dans le domaine des oxydes transparents et conducteurs n'ont développé que dans les années 1930-1940 [42], avec notamment deux brevets portant sur l'oxyde d'étain (SnO_2) non dopé et dopé déposés respectivement en 1931 [42] et 1942 [43]. En 1951, il y a eu la synthèse de l'oxyde d'indium dopé étain (ITO) par la technique de pulvérisation "sputtering" par J.M. Mochel [42]. L'oxyde de zinc ZnO a été découvert en 1971 par M. Matsuoka [44], ensuite de nombreux matériaux TCOs sont apparus, citons en particulier : Cd_2SnO_4 , CdSnO_2 , ZnO:Al , $\text{SnO}_2\text{:Sb}$, $\text{SnO}_2\text{:Cd}$, $\text{SnO}_2\text{:F}$, $\text{In}_2\text{O}_3\text{:F}$...etc. L'obtention de tels matériaux, présentant un bon compromis entre transparence à la lumière visible et bonne conductivité électrique, constitue un enjeu industriel intéressant.

IV.1.1.Définition d'un oxyde transparent conducteurTCO

Un excellent TCO est défini par une forte conductivité électrique combinée avec une faible absorption dans le visible. En général, ces deux caractéristiques sont liées aux conditions d'élaboration.

Les oxydes transparents conducteurs ont un large gap qui varie entre 3,01 et 4,6 eV Les largeurs des bandes interdites des oxydes transparents varient selon la méthode utilisée pour leurs dépôts. Le tableau 1 représente les différents gaps de quelques oxydes transparents conducteurs.

TCO	GAP (eV)
SnO ₂	(3,6-4,2)
ZnO	(3,2-3,3)
ITO [43,45]	3,5-4,3
ZTO	>3
TiO ₂	(3-3,2)[46,47]

Tableau 1 :différents gaps de quelques oxydes transparents conducteurs.

IV.1.2.Classification des oxydes transparents conducteurs

Selon la polarité des porteurs de charge, on distingue deux types d'oxydes transparents conducteurs (TCOs). Les TCOsontde type n si les porteurs de charge sont des électronset si les porteurs de charge sontdes trous, les TCOs sont dits de type p.

A ce jour, les OTCs les plus connus, performants et utilises sont des oxydes simples tels queIn₂O₃, ZnO ou SnO₂, et leurs dérivés comme par exemple In₂O₃:Sn, ZnO:Al ou encoreSnO₂ : F. Notons que tous ces oxydes sont des conducteurs de type n et ilsont une structure cristalline (Figure 1)

LesTCOs de type p connus n'ont pas des propriétésélectriques et optiques assezperformantes pour être utilisés au sein de composés actifs industrialisables. Actuellement,de nombreux travaux de recherche portent aussi bien sur l'amélioration des propriétés de ces matériaux et l'élaboration de nouveaux TCOs de type p.

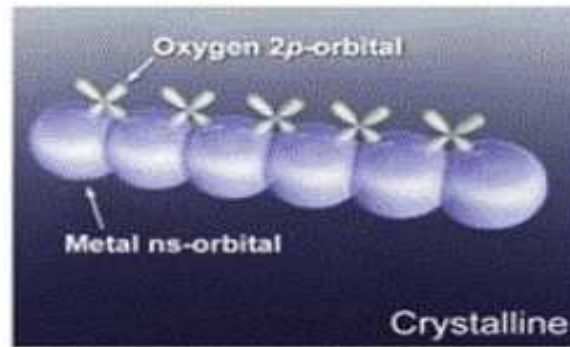


Figure 1 : Structure cristalline des TCOs de type n [45].

IV.1.3. Méthodes de dépôts des TCOs en couches minces

Les propriétés physiques d'un TCO ne dépendent pas uniquement de sa composition chimique, mais aussi de la méthode utilisée pour sa préparation. Les méthodes d'élaboration des couches minces de TCOs sont diverses : la pulvérisation cathodique, l'évaporation thermique, la déposition assistée par laser pulsé (PLD) sont des voies physiques, tandis que la déposition chimique en phase vapeur (CVD), le sol-gel sont des voies chimiques. La pulvérisation cathodique (sputtering) fut la première technique commercialisée, il y a plus d'une cinquantaine d'années, pour déposer des couches minces de TCO sur du verre. Depuis 1980 la technique de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est la plus utilisée pour l'élaboration des verres recouverts d'oxyde d'étain dopé au fluor $\text{SnO}_2:\text{F}$ [48]. Actuellement la majorité des matériaux TCOs utilisés dans le commerce sont produits par CVD, technique qui a l'avantage de permettre des dépôts sur de grandes surfaces.

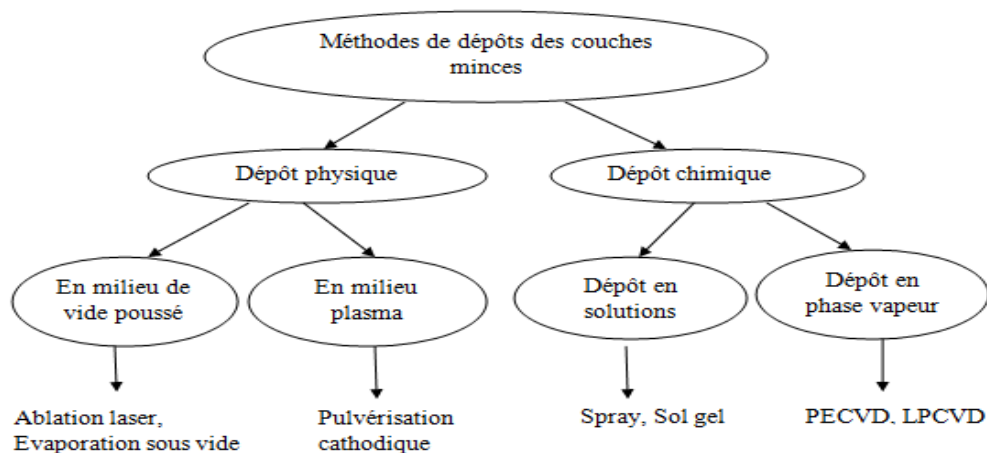


Figure 2 : méthodes de dépôt des couches minces [49].

Dans notre mémoire on s'intéresse à l'oxyde transparent conducteur ITO qui doit être déposé en fine couche pour la réalisation des transistors organiques transparents. En effet, la couleur dépend de l'épaisseur de la couche : plus la couche déposée est épaisse, moins l'opacité est bonne. Ainsi, lorsque l'épaisseur dépasse 3000 Angströms, le matériau devient jaunâtre voire gris. Différents procédés permettent de déposer l'ITO en fine couche :

- Évaporation par faisceau d'électrons ;
- Dépôt par évaporation sous vide ;
- Pulvérisation cathodique ;
- Sérigraphie.

	Avantages	Inconvénients
Évaporation par faisceau d'électrons	Taux élevé de déposition Contrôle structurel et morphologique du film	Taux d'évaporation non uniforme par dégradation du canon
Dépôt par évaporation sous vide		Vapeurs parasites Vide limité Réaction parasites altérant le dépôt
Pulvérisation cathodique	Méthode de dépôt rapide	Instabilité électrique
Sérigraphie	bonne conductivité	mauvaise transparence Faible précision

Tableau 3 : Avantages et inconvénients des différents procédés de dépôt de l'ITO

IV.2.Présentation de L'ITO

L'ITO est un oxyde transparent conducteur qui appartient à la famille des oxydes transparents conducteurs (TCOs), il est généralement déposé en couches minces, utilisé sur substrat en verre dans divers dispositifs de l'optoélectronique comme électrode transparente mais aussi : comme plaque chauffante transparente, protection contre les champs électromagnétiques, isolation thermique.... En effet ses excellentes propriétés optiques et électriques en font un matériau de choix pour la réalisation d'électrodes transparentes dans les dispositifs optoélectroniques.

En réalité l'ITO n'est pas une solution solide d'oxyde d'indium et d'étain comme son nom l'indique. L'oxyde d'indium-étain (ou oxyde d'indium dopé à l'étain ou ITO pour l'appellation anglaise : Indium Tin Oxide) 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[20].

La caractéristique principale de l'oxyde d'indium-étain est la combinaison de conductivité électrique et de transparence optique. Cependant, un compromis doit être atteint lors du dépôt de films, l'augmentation de la concentration de porteurs de charges induisant une augmentation de la conductivité du matériau, mais une perte de la transparence.

IV.2.1. Propriétés électriques

En règle générale on peut dire que l'ITO est un semi-conducteur de type n fortement dégénéré à large gap direct qui autorise la transparence variant entre 3.5 et 4.3 eV[49,50]. Dans le cas où l'ITO est dégénéré, le niveau de Fermi est situé à l'intérieur de la bande de conduction[51], son comportement est alors quasi métallique. L'origine de la dégénérescence vient à la fois de lacunes d'oxygène et du dopage en étain [52]. Sn^{4+} remplace In^{3+} et se comporte donc comme un donneur de type n. La conductivité est donc assurée par les atomes d'étain et surtout les lacunes d'oxygène[53,54].

L'ITO présente :

- Une résistivité électrique qui peut descendre jusqu'à $10^{-4} \Omega.\text{cm}$ (Figure 3), selon le mode de dépôt. Cette faible résistivité électrique est due à une importante concentration de porteurs de charges.

- La conductivité électrique σ ($\sigma = Ne\mu$) dépend de la concentration N des porteurs libres et de leur mobilité μ , e étant la charge de l'électron.

- Un travail de sortie qui varie généralement entre 4,7 et 5,2 eV [55], il dépend de la technique de dépôt.

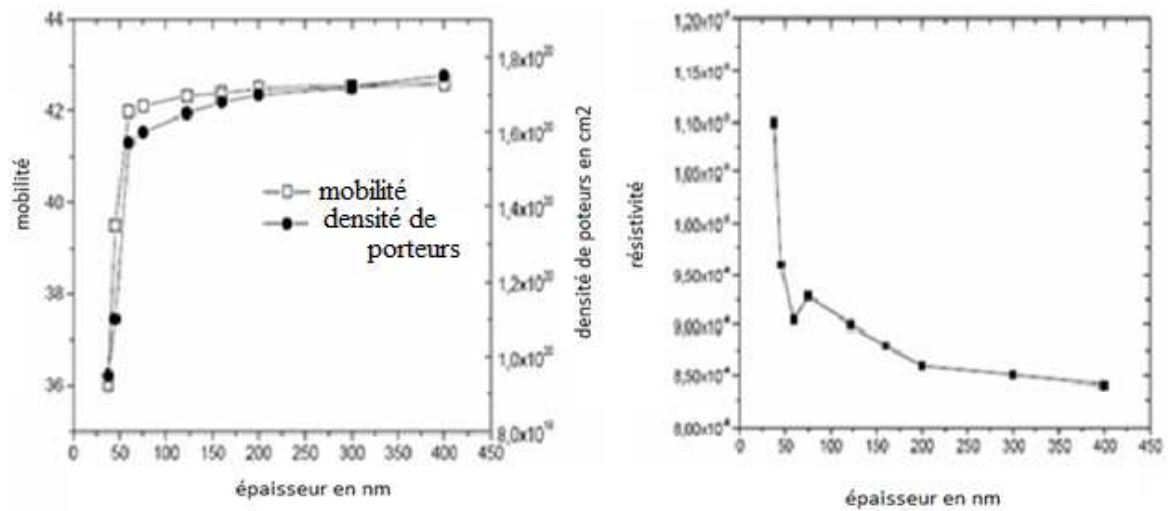


Figure 3 : mobilité et densité de porteurs de charges d'une couche d'ITO en fonction de leur épaisseur[56]

IV.2.2. Propriétés optiques

L'ITO est un semi-conducteur à large gap qui présente une forte transmission dans le spectre visible et infra rouge (90% transparents pour l'œil humain). En fait la transmission est importante dans la gamme $200\text{nm} < \lambda < 800\text{nm}$. La forte décroissance pour $\lambda < 400\text{nm}$ est liée à l'absorption des transitions électroniques à travers le gap du semi-conducteur [57] ($3.5\text{eV} \rightarrow 354\text{nm}$). Un accroissement du dopage en Sn cause une augmentation de la réflexion et parallèlement une diminution de transmission dans l'infra-rouge[58], et au-delà de 10^{18} porteurs/cm³, le gap augmente, c'est l'effet Brustein Moss [56]

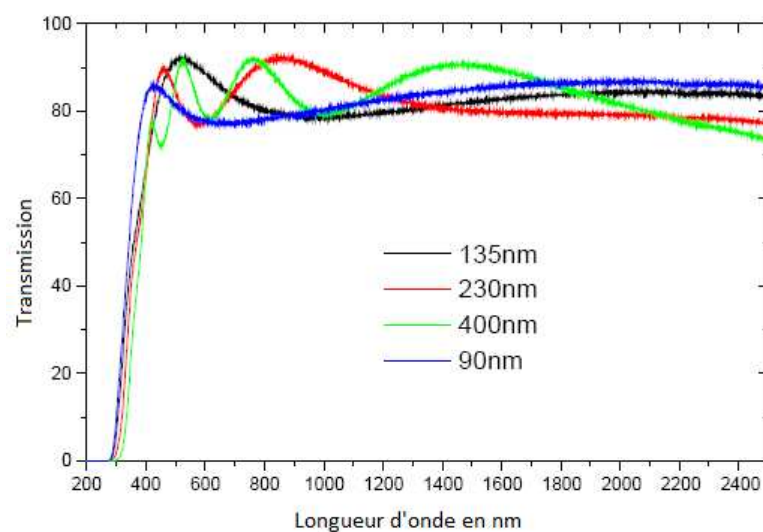


Figure 2 : transmission des couches d'ITO en fonction de leur épaisseur [56].

IV.3.Application de l'ITO

L'oxyde d'indium dopé à l'étain est le matériau le plus utilisé dans le domaine technologique malgré son coût très élevé et sa rareté sur la surface de la terre. Parmi ses applications on peut citer :

- ✓ En électronique et optoélectronique, les films minces d'ITO sont utilisés dans différents composants tels que les diodes électroluminescentes organiques (OLED), les LEDs et aussi les détecteurs de gaz.
- ✓ Ses propriétés électriques et optiques en couches minces sont exploitées pour réaliser des électrodes transparentes dans les écrans plats, les cellules solaires et les transistors organiques. De plus, ces films sont aussi utilisés comme couche antireflet ou encore pour la protection contre les champs électromagnétiques.

IV.4.Transistor organique « Bottom Gate Top Contact » avec électrode en ITO

La configuration « Bottom Gate Top Contact » permet généralement d'obtenir des gains en courant beaucoup plus élevés. Aussi, il est admis que l'utilisation de cette géométrie d'électrodes dans le fonctionnement des transistors organiques est plus performante qu'une configuration « Bottom Contact ».

A la différence de la structure « Bottom Contact », le semi-conducteur est déposé en troisième position, et c'est le dépôt des électrodes de source et de drain qui termine en quatrième phase le procédé de fabrication du transistor (Figure 4)

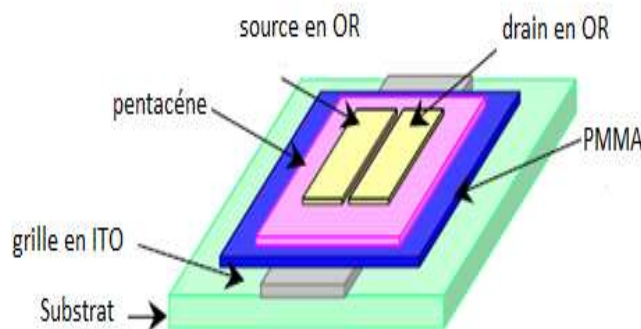


Figure 4 : Structure d'un transistor organique en géométrie
« Bottom Gate- Top Contact [56]

IV.5. Différentes étapes de réalisation d'un transistor organique transparent

La réalisation d'un transistor organique transparent à effet de champ comporte plusieurs étapes, qui sont les suivantes:

Nous disposons sur un substrat de verre un film d'oxyde transparent conducteur ITO, qui servira comme électrode métallique dans les transistors organiques à effet de champ. La plupart des laboratoires de recherches achètent des échantillons de verre/ITO de la société Sigma-Aldrich. La surface de substrat verre/ITO est de 12mm^2 . Enlever de deux coté 4mm^2 .

- La première étape consiste à délimiter le contact de la grille ITO par l'opération de gravure : Protection de la surface à conserver (la partie centrale) avec un film adhésif résistant à l'acide, puis l'échantillon est plongé dans un bain d'acide chlorhydrique (HCL) pendant 2 à 3 mn, chauffé à température 90°C , pour éliminer la couche non protégée par la résine, ensuite rinçage avec l'eau distillée.

Pour retirer la couche de la résine des échantillons et supprimer toute trace d'ITO restante sur la surface, les échantillons sont mis dans un bain d'acétone, d'éthanol ensuite dans un bain d'eau et d'isopropanol. La durée de ces bains est de 5 mn, la figure 5 montre la gravure et le nettoyage de la plaquette de verre/ITO.

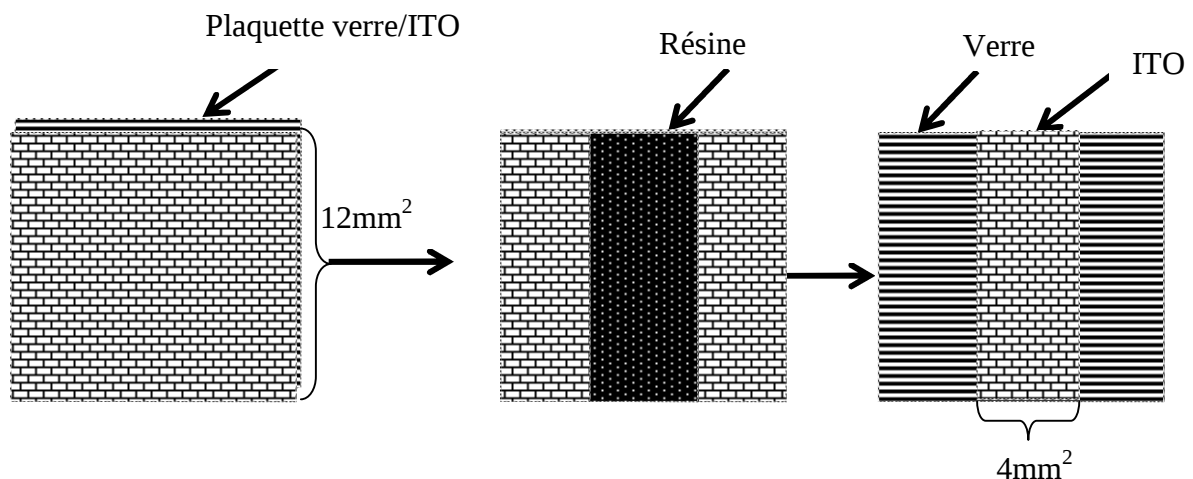


Figure 5 : Gravure et nettoyage d'ITO

- La deuxième étape consiste à déposer une couche isolante sur toute la surface de la plaquette. On a choisi le PMMA comme isolant de grille à cause de ses excellentes propriétés électriques, il se dépose par la méthode spin-coating.

Dans cette phase, on dispose du polymère PMMA en solution sur un substrat à l'aide d'une pipette comme le montre la figure 6.

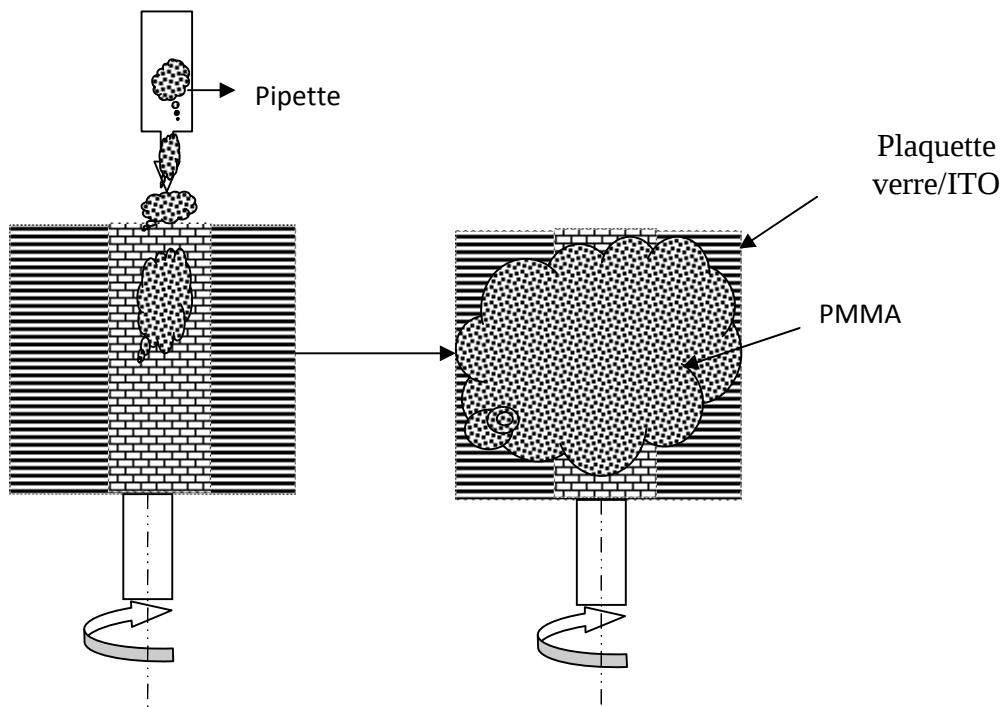


Figure6: dépôt de la solution sur le substrat verre/ITO

Dans cette phase la solution déposée sur le substrat verre/ITO est mise en rotation et accélérée jusqu'à l'obtention d'une vitesse de rotation désirée, en effet cette partie permet à la solution de repartir uniformément sur toute la surface du substrat verre/ITO comme le montre la figure 7.

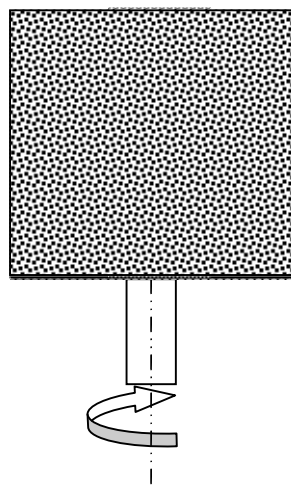


Figure7: accélération et homogénéité sur substrat verre/ITO.

La couche d'isolant de grille de $1\mu\text{m}$ en PMMA est obtenue à la tournette dans les conditions suivantes [6] :

- Vitesse : 4000 tours/mn,
 - Accélération : 9000 tours/mn²,
 - Temps : 30 s et un recuit de 30mn à 170°C.
- La 3^{ème} étape consiste à déposer une couche active, le choix de pentacène dépend de plusieurs paramètres : sa mobilité élevée en trous, sa disponibilité sur le marché et sa grande pureté.

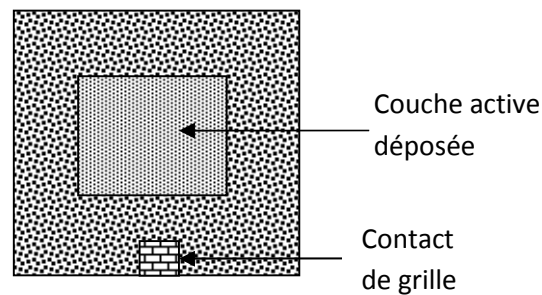


Figure 8: dépôt de la couche active par évaporation sous vide

On termine la réalisation d'un transistor par le dépôt des électrodes source et drain en or. Ce dernier s'effectue par l'évaporation thermique sous vide à une pression de 10^{-7} mbar à travers un masque qui lui correspond, qui définit la longueur du canal d'un transistor.

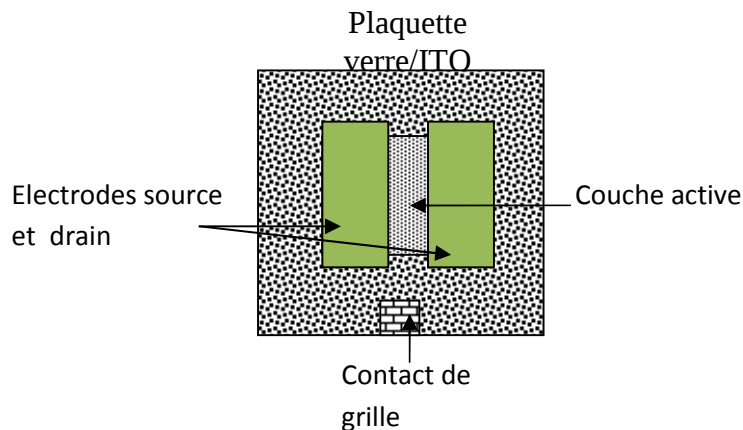


Figure 9: dépôt des électrodes source et drain par évaporation sous vide

1) Choix de l'épaisseur de pentacène

Le paramètre important pour caractériser un transistor est la mobilité de porteurs de charges. Cette mobilité nous a permis de choisir l'épaisseur de pentacène à utiliser. La figure ci-dessous montre l'évolution de la mobilité en fonction de l'épaisseur de pentacène.

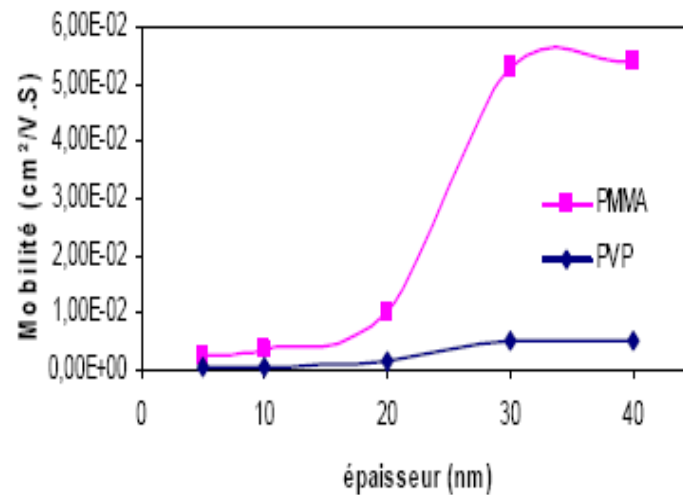


Figure 10: l'évolution de la mobilité en fonction de l'épaisseur de pentacène[20].

A partir de la figure 10, on constate que la mobilité atteint un maximum quand l'épaisseur de pentacène est supérieure ou égale à 30nm, quel que soit l'isolant utilisé[20].

2) Choix de l'or

L'or a été choisi à cause du faible dopage des semi-conducteurs organiques. Le canal de conduction se forme et se remplit en porteurs de charges, ces derniers sont injectés depuis les électrodes source et drain. Cette injection des charges dépend du travail de sortie du métal Φ_m .

Par exemple dans le cas du transistor organique à base de pentacène, on distingue deux configurations possibles présentées en figure 11.

Lorsque le pentacène est mis en contact avec les électrodes source et drain (Au), une zone d'accumulation va se créer à l'interface métal/pentacène, ce qui va faciliter l'injection des trous. Par contre si le contact était en magnésium, une barrière d'énergie se formerait. Par conséquent, il est préférable de choisir des métaux à grand travail de sortie Φ_m , afin d'obtenir, un canal et un contact électrique de meilleure qualité.

Le SCO que nous utilisons dans ce travail possède un niveau HOMO autour de 5eV, et nous avons choisi d'utiliser des électrodes en Au[55]. Elles sont déposées par évaporation sous vide.

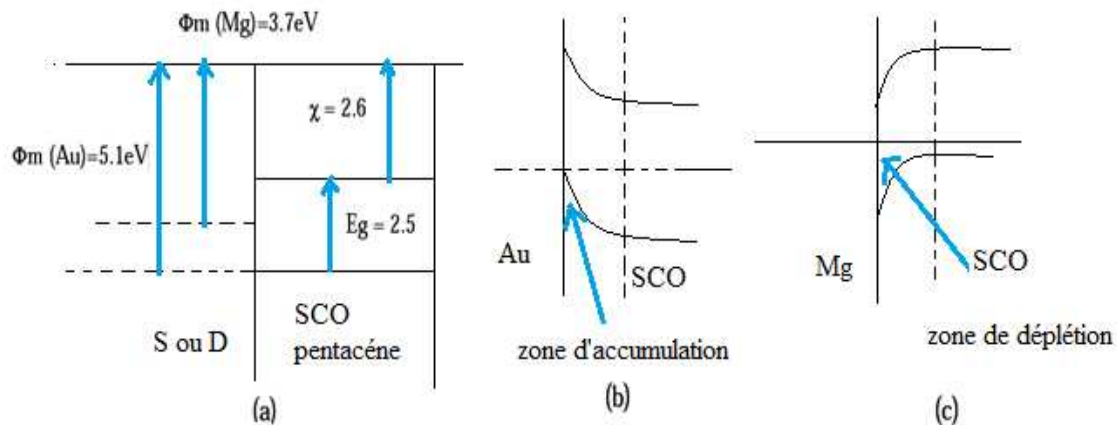


Figure 11 : Diagramme des niveaux d'énergie d'une interface métal / pentacène: **(a)** avant mise en contact, **(b)** après mise en contact, le métal étant de l'or, **(c)** le métal étant du magnésium.

IV.6. Caractéristiques électriques d'un transistor organique transparent

Après avoir réalisé un transistor organique en structure(BGTC), nous sommes passés à la caractérisation électrique de ce transistor $I_{DS} = f(V_{DS})$ et $I_{DS} = f(V_{GS})$.

Le transistor est polarisé avec des tensions de grille négatives appartenant à l'intervalle $[0 \text{ V}; -40 \text{ V}]$ avec un pas de -5V. Et une polarisation négative de drain permet la circulation d'un courant électrique dans le canal de conduction, les deux régimes de fonctionnements sont obtenus pour un transistor organique à base de pentacène.

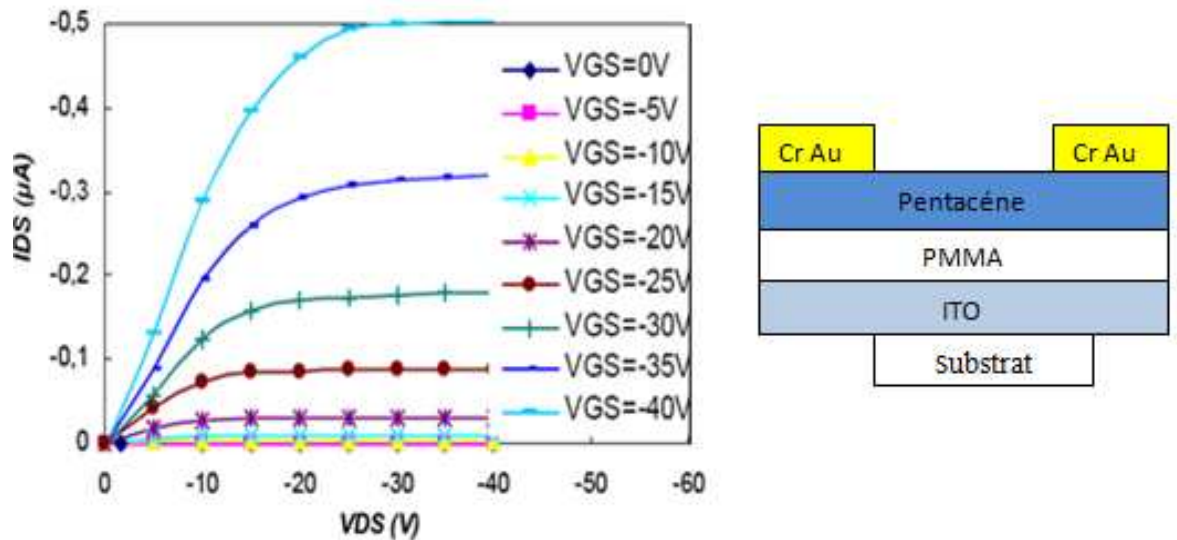


Figure 12: Caractéristiques de sortie d'un transistor organique transparent en géométrie Top Contact [20].

Ce transistor est fabriqué sur un substrat de verre avec contact de grille bicouche : ITO (200nm) puis NiOx (20nm) et un semi-conducteur organique d'une épaisseur de 30nm. Les électrodes source et drain sont en or.

A partir de la courbe de caractéristique de sortie, nous avons obtenu un courant de saturation de 500nA, une mobilité des porteurs de $9,5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$, un rapport I_{on}/I_{off} de $2,5 \cdot 10^3$ et une tension seuil de -3V [20].

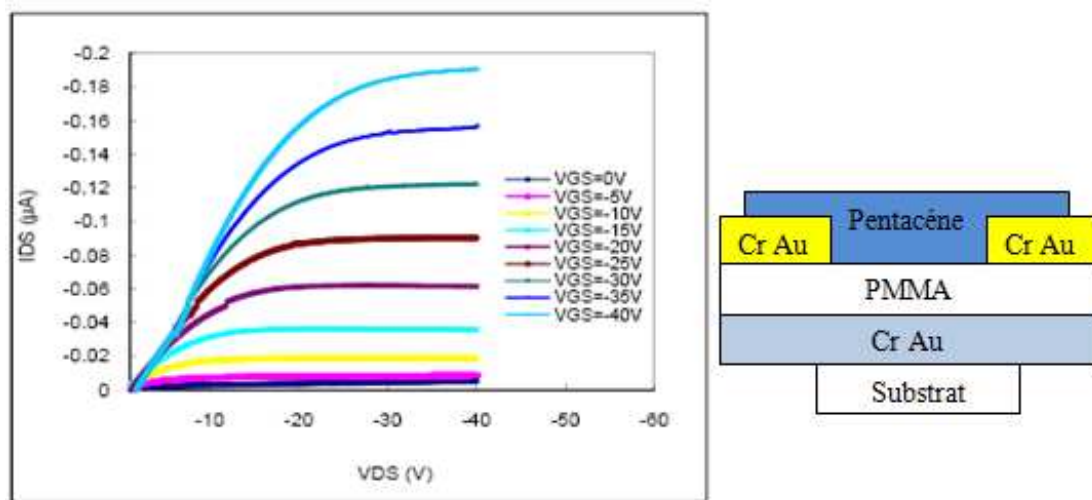


Figure 13 : Caractéristiques de sortie d'un transistor en géométrie Bottom Contact [20].

Le tableau représente la comparaison entre les deux géométries

	I_{DSsat} (nA)	μ_{sat} (cm ² /Vs)	V_{th} (V)	I_{on}/I_{off}
Top Contact	500	$9,5.10^{-2}$	-3	$2,5.10^3$
BottomContact	90	$5,3.10^{-2}$	-4	10^4

Tableau4 : Comparaison entre un transistor organique en géométrie Top Contact et Bottom Contact

Pour déterminer la tension de seuil et la mobilité des porteurs de charges, il faut tracer la courbe $(-I_{DS})^{1/2} = f(-V_{GS})$ comme le montre la figure 11.

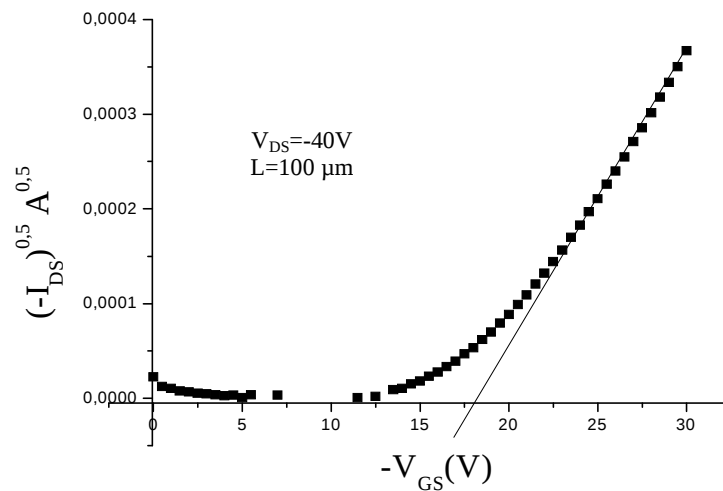


Figure 11 : courant de drain en fonction de la tension de grille

En appliquant la formule suivante pour calculer la mobilité

$$\sqrt{\mu} = \frac{\partial \sqrt{I_{DS}}}{\partial V_{GS}} * \sqrt{\frac{2L}{WC_i}} \dots \dots \dots (IV. 2)$$

Où: $C_i = 2,3 \text{ F/cm}^2$, $L = 100 \text{ μm}$ et $W = 4 \text{ mm}$,

La mobilité de porteurs de charges obtenue dans le pentacène est de $0.043\text{cm}^2/\text{Vs}$, et une tension de seuil est d'environ -17 V .

Conclusion

Nous avons conclu que la réalisation des transistors organiques transparents en couches minces de pentacène sont destinés pour deux pour deux objectifs : d'une part pour la réalisation de l'électronique transparente, et d'autre part la réduction des coûts de fabrication, et leur réalisation sur des grandes surfaces.

L'exploitation des matériaux organiques semi-conducteurs comme couche active ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine des transistors organiques (OTFTs). Il est apparu que l'émergence des oxydes métalliques transparents de type n comme ITO, permet aujourd'hui d'envisager une nouvelle approche de fabrication de ces dispositifs.

Au cours de ce travail, nous avons décrit le principe de fonctionnement de la structure MIS (Métal/isolant/semi-conducteur) et l'effet de la température sur les paramètres d'un transistor MOS à effet de champ. Nous avons étudié l'effet de l'épaisseur de la couche active pentacène sur les propriétés électriques des transistors organiques, nous avons de même étudié l'influence de la couche d'oxyde transparent conducteur (ITO), qui joue le rôle de la grille métallique, ainsi que l'influence des isolants de grille sur les performances de ce dernier.

Les transistors organiques à base de pentacène font l'objet d'études continues pour développer son élaboration depuis plusieurs années, en raison de sa grande mobilité de porteurs de charge par rapport aux autres matériaux semi-conducteurs organiques. Dans ces transistors, le transport de charges dépend fortement des propriétés des interfaces semi-conducteur/électrode où prend effet l'injection des charges et semi-conducteur/isolant de grille près de la zone dans laquelle le transport de charges s'effectue. La qualité de ces interfaces est déterminante pour les performances des transistors. En particulier, la mobilité de porteurs de charges qui est le point faible majeur de l'électronique organique, la tension de seuil et le rapport du courant qui caractérise la capacité d'un dispositif de passer d'un état passant à l'état bloqué.

Le choix approprié des isolants de grille SiO_2 et le PMMA est basé sur leurs résistivités et leurs constantes diélectriques élevées qui jouent le rôle important dans le fonctionnement des transistors organiques.

Les deux isolants présentent des résistivités très élevées qui empêchent le passage du courant entre la grille et le canal et une constante diélectrique élevée pour avoir assez de capacité pour le flux de courant dans le canal de conduction.

Les transistors organiques à effet de champ (OFETs) ont atteint un « niveau étendu » permettant l'intégration de fonctions électroniques simples sur support souple. Les transistors organiques présentent maintenant des bonnes performances par rapport aux transistors classiques.

L'apparition des oxydes transparents conducteurs (TCOs) nous a permis de réaliser des transistors organiques nettement transparents. Ces oxydes présentent des propriétés attractives (conductivité et transparence élevées et faible rugosité) et une bonne qualité d'interface semi-conducteur/électrode, la qualité de ces interfaces conditionne, d'une part,

l'injection/l'extraction des charges, et d'autre part, la diffusion des impuretés dans la couche active de ces transistors à partir des électrodes.

Dans ce type de transistor, l'ITO (Oxyde Transparent Conducteur) utilisé présent un bon compromis entre transparence optique et bonne conductivité électrique. Cet oxyde est utilisé comme électrode transparente dans les transistors organiques à couches minces pour sa bonne conductivité électrique combinée à une transparence élevée (85%) sur toute l'étendue du spectre visible et du proche infrarouge.

L'utilisation de couches actives à base des matériaux organiques semi-conducteurs ouvrent des nouvelles perspectives dans le domaine des transistors organiques (OTFTs). Il est apparu que l'émergence des oxydes métalliques transparents de type n comme ITO, permet aujourd'hui d'envisager une nouvelle approche de fabrication de ces dispositifs.

Bibliographies

- [1]. C.T. Sah, “Mosfetmodeling for Vlsi simulation theory and practice”World Scientific, pp.69-287, 2006.
- [2].A.Lojon, thèse de Doctorat, «Nano-composite conducteur polymère/nano-filsmétalliques: élaboration et analyse des propriétés physiques»,Université de Toulouse III-Paul Sabatier(France), 2010.
- [3].J.B Desmoulins, «Cours Interface physique-chimie Dispositifs électroniques» (PRAG au Département de Physique de l'ENS de Cachan).
- [4].Rappels théoriques «Propriétés électriques des conducteurs et des semi-conducteurs», Université J.Fourier Grenoble.
- [5].H. Mathieu «Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques».
- [6].N. BenahmedBenabdallah,Mémoire de Magister, «Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe», Université de Tlemcen, 2006.
- [7].M.Oukachmih, Thèse de Doctorat, «Les cellules photovoltaïquesà base de matériaux organiques discotiques», UniversitéPaul Sabatier de Toulouse, 2003.
- [8]. D. Hatem, Mémoire de Magister, «Etude de structures électroniques à base de matériaux organiques pour cellules solaires à conversion photovoltaïque», Université de Tizi-Ouzou 2009.
- [9].J.P.Colinge, C.A.Colinge, “Physics of semi-conductor Devices”, Kluwer AcademicPublishers, pp.166-200, 2002.
- [10].T.Skonicki, «Transistor MOS et sa technologie de fabrication». Docteur en microélectronique, Ingénieur de recherche à France Télécom, Centre national d'études des télécommunications (CNET) de Grenoble.
- [11].K. Bessem, Mémoire de Magister, «Etude par TCAD-SILVACO d'une structure MOS pour la réalisation de capteurs ISFET : paramètres technologiques et électriques» 2010.
- [12].S. Sheng “Semi-conductor Physical electronics second edition”, Springer, pp.582-583, 2006.

Bibliographie

- [13].K. F. Brennan, A. S. Brown, "Theory of modern electronic semiconductor devices", Wiley-Interscience Publication, pp.289-298, 2002.
- [14]. C. Montoro, M. Schneider, "MOSFET modeling for circuit analysis and design", World scientific, pp.306-313, 2007.
- [15]. H. Mathieu, «physique des semi-conducteurs et des composants électroniques», 3^{ème} édition Masson 1996.
- [16].H. Mathieu, «Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques», Masson, pp.363, 1998.
- [17]. C.K. Chiang, C.R. Fincher, Y.W. Park, A.J. Heeger, H. Shirakawa, S.C. Gau, A.J. MacDiarmid, "Electrical conductivity in doped polyacetylene", Vol39, pp.1098-1101, 1977.
- [18].S. Alem-Boudjemline, thèse de Doctorat, «Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques plastiques», Ecole Doctorale d'Angers, 2004.
- [19].H. Shirakawa, Angew, "The Discovery of polyacetylene film: the dawning of arena of conducting polymers", 2001.
- [20].I. EL HOUTI EL JAZAIRI, thèse de Doctorat, «transistors organiques transparents et imprimés à base de pentacène», Université de Limoges, Thèse N° 61, 2009.
- [21].L. Biniek, thèse de Doctorat, «polymères Semi-Conducteurs à faible largeur de bande interdite: de la synthèse au dispositif photovoltaïque organique», Université Strasbourg, 2010.
- [22].M.Ben Khalifa, Thèse de Doctorat «Etude de transport et ingénierie de bandes dans les diodes électroluminescentes à hétéro-structures», Ecole centrale de Lyon, 2004.
- [23]. G. Keyser, Professeur : V. BAYOT; Benoit OLBRECHTS (Elec 22); Valérie WILMART : « électronique organique ELEC 2550». Faculté des Sciences Appliquées année académique 2001-2002.
- [24]. B. BROUSSE, thèse de Doctorat, «Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique». Université de Limoges, Ecole Doctorale Sciences – Technologie. Santé FACULTE de Sciences et Technique de Limoges, 2004.
- [25].S.Carayon, thèse de Doctorat, « Propriétés de fluorescence de nano-cristaux de semi-conducteurs II-VI» Université Joseph FOURIER- GRENOBLE I Discipline : Physique, 2005.

Bibliographie

- [26].G. Wantz, thèse de Doctorat, « Elaboration, caractérisation et optimisation de diodes électroluminescentes a base de polymères conjugués». Université Bordeaux École Doctorale des Sciences Physiques et de L'ingénieur, 2003.
- [27]. M.E. Ernould, « les polymères semi-conducteurs», projet de physique appliquée, 2005-2006.
- [28]. S. Alem-Boudjemline, Thèse de Doctorat, «Réalisation et Caractérisation des Cellules Photovoltaïques Plastiques», Université Paris XI, Orsay, France, 2004.
- [29].S.Sensfuss and M. Al-Ibrahim, “Optoelectronic Properties of Conjugated Polymer/Fullerene Binary Pairs with Variety of LUMO Level, Organic Electronics”, 2005.
- [30].G. Le Comber, W. E.Spear, Phys. Rev. Lett., 25, p. 509, 1970.
- [31].A. Cuendias, thèse de Doctorat, « copolymères à blocs constitués d'un bloc rigide conjugué synthèse et auto-assemblage en solution », Université de Bordeaux-I, 2007.
- [32]. V. Coropceanu,J. Cornil,D.A.daSilvaFilho,Y. Olivier,R. Silbey, and J-L.Bredas, “ChargeTtransport in Organic Semiconductors”, Chem. Rev,2007,107-926-952.
- [33].J.Zaumseil. And? H.Sirringhaus,“Electron and Ambipolar Transport inorganic FieldEffect Transistor”, Chem. Rev, 2007, 107-1296-1323.
- [34].N. Sébastien thèse de Doctorat, «Contribution à l'étude du transport ambipolaire dans les transistors organiques : impact du procédé de fabrication sur les performances des couches minces», Université de la Méditerranée, 2010.
- [35].A.Moliton «Electronique et optoélectronique organiques» XLim-MINACOM, Optoélectronique Plastique Faculté des Sciences de l'Université de Limoges 87060 Limoges Cedex France, 2000.
- [36]. I.C. Nelson, D. Banerjee, W.J. Rogers and M.S. Mannan, “Detection of explosives using heated microcantilever sensors micro (MEMS) and nanotechnologies for space applications”, vol. 6223, 2006.
- [37]. C.D. Dimitakopilos and P.R.L. Malenfant, “Organic thin film transistors for large area electronics. Advanced Materials”, 2002.
- [38]. J.M Shaw, P.F. Seidler, “Organic electronics: introduction”, Vol. 45, 2001.
- [39]. R. Hackam, “Outdoor HV Composite Polymer Insulators”,IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation”, Vol.6, N°5, pp. 557-585, 1999.

Bibliographie

- [40]. K. Bädeker, *Ann. Phys. (Leipzig)* 22, 746, 1907.
- [41]. D. Lambe, D. Lambe et al. *Thin solid films*, 2009, 1222-1224.
- [42]. G. Gordon, *MRS Bulletin*, 52-57, 2000.
- [43]. Y. Saadeddin, *these University Bordeaux I*, 2009.
- [44]. M. Matsuoka, *Japanese Journal of Applied Physics*, 736-746, 1971.
- [45]. D. Ginley and J. Perkins, *Handbook of Transparent Conductors*, 2010.
- [46]. B.G. Lewis, D.C. Paine, *Mater. Res. Soc. Bull. Applications and proceeding of Transparent Conducting Oxides*, 2000.
- [47]. T. Minami, *Semicond. Sci. Technol.*, “Transparent conducting oxides semiconductors for transparent electrode”, S35, 2005.
- [48]. P.F. Gerhardinger and R.J. McCurdy, in *Thin Films for Photovoltaic and Related Device Applications*, edited by D. Ginley, A. Catalano, H.W. Schock, C. Eberspacher, T.M. Peterson, and T. Wada (*Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 426, Pittsburg, 1996).
- [49]. K. Daoudi, *Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, Lyon 1*, 2003
- [50]. V. Teixeira, H.N. Cui, L.J. Meng, E. Fortunato, R. Martins *Thin Solid Films*, 420- 421, 70, 2002.
- [51]. S. Hariech, *Mémoire de Magister «Elaboration et caractérisation des couches minces de sulfure de cadmium (CdS) préparées par bain chimique (CBD)»*, Université Constantine, 2009.
- [52]. L. Gupta, A. Mansingh and P. K. Srivastava, *Thin Solid Films*, 176, 33, 1989.
- [53]. J.L. Huang, Y.T. Jah, C.Y. Chen, B.S. Yau and S.S. Lin, 1989.
- [54]. T. Minami, H. Sonohara, T. Kakumu and S. Takata, “Physics of very thin ITO conducting films with high transparency prepared by DC magnetron sputtering”, 1995.
- [55]. Shitao Li, Xueliang Qiao, Jianguo Chen, “Effects of oxygen flow on the properties of indium tin oxide films”, *Materials Chemistry and Physics* 98, 144–147, 2006.
- [56]. W.F. Wu and B.S. Chiou, *Semicon. Sci. Technol.*, 1317, 1996.

Résumé :

Les transistors organiques sont présents par milliards dans les circuits intégrés dans le but de réaliser des calculs de plus en plus complexes. Dans le cadre de l'amélioration du développement des circuits intégrés nous nous intéressons aux performances d'un transistor organique individuel, dont l'amélioration peut se faire par l'utilisation des matériaux organiques comme couche active. Les procédés de fabrication d'un transistor organique à effet de champ sont beaucoup moins complexes et moins coûteux que leur équivalent à base de matériaux inorganiques. Ils sont utilisés pour réaliser des phototransistors, des mémoires bistables, etc...

L'électronique organique (plastique) présente plusieurs avantages par rapport à l'électronique classique, parmi ces avantages on trouve les faibles coûts des procédés de fabrication, leur réalisation sur des grandes surfaces et leur souplesse.

Dans ce travail, nous avons décrit les différents polymères isolant et semi-conducteur utilisés expérimentalement pour réaliser des transistors organiques transparents à couches minces.

La fabrication des transistors organiques à couches minces de pentacène sont destinés à deux objectifs : d'une part pour la réalisation de l'électronique transparente, et d'autre part pour réduire les coûts de fabrication, et les réaliser sur des grandes surfaces.

Mots clés: Polyméthylmethacrylate (PMMA), Transistor MOSFET, l'Oxyde de Silicium (SiO₂), pentacène, Oxydes Transparents Conducteurs (TCOs).

Summary:

The organics are present per billion transistors in integrated in order to manipulate calculations more complex circuits. The development of integrated circuits requires improved performance of individual organic transistor. this improvement can do this by using organic materials as the active layer. The manufacturing processes of an organic field effect transistor are much less complex and less expensive than their equivalent based inorganic materials. They are used to perform phototransistors, bistable memory.... etc.

Organic electronics (plastic) has several advantages over conventional electronics, among its advantages are: low cost manufacturing processes, supermarkets and flexibility.

In this work, we described the various insulating and semiconducting polymers used in the realization of transparent organic thin film transistors.

The manufacture of organic thin-film pentacene transistors are designed for two purposes: firstly to achieve transparent electronics, and secondly to reduce manufacturing costs and achieve on large surfaces.

Keywords : polymethylmethacrylate (PMMA) , MOSFET , siliconoxide (SiO₂) , pentacene , transparent conductiveoxides (TCOs) .