



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département des Sciences de la Matière

# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine des Sciences de la Matière  
Filière de Physique  
Spécialité Physique des Matériaux

Réf. :

---

Présenté par :

**NedjmaMechri&HadjerLassel**

Le : jeudi 27 juin 2019

## Caractérisation et modélisation des TFTs ZnOAmorphe

---

Devant le jury:

Pr.	Mohammedi Farhet	Pr	Université Med Khider-Biskra	Président
Dr.	Laznek Samira	MCB	Université Med Khider-Biskra	Examinatrice
Pr.	SangougaNourddine	Pr	Université Med Khider-Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2018 - 2019

# *Remerciements*

*Tout d'abord, nous voudrions remercier **Dieu** Tout-Puissant de nous avoir permis d'atteindre ce niveau d'éducation et de nous donner beaucoup de patience et de courage.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à notre superviseur, **Sangouga Nourddine**, pour ses conseils avisés tout au long de notre projet et pour les précieux conseils qu'il nous a donnés, pour l'aider et pour ses conseils constructifs.*

*Nous voudrions également exprimer nos remerciements et notre reconnaissance à l'examinatrice du comité **Mme Laznek Samira**, et à **M.le présidente Mohammedi Farhet**, pour les efforts qu'ils ont déployés pour lire les précieuses notes et commentaires qui enrichissent cette note.*

*Nous voudrions exprimer nos remerciements et notre gratitude à tous ceux qui nous ont aidé dans un proche avenir à surmonter cette difficulté, en particulier **Mme Meftah Afak**, **M Tibermacine Toufik** et **Labed Mohammed**, qui nous ont aidés à terminer cette recherche.*

*Nous remercions toutes les personnes qui nous ont encouragés et soutenus de loin et de loin pendant ce travail.*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail, à mes très chers parents.*

A

*Ma mère, tes prières m'ont toujours accompagnée pour  
m'accomplissement de ce travail.*

A

*Mon père, son courage et son amour m'ont inspiré à continuer ce  
travail.*

A

*Mes sœurs Imane, Sara et Dalila.*

A

*Mon Frère Moutez Billah*

A

*Et les enfants de ma sœur et de mon frère Chahd, Rafif, Rahaf et  
Amjed.*

*Tout mon collègue.*

**Lasselhadjer.**

# Dédicace

*Pour m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la sagesse pour accomplir ce travail, et surtout pour ça bien vaillance, car sans lui je n'aurai rien pu faire et grâce à lui je suis devenu celle qui je suis aujourd'hui et j'ai eu tous ce que j'ai, alors je dois avant tout dire « **merci ALLAH** ».*

*à mon père, Je tiens à dire merci à l'ange qui à veiller sur moi toute ma vie et à celle qui m'a appris comment être plus forte en soignant moi-même, et comment rencontré triomphe après défaite , à ma mère je dédie ce mémoire et je lui dis que si je suis arrivé là c'est grâce à vous, alors veuillez m'accorder le plaisir d'accepter ceci.*

*A mes frères Saifeddine, Azaddine, Fateh et Hossein et mes belles sœurs Yasmina et Feryal ont été à mes côtés dans les moments les plus difficiles.*

*À mon oncle bien-aimé Mohammed et à sa chère épouse Albahdja et à mon cher Ali Mechri et ma chère Zakia.*

*A mes amis Hadjer, Saida, Hanan, Belkis, Rokia, Sabrina, Bahia, Amal, Lamia et Fatima .....etc.*

*Je leurs dédie ce mémoire. Et à toute ma promotion de physique, et toute ma famille.*

**Mechri Nedjma.**

# Table des matières

Remerciments .....	I
didicace .....	II
didicace .....	III
Table des matières .....	IV
Liste des tableau .....	VII
Liste des figures.....	VIII
الملخص .....	IX
IntroductionGénéral.....	1
Chapitre I : Transistors en couche mince (TFT) à base de ZnO amorphe	
I.1 Introduction .....	3
I.2 Propriétés physico-chimiques de l'oxyde Zinc amorphe .....	3
I.2.1Oxyde semi-conducteur Amorphe (AOS).....	3
I.2.2 Oxyde de Zinc (ZnO).....	5
I.2.3 Le choix du ZnO .....	5
I.2.4Propriétés générales du ZnO .....	6
I.2.4.1 Propriétés structurales .....	7
I.2.4.2 Structure électronique .....	11
I.2.4.3Propriétés optiques et luminescence .....	12
I.2.4.4Propriétés électriques .....	13
I.2.5 Les méthodes de croissance de ZnO .....	14
I.2.5.1 La pulvérisation cathodique .....	14
I.2.5.2 Dépôt par évaporation .....	15
I.2.5.3 L'Epitaxie par Jets Moléculaires .....	16

I.2.5.4 Ablation laser (Pulse Laser Déposition PLD) .....	18
I.2.5.5 Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) .....	19
I.2.5.6 Méthode de sol gel .....	19
I.2.5.7 Dépôt par spray pyrolyse.....	20
I.2.6 ZnO monocristalline .....	21
I.2.7 ZnO polycristalline .....	22
I.2.8 ZnO amorphe .....	23
I.2.9 Les avantages et inconvénients de ZnO amorphe.....	24
I.2.9.1 Les' avantages .....	24
I.2.9.2 Les inconvénients .....	25
I.3 Transistor en couche mince (thin film transistor en Anglais TFT) .....	25
I.3.1 Historique de l'évolution des TFTs .....	25
I.3.2 Fonctionnement du TFT .....	28
I.3.3 Différentes structures de TFT .....	28
I.3.4 Comparaison avec le MOSFET .....	30
I.4 TFT à base d'oxyde de Zinc .....	31
I.4.1 Les figures de mérite du TFT .....	31
I.4.1.1 Caractéristique de transfert $I_{DS}-V_{GS}$ .....	32
I.4.1.2 Caractéristique de sortie $I_{DS}-V_{DS}$ .....	32
I.4.1.3 Courant de drain en état passant de TFT ( $I_{ON}$ ) .....	33
I.4.1.4 Tension de seuil ( $V_{TH}$ ) .....	34
I.4.1.5 Mobilité ( $\mu_{FE}$ ) .....	36
I.4.1.6 Pente sous le seuil (SS) .....	36
I.4.1.7 Rapport $I_{ON}/I_{OFF}$ .....	37
I.4.2 Application du TFT ZnO .....	37
<b>Chapitre II: Analyseur de dispositifs à semi-conducteurs KEYSIGHT B1500A</b>	
II .1 Introduction.....	39

II .2 L'analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A .....	39
II .3 Les accessoires de l'analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A ...	40
II.4 Les module.....	42
II.5 Le logiciel Easy EXPERT .....	42
II.6 Les Étapes pour mesurer les propriétés électriques par Analyseur de dispositif à semi- conducteur KEYSIGHT B1500A .....	43
II.6.1 B1500A Configuration Easy EXPERT .....	43
I.6.2 Ordre de configuration de mesure .....	50
II.7 Les caractéristiques de base .....	51
II .7.1 Capabilités de mesure.....	51
II .7.1 .1 Courants en fonction du voltage (IV) .....	51
II .7.1 .2 Mesure de capacité.....	51
II .7.1 .3 Mesure IV pulsée / IV rapide / IV transitoire .....	52
II.8 Les bibliothèques d'applications prêtes à l'emploi .....	52
Chapitre III : Matériel et méthode	
III .1 Introduction .....	53
III.2 Les caractéristiques $I_D$ - $V_G$ de TFT .....	53
III.2.1 La description de la mesure .....	53
III.3 La procédures expérimentale .....	54
III.3.1 La méthode de mesure .....	54
III.3.2 Modifiez les paramètres de mesure selon les besoins .....	56
III.4 Sauvegarder le résultat de la mesure .....	57
Chapitre IV: Résultats et Discussion	
IV.1 INTRODUCTION.....	58
IV.2 Structure TFT et paramètres de sortie .....	58
IV.2.1 La structure TFT ZnO .....	58
IV.2.2 Paramètres de sortie .....	60

IV.3 Les caractéristiques de transfert et paramètres de sortie .....	61
IV.3.1 Le transistor a-ZnO avec isolant HfO <sub>2</sub> .....	62
IV.3.2 Le transistor a-ZnO avec isolant Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	63
IV.4 La comparaison .....	65
IV.5 Conclusion.....	65
Conclusion générale .....	66
ReferencesBibliographiques .....	67



## Liste de tableau

<b>Tableau I.1:</b> Quelques propriétés générales de ZnO .....	7
<b>Tableau I.2:</b> Rayons ioniques des ions $Zn^{2+}$ et $O^{2-}$ en fonction de la coordinence.....	11
<b>Tableau I.3:</b> quelques propriétés optiques de ZnO.....	12
<b>Tableau II.1:</b> Les accessoires de l'analyseur de dispositif à semi-conducteur Keysight B1500A.....	42
<b>Tableau II.2</b> Certaines applications de L'analyseur de dispositif à semi-conducteurKeysight B1500A sur les dispositifs électroniques .....	52
<b>Tableau III .1:</b> Les paramètres de l'appareil TFT.....	55
<b>Tableau III.2 :</b> Les paramètres de test de TFT.....	55
<b>Tableau IV.1:</b> les paramètres physiques des matériaux constituant les deux transistors.....	59
<b>Tableau IV.2:</b> Les sorties calculées à partir de la caractéristique de transfert de TFT a-ZnO HfO <sub>2</sub> .....	63
<b>Tableau IV.3 :</b> Les sorties calculées à partir de la caractéristique de transfert de TFT a-ZnO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	65

## Liste de figure

<b>Figure I.1</b> : a) Diagramme énergétique des atomes d'Oxygène et de Métal non liés b) Diagramme énergétique d'une liaison ionique Oxygène-métal VBM : Maximum de la bande de valence, CBM : Minimum de la bande de conduction c) Schéma illustrant le minimum de la bande de conduction d'un AOS d) Schéma illustrant le minimum de la bande de conduction d'un oxyde cristallin. Inspirée par.....	<b>4</b>
<b>Figure I.2</b> : Recouvrement des orbitales de type s en fonction de le nombre quantique Principal n. ....	<b>5</b>
<b>Figure I.3</b> : Oxyde de zinc massif (ZnO) sous forme naturelle (a) et (b) et de synthèse hydrothermale (c).....	<b>8</b>
<b>Figure I.4</b> : Structure cristalline de ZnO en phase a) NaCl; b) Zinc blende ; et c) Wurtzite ....	<b>8</b>
<b>Figure I.5</b> : Structure du ZnO en symétrie cubique faces centrée.....	<b>9</b>
<b>Figure I.6</b> : Structure de type «blende» du ZnO.....	<b>9</b>
<b>Figure I.7</b> : Structure de bandes de ZnO. ....	<b>12</b>
<b>Figure I.8</b> : La technique de pulvérisation cathodique. ....	<b>15</b>
<b>Figure I.9</b> : Schéma conventionnel d'une évaporation thermique. ....	<b>16</b>
<b>Figure I.10</b> : Schéma d'un bâti d'épitaxie par jets moléculaires.....	<b>17</b>
<b>Figure I.11</b> : Principe de l'ablation par faisceau laser pulsé.....	<b>18</b>
<b>Figure I.12</b> : Les étapes d'une déposition CVD. ....	<b>19</b>
<b>Figure I.13</b> : Schéma de principe de la synthèse sol-gel d'un oxyde cristallin .....	<b>20</b>
<b>Figure I.14</b> : Schéma synoptique d'un équipement de dépôt par spray pyrolyse.....	<b>21</b>
<b>Figure I.15</b> : Structure cristalline du ZnO (Wurtzite).....	<b>22</b>
<b>Figure I.16</b> : Historique des transistors en couches minces.....	<b>25</b>
<b>Figure I.17</b> : Schéma d'une matrice active pour écran LCD.....	<b>27</b>
<b>Figure I.18</b> : Schéma des structures classiques de TFT sans passivation : a) « empilée » grille Dessus (Top Gate) ; b) « empilée » grille dessous (Bottom Gate) ; c) coplanaire (grille dessus) ; d) coplanaire inversée (grille dessous).....	<b>29</b>
<b>Figure I.19</b> : Structure d'un MOSFET.....	<b>30</b>

<b>Figure I.20</b> : Caractéristique de transfert $I_{DS}-V_{GS}$ d'un TFT n MOS à différente $V_{DS}$ : en Échelle semi logarithme (gauche) ; en échelle linéaire (droite).....	<b>32</b>
<b>Figure I.21</b> : Caractéristique de sortie $I_{DS}-V_{DS}$ d'un TFT de type n à différente $V_{GS}$ .....	<b>33</b>
<b>Figure I.22</b> : Extraction de la tension de seuil en régime linéaire à partir d'une courbe $I_{DS}-V_{GS}$ à $V_{DS} = 0.1$ V.....	<b>35</b>
<b>Figure I.23</b> : Extraction de la tension de seuil en régime linéaire à partir d'une cour $\sqrt{I_{DS}}$ - à $V_{DS} = 10$ V. ....	<b>37</b>
<b>Figure I.24</b> : Extraction de la pente sous le seuil à partir d'une courbe $I_{DS}-V_{GS}$ .....	<b>38</b>
<b>Figure I.25</b> : Exemple d'applications issues de la technologie TFT: (a)téléviseurs LCD, (b) radiographie X, (c) écrans AMOLED de téléphone portable Et (d) écran OLED flexible .....	<b>38</b>
<b>Figure II.1</b> :Représentation de l'appareil analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A.....	<b>39</b>
<b>Figure III.1</b> : L'appareil de l'analyseur à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A montrant le schéma du setup utilisé pour mesurer les caractéristiques $I_D-V_G$ .....	<b>53</b>
<b>Figure III.2</b> : Montre un tracé expérimental pour connecter les transistors à l'appareil Test Fixture à l'aide des câbles. ....	<b>55</b>
<b>Figure IV.1</b> : Structure schématique a- TFT ZnO avec un isolant ( $Al_2O_3$ ).....	<b>58</b>
<b>Figure IV.2</b> : Structure schématique de a- TFT ZnO avec un isolant ( $HfO_2$ ). ....	<b>59</b>
<b>Figure IV.3</b> : Méthodes d'extraction des paramètres de sortie du TFT. ....	<b>61</b>
<b>Figure IV.4.a</b> : La caractéristique de transfert ( $I_{DS}-V_{GS}$ ) du TFT a-ZnO ( $HfO_2$ ) en échelle linéaire.....	<b>62</b>
<b>Figure IV.4.b</b> :La caractéristique de transfert ( $I_{DS}-V_{GS}$ ) du TFT a-ZnO ( $HfO_2$ )en échelle semi logarithmique. ....	<b>62</b>
<b>Figure IV.5.a</b> : La caractéristique de transfert ( $I_{DS}-V_{GS}$ ) du TFT a-ZnO ( $Al_2O_3$ ) en échelle linéaire.....	<b>64</b>
<b>Figure IV.5.b</b> : La caractéristique de transfert ( $I_{DS}-V_{GS}$ ) du TFT a-ZnO ( $Al_2O_3$ ) en échelle semi logarithmique. ....	<b>64</b>

a-ZnO عبارة عن أكسيد نصف ناقل شفاف غير متبلور. وهو مادة واعدة كطبقة فعالة في ترانزستور الطبقات الرقيقة للجيل الجديد للشاشات العرض المسطحة. ترانزستور a-ZnO يملك شفافية عالية، حركية جيدة ويمكن تصنيعه في درجة حرارة الغرفة. في هذا العمل تمت دراسة الخصائص الكهربائية لترانزستور TFT-ZnO بواسطة جهاز محلل لأجهزة أشباه الموصلات KEYSIGHT B1500A يتم عرض تأثير نوع عازل البوابة على خصائص النقل ( $I_D-V_G$ ) وعلى معلمات الترانزستور. حيث أظهرت النتائج المقارنة بين الخصائص الكهربائية (I-V) للترانزستورات الاغشية الرقيقة (ZnO-TFT) مع عازلين مختلفين ( $Al_2O_3$ -HfO<sub>2</sub>)، حيث تسبب تأثير عازل البوابة في تباين كبير في الخصائص بحيث وجد ان جهد العتبة وتيار التسرب ونسبة التيار وحركة الشحنات لترانزستور TFT(HfO<sub>2</sub>) اكبر من TFT( $Al_2O_3$ ).

**الكلمات المفتاحية:** a-ZnO، ترانزستور طبقات الرقيقة (TFT)،  $Al_2O_3$ ، HfO<sub>2</sub>؛ جهاز محلل لأجهزة أشباه الموصلات KEYSIGHT B1500A.

## Résumé

L'a-ZnO est un oxyde amorphe semi-transparent. C'est un matériau prometteur en tant que couche efficace dans le transistor de la nouvelle génération d'écrans plats. Le transistor TFT-ZnO a une haute transparence, une bonne mobilité et est fabriqué à température ambiante. Dans ce travail, les caractéristiques de l'électrode à transistor TFT-ZnO ont été étudiées par un analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A. L'effet du type d'isolant de la grille sur les propriétés de transport ( $I_D-V_G$ ) et sur les paramètres du transistor. L'effet de l'isolant de la grille a provoqué une grande variation des caractéristiques, de sorte que la tension de seuil, le courant de fuite, le rapport de courant et la mobilité de l'effet du champ du transistor TFT (HfO<sub>2</sub>) ont été trouvés supérieures à ceux du TFT ( $Al_2O_3$ ).

**Mots-clés :** a-ZnO, les transistors en couches minces, HfO<sub>2</sub>,  $Al_2O_3$ , l'appareil Analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A.

## Abstract

The a-ZnO is a semi-transparent amorphous oxide. It is a promising material as an effective layer in the transistor of the new generation of flat screens. The ZnO-TFT transistor has high transparency, good mobility and is manufactured at room temperature. In this work, the characteristics of the (ZnO - TFT) transistor electrodes were studied by a semiconductor device analyzer: KEYSIGHT B1500A. The effect of the gate insulator type is displayed on the  $I_D-V_G$  transport properties and the transistor parameters. (I-V) for ZnO-TFT transistors with two different insulators ( $Al_2O_3$  and HfO<sub>2</sub>). The effect of the gate insulator caused a great variation of the characteristics, so that the threshold voltage, the leakage current, the current ratio and transistor mobility were found to be superior for the ZnO-TFT ( $Al_2O_3$ ) than ZnO-TFT (HfO<sub>2</sub>).

**Keywords:** The a-ZnO, thin-film transistor (TFT), HfO<sub>2</sub>,  $Al_2O_3$ , KEYSIGHT B1500A Semiconductor Device Analyzer.



***Introduction***  
***Générale***

## Introduction générale

Les transistors constituent sans doute la plus large part de l'activité microélectronique moderne. Dans ce secteur, un très large effort s'est concentré sur les composants unipolaires, ce sont les composants qui ne reposent que sur le transport d'un seul type de porteurs. Ces composants incluent les transistors à effet de champ [1].

Le transistor en couches minces à base de ZnO amorphe a reçu une très grande attention en particulier en raison de son application dans les écrans à cristaux liquides (LCD)(Liquide Crystal Display en Anglais) [2], les ordinateurs portables, tablettes, téléphones intelligents, etc. [3]

Des études récentes ont montré que la performance des TFT (Thin Films transistor en Anglais) dépend beaucoup du matériau diélectrique de la grille. Il est évalué selon plusieurs critères tels que mesure de la mobilité à effet de champ, tension de seuil, la pente sous le seuil et le Rapport  $I_{ON}/I_{OFF}$ .

Le présent travail est focalisé sur l'étude de l'effet du type d'isolant sur les propriétés électriques des transistors en couches minces d'oxyde de zinc amorphe (a- ZnO).

Pour atteindre cet objectif, notre travail comporte les étapes suivantes :

- Mesure des caractéristique  $I_D-V_G$  du transistor
- Extraire la mobilité à effet de champ ( $\mu_{FE}$ ).
- Extraire la tension de seuil ( $V_{TH}$ ).
- Extraire la pente sous le seuil (S).
- Rapport  $I_{ON}/I_{OFF}$ .

Dans ce contexte, ce mémoire a été organisé en quatre chapitres comme suit :

Le chapitre I est consacré à la présentation des propriétés physiques et électriques de ZnO. De même, une étude bibliographique sur les TFTs à base de ZnO amorphe. Avec leurs applications à l'heure actuelle.

Le chapitre II contient des généralités sur l'appareil Analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A.

Le chapitre III quant à lui, a pour but de présenter les techniques expérimentales utilisées dans le mémoire. Étudier les caractéristiques des TFT et des méthodes utilisées pour extraire leurs paramètres électriques.

Le chapitre IV est consacré à la présentation des résultats expérimentaux de l'effet du type d'isolation de grille sur les transistors à couche mince de ZnO.

Enfin, une conclusion générale complète ce travail.

***Chapitre I***  
***Transistors en***  
***couche mince***  
***(TFT) à base de***  
***ZnO amorphe***



## I.1 Introduction

Avant d'entrer dans les études menées au cours des détails de la mémoire, il ouvrira un chapitre consacré à l'étude des transistors à couches minces (TFT) et est construit sur la base de zinc amorphe. Qui contient les propriétés physiques et chimiques de l'oxyde de zinc amorphe, Les Avantages et les inconvénients de ZnO amorphe et un résumé de l'historique de l'évolution TFTs, des premiers concepts jusqu'à nos jours est suivi par une rapide introduction sur le principe général de leur fonctionnement et leur structures. À la fin du chapitre, il contient les applications TFT ZnO utilisées en mémoire.

## I.2 Propriétés physico-chimiques de l'oxyde Zinc amorphe

### I.2.1 Oxyde semi-conducteur Amorphe (AOS)

Les oxydes semi-conducteurs sont principalement constitués par des oxydes multi composants ternaire ou quaternaire tel que: l'InGaZnO (IGZO), le InZnSnO (IZTO), le ZnSnO (ZTO), HfInZnO (HIZO) [5].

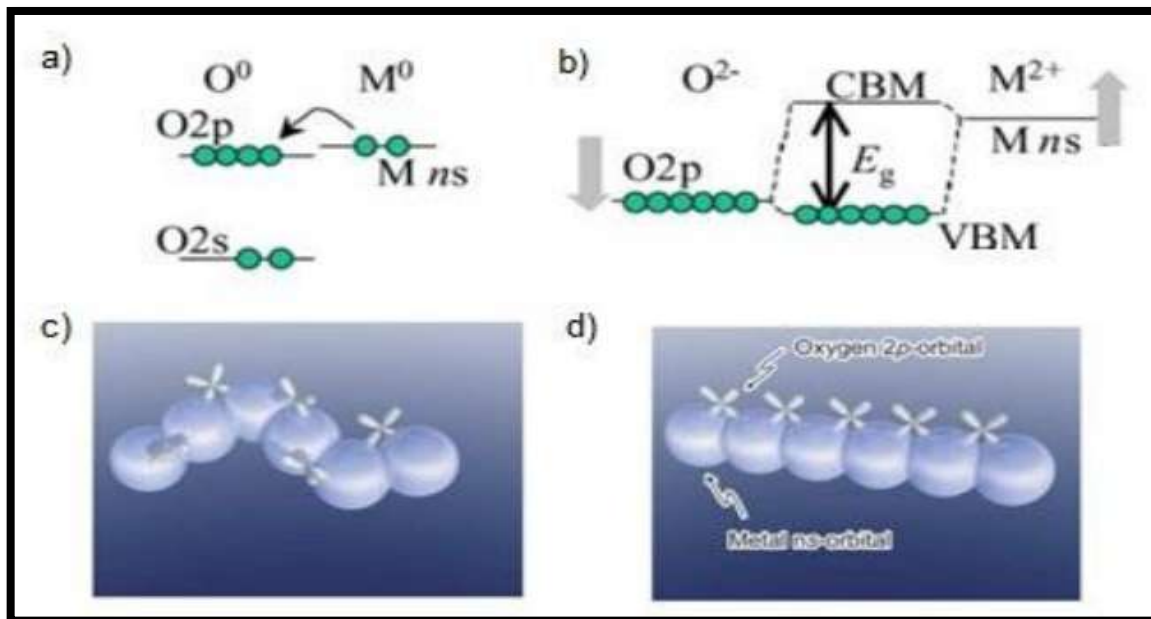
Ces semi-conducteurs ont deux atouts qui les rendent particulièrement attractifs : d'une part, ils sont transparents, d'autre part, ils conservent de bonnes mobilités de porteurs de charge à l'état amorphe. Pour comprendre d'où viennent ces points forts, il est nécessaire de s'intéresser à la liaison métal-oxygène. Cette liaison est principalement ionique : les électrons de l'atome le moins électronégatif sont attirés par l'atome le plus électronégatif. Par définition, dans les oxydes l'atome le plus électronégatif est l'oxygène quel que soit le métal. Ainsi, les électrons de la plus haute orbitale de type  $s$  du métal sont transférés à l'orbitale  $2p$  de l'oxygène Figure I.1.a.

En physique du solide, les bandes de conduction et de valence peuvent être décrites comme une combinaison linéaire des orbitales atomiques impliquées dans la liaison. La bande de valence étant stabilisée par la liaison, elle aura une énergie inférieure à l'orbitale  $2p$  de l'oxygène, et la bande de conduction étant déstabilisée, elle aura une énergie plus haute que celle de l'orbitale  $ns$  du métal Figure I.1.b. Ce phénomène explique pourquoi les oxydes sont généralement transparents.

En effet, la différence d'énergie des orbitales impliquées dans la liaison métal oxygène induit une énergie de gap importante pour les oxydes. Les gaps de ces matériaux se situent

généralement autour de 3eV, mais peuvent aller bien au-delà comme par exemple l'oxyde de magnésium (MgO) qui atteint 7,8 eV [5].

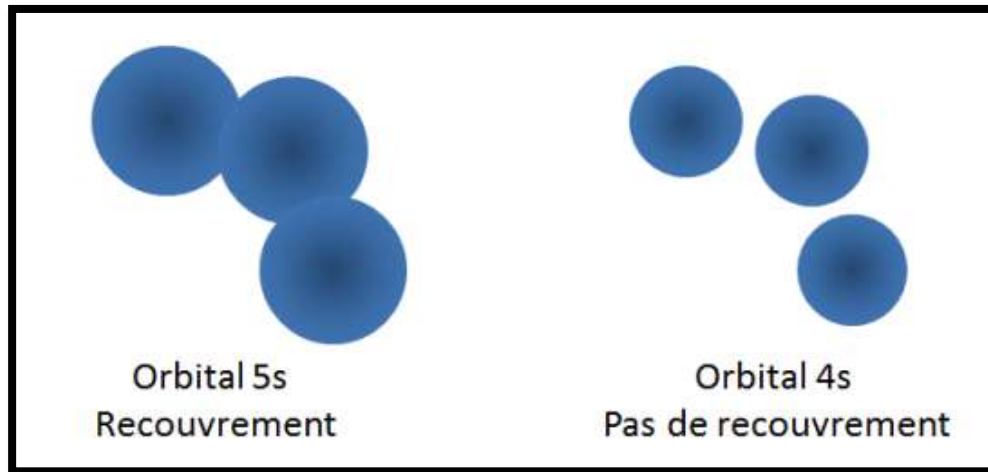
Plus l'énergie d'un orbital est proche de celui d'une bande, plus son coefficient dans la combinaison linéaire ne sera important. Cela implique que la bande de conduction des oxydes est principalement formée par les orbitales de type s des métaux. Ces orbitales sont sphériques, donc leur recouvrement est très peu affecté par la structure amorphe Figure I.1.c ou cristalline Figure I.1.d. La mobilité des porteurs de charges est donc peu affectée par la structure du matériau [5].



**Figure I.1 :** a) Diagramme énergétique des atomes d'Oxygène et de Métal non liés b) Diagramme énergétique d'une liaison ionique Oxygène-métal VBM : Maximum de la bande de valence, CBM : Minimum de la bande de conduction c) Schéma illustrant le minimum de la bande de conduction d'un AOS d) Schéma illustrant le minimum de la bande de conduction d'un oxyde cristallin. Inspirée par [5].

Pour les AOS, une condition supplémentaire est nécessaire pour obtenir de bonnes mobilités. Il est indispensable que les orbitales de types formant la bande de conduction se recouvrent, pour que les électrons puissent emprunter un chemin direct. Pour que cela soit possible les orbitales doivent avoir une taille supérieure à la distance inter-cations. Les cations, issus des métaux pauvres et ayant une configuration électronique  $(n - 1)d^{10}ns^0$  avec  $n \geq 5$  remplissent pleinement cette condition Figure I.2. Dans le cas des oxydes semi-conducteurs

cristallins,  $n \geq 4$  est suffisant pour obtenir le recouvrement entre orbitales car la distance inter-cations est plus faible que dans les matériaux amorphes. C'est pourquoi le ZnO est également un oxyde semi-conducteur très étudié [5].



**Figure I.2 :** Recouvrement des orbitales de type s en fonction de

Le nombre quantique Principal n [5].

### I.2.2 Oxyde de Zinc (ZnO)

L'oxyde de zinc est un composé semi-conducteur transparent de type avec une conductivité naturelle de type n. Les propriétés notables de ZnO sont sa largeur directe (3.27 eV) à température ambiante et son énergie de liaison d'exciton élevée (60 meV) qui est très supérieure à celle de certains matériaux couramment utilisés tel que ZnSe (20 meV) et GaN (25 meV) [6].

La non-toxicité et l'abondance de ZnO sur la terre font de lui un candidat idéal utilisé comme contact électrique transparent pour les cellules solaires en couches minces. Ce matériau est d'une grande importance dans le domaine de l'optoélectronique et de la photovoltaïque et peut être utilisé dans plusieurs applications dans différents domaines scientifiques et industriels tels que les transducteurs piézoélectrique, les guides l'onde, détecteurs à gaz, électrodes transparentes conducteurs [6].

### I.2.3 Le choix du ZnO

Le ZnO est reconnu comme un semi-conducteur prometteur dans les dispositifs électroniques modernes tels que les cellules solaires, les LED (light-emitting diode), les capteurs piézoélectriques. Transducteurs, diodes laser, capteurs de gaz, etc., grâce à sa large bande gap (3,37 eV) et énergie de liaison à forte excitation (60 meV). De nombreux chercheurs ont utilisé le ZnO comme matériau actif dans les transistors à film (TFT) en raison de leur grande mobilité d'effet de champ, et haute stabilité thermique et chimique [7].

#### I.2.4 Propriétés générales du ZnO

Pendant de nombreuses années, les principales applications de l'oxyde de zinc se sont situées dans les domaines de l'industrie chimique et pharmaceutique. Actuellement de nouvelles voies de recherches en optoélectronique suscitent un très vif intérêt pour ce matériau car ses propriétés sont multiples: grande conductivité thermique, grande capacité calorifique, constante diélectrique moyenne, haute résistivité, faible absorption d'eau. Il est important de noter que sous sa forme pigmentaire, il diffuse et absorbe fortement les rayonnements ultraviolets [8].

Le ZnO est un semi-conducteur de large gap, il est transparent dans le visible et dans le proche infrarouge. Il présente un ensemble de propriétés qui permettent son utilisation dans un certain nombre d'applications comme par exemple des varistances employées pour limiter de grandes coupures de tension (dispositifs électroniques en céramique polycristallins possédant des caractéristiques courant-tension non linéaires). Il peut également trouver des applications en optoélectronique, cathodoluminescence, photoluminescence, électroluminescence, comme capteur de produit chimique dans les couches minces [8].

Il possède aussi des propriétés électromécaniques très intéressantes, ce qui lui permet d'être utilisé, à grande échelle, comme conducteur transparent dans les dispositifs acoustiques et dans les lignes à retard micro-ondes ou encore comme matériel piézoélectrique. [8]. Le tableau 1 illustre quelques propriétés générales de ZnO :

Propriété	Valeur
$a_0$	0,32495 nm
$c_0$	0,52069 nm
$c_0/a_0$	1,6002(1,633 pour la structure hexagonale idéale)

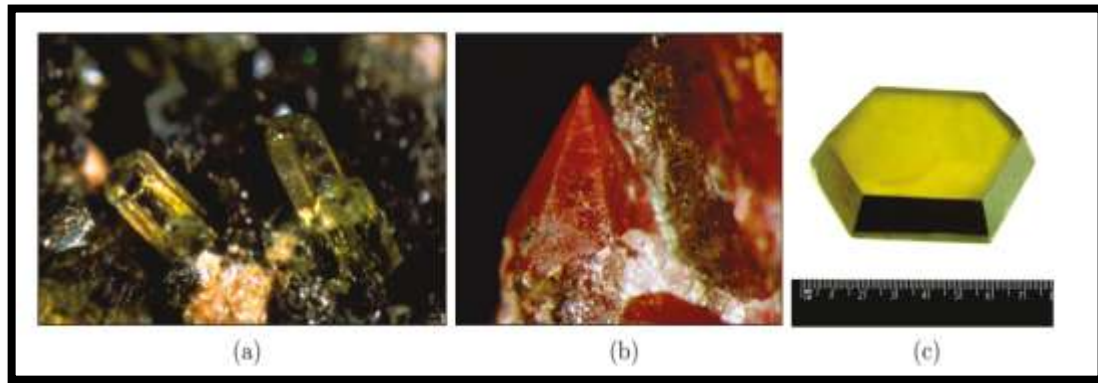
Masse volumique	5,606 g cm <sup>-1</sup>
Phase stable à 300k	Wurtzite
Point de fusion	1975°C
Coefficient d'expansion linéaire (/°C)	$a_0 : 6.510^{-6}$ $c_0 : 3.010^{-6}$
Conductivité thermique	1-1,2 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Permittivité relative	8,656
Indice de réfraction	2,008-2,029
Energie de la bande interdite (gap)	3,4 eV (directe)
Concentration de porteurs intrinsèques	$< 10^6 \text{ cm}^{-3}$
Energie de liaison des excitons	60meV
Masse effective de l'électron	0.24
Mobilité Hall de l'électron à 300k pour une conductivité de type n faible	200cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> S <sup>-1</sup>
Masse effective du trou	0.59
Mobilité Hall du trou à 300k pour une conductivité de type p faible	5-50cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> S <sup>-1</sup>

**Tableau I.1:** Quelques propriétés générales de ZnO [6].

#### I.2.4.1 Propriétés structurales

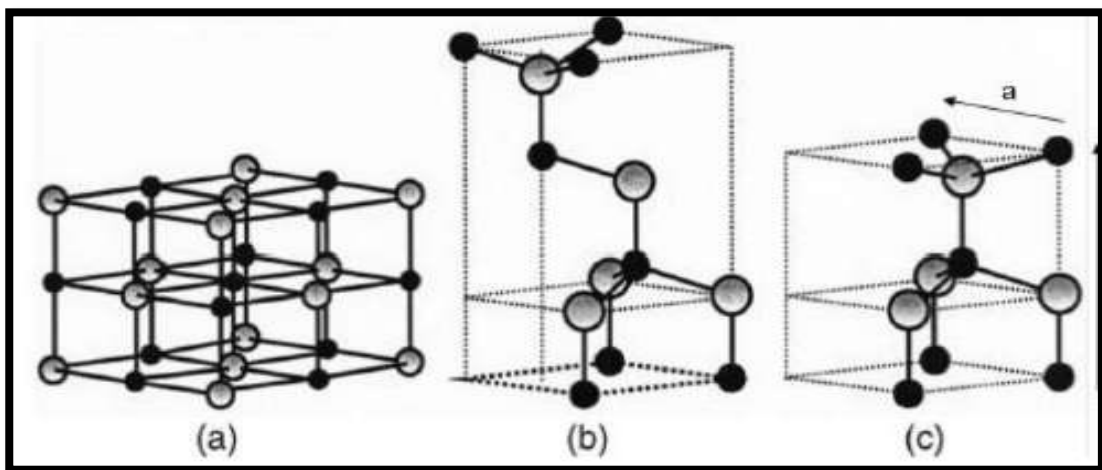
L'oxyde de zinc (ZnO) que l'on trouve dans la nature est connu sous le nom de Zincite Figure I.3. Il peut se présenter sous trois différentes formes cristallines Figure I.4 :

- ✓ Structure de type «NaCl».
- ✓ Structure de type «blende».
- ✓ Structure de type «wurtzite».



**Figure I.3:** Oxyde de zinc massif (ZnO) sous forme naturelle (a) et (b)

et de synthèse hydrothermale (c)[9].

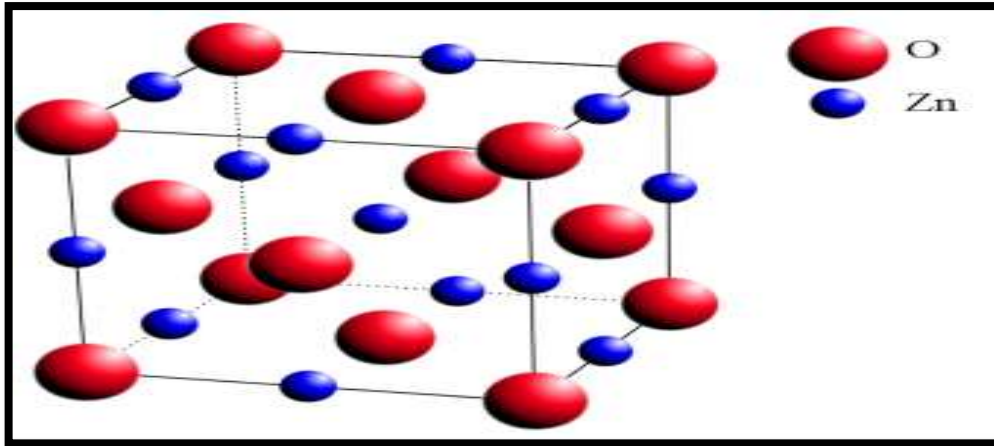


**Figure I.4 :** Structure cristalline de ZnO en phase a) NaCl; b) Zinc blende ;

Et c)Wurtzite [10].

La structure cubique de type «NaCl» Figure I.5 est une forme du ZnO qui n'apparaît que pour des pressions supérieures à 10 GPa. Le paramètre de maille et le groupe d'espace de ce cristal sont respectivement :  $a = 0,428 \text{ nm}$  et  $Fm\bar{3}m$  (JCPDS (International Centre for Diffraction Data Sampler Préparation Méthodes in X-Ray Powder Diffraction) No. 77-0191). D'un point de vue thermodynamique, la transition wurtzite  $\rightarrow$  NaCl du ZnO n'est pas totalement réversible (hystérésis) pour une température de 300 K. Pourtant, cette tendance hystérétique de la transition structurale du ZnO diminue à mesure que la température augmente. Dès lors que la température atteint 1200 K, pour une pression de 6 GPa, la transition devient purement

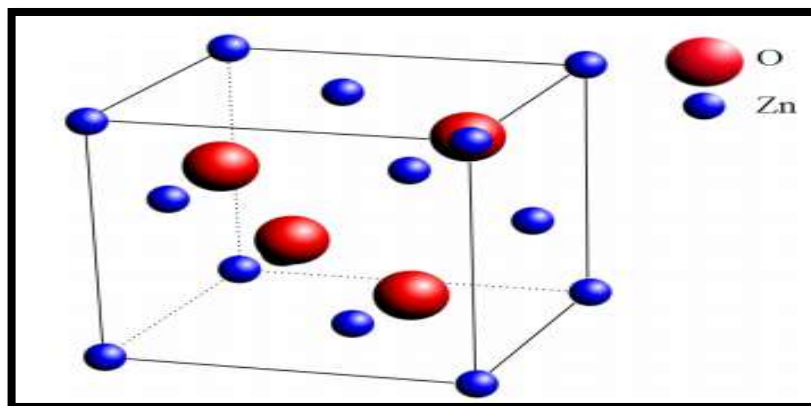
réversible (équilibre thermodynamique). En deçà d'une pression de 2 GPa, il n'est plus possible de maintenir cette forme par une trempe thermique [10].



**Figure I.5:** Structure du ZnO en symétrie cubique faces centrée.

Le type «blende» Figure I.6 est une autre structure cubique possible pour le ZnO. Cette structure possède respectivement, pour paramètre de maille et de groupe d'espace,  $a = 0,458$  nm et F43m. Tout comme précédemment, c'est une phase métastable difficile à stabiliser.

Cependant, Ashraf *et al.* ont réussi à obtenir cette phase à partir d'un film de ZnO sur un substrat de GaAs orienté (001) doté d'une couche tampon de ZnS entre le substrat et le film.



**Figure I.6:** Structure de type «blende» du ZnO.



Dans les conditions standards de pression et de température, cette structure est la plus stable.

Le positionnement des atomes se fait de la manière suivante:

- Atomes de zinc:  $(0;0;0)$  et  $(1/3;2/3;1/2)$ .

- Atomes d'oxygène :  $(0 ; 0 ; u)$  et  $(1/3 ; 2/3 ; 1/2+u)$ .

La quantité  $u$  indique la distance entre l'atome de zinc et l'atome d'oxygène suivant la direction de l'axe  $c$ . Si le réseau est dit «idéal», alors la valeur de  $u$  est : 0,375. Dans le cas contraire, une variation de  $u$  indique que les paramètres de maille sont modifiés. Les modifications éventuelles sont mesurées expérimentalement soit par diffraction des rayons X ou par microscopie électronique en transmission. Par la détermination des paramètres  $a$  et  $c$ , il est possible de déduire le paramètre  $u$  par la relation (I.1):

$$u = \frac{1}{3} \left( \frac{a}{c} \right)^2 + \frac{1}{4} \quad (\text{I.1})$$

Cette relation peut être utilisée pour des films déposés sur des substrats de natures différentes. En effet, un film de ZnO sur un substrat voit ses paramètres de maille changés pour pouvoir s'adapter aux contraintes soumises par ce substrat. Ces contraintes à l'interface sont introduites par le désaccord entre les paramètres de maille du film et du substrat. La structure de type «wurtzite» du ZnO n'offre qu'une seule symétrie de site sur lequel peut s'introduire les dopants ou même les atomes de zinc ou d'oxygène. Effectivement, les sites sont de coordination 4 (tétraédrique). Sachant que la symétrie des sites influe sur la taille des ions dans le cristal, nous pouvons connaître les rayons ioniques du zinc et de l'oxygène.

Dans le Tableau I.2 nous avons répertorié les rayons ioniques pour les ions  $Z^{+2}$  et  $O^{-2}$  en fonction de la symétrie du site. Dans le cas du ZnO, il faut utiliser les valeurs de rayons ioniques pour une coordination 4 (valeurs en gras) [10].

La compacité de cette structure est d'environ 50 %. Ceci permet d'insérer des dopants soit à la place du zinc soit dans un site interstitiel. Le rayon de ce site interstitiel est de l'ordre de 95 pm [10].

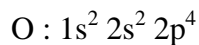
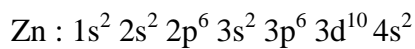


<i>Ions</i>	<i>Coordinance</i>	<i>Rayon ionique (pm)</i>
$Zn^{+2}$	4	60
	6	74
	8	90
$O^{-2}$	4	138
	6	140
	8	142

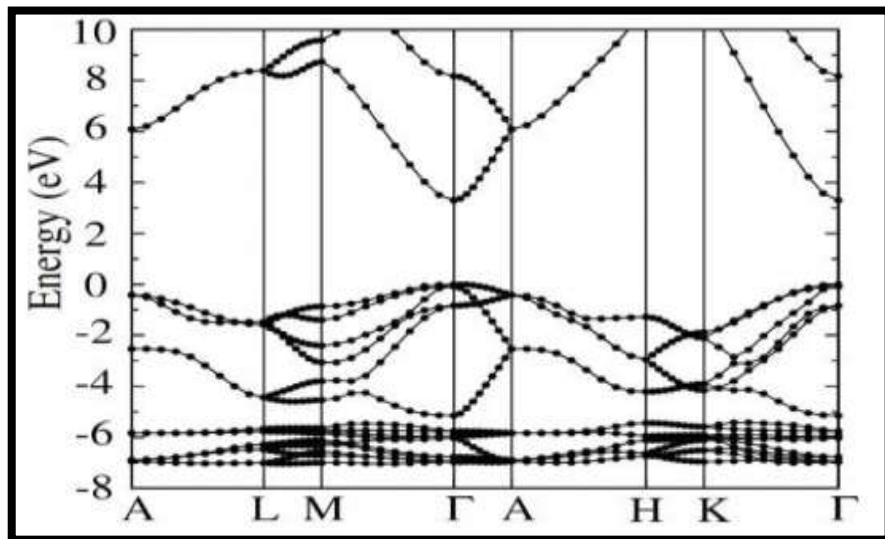
**Tableau I.2:** Rayons ioniques des ions  $Zn^{2+}$  et  $O^{2-}$  en fonction de la coordiance.

#### I.2.4.2 Structure électronique

On rappelle que la structure électronique de l'oxygène et de zinc a ces configurations:



Les états 2p de l'oxygène forment la bande de valence, les états 4s de zinc constituent la zone de conduction. L'observation de la figure I.7 montre que le ZnO est un semi-conducteur à gap direct, le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont situés au point  $\Gamma$  de la zone de Brillouin. ZnO est un semi-conducteur à gap direct dont la largeur de la bande interdite est de l'ordre de 3.3 eV. D'autre part, le ZnO possède une bande excitonique très large (= 60 meV) qui est la plus large dans la famille II-VI. Ce qui permet l'observation de l'effet excitonique même à température ambiante [11].



**Figure I.7:** Structure de bandes de ZnO [12].

#### I.2.4.3 Propriétés optiques et luminescence

L'oxyde de zinc est un matériau transparent dont l'indice de réfraction sous la forme massive est égal à 2 [13]. Sous forme de couche mince, son indice de réfraction et son coefficient d'absorption varient en fonction des conditions d'élaboration [6]. Le tableau I.3 indique quelques propriétés optiques de ZnO.

Propriété optique	Les valeurs
Constante diélectrique	$\epsilon_{\parallel} = 8.7, \epsilon_{\perp} = 7.8$
Coefficient d'absorption	$10^4 \text{ cm}^{-1}$
Indice de réfraction à 500 nm	1.8-1.9
Indice de réfraction à 590 nm	2.013-2.029
Largeur de la bande excitonique	60 meV
Transmittance	> 90%

**Tableau I.3:** quelques propriétés optiques de ZnO [6].

Comme la luminescence dépend du dopage du matériau, on utilise cette propriété dans les dispositifs optoélectroniques comme les écrans à tubes cathodiques, les diodes électroluminescentes pour l'affichage couleur, la signalisation ou l'éclairage. Récemment, l'émission des films de ZnO a été étudiée intensivement en raison de son efficacité lumineuse élevée, de sa propriété non ohmique et de sa grande énergie de liaison d'excitation (60 meV). Celle-ci est plus grande que celle de ZnS (20 meV) et de GaN (21 meV) et de plus, ZnO peut être préparée à une plus basse température que ces deux autres matériaux [6].

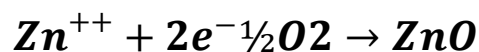
#### I.2.4 Propriétés électriques

En générale le ZnO est un semi-conducteurs de type n, la grande conductivité des couches d'oxydes purs est due à la forte concentration en porteur (électrons), étant donné que la mobilité dans ces couches est considérablement plus faible que celle en volume du matériau correspondant, La forte concentration en électrons est attribuée à la déviation par rapport à la stœchiométrie.

L'oxyde de zinc (ZnO) est un matériau à gap direct .Il y a une certaine anomalie dans la littérature concernant l'énergie du gap ; Srikant et Clarke réclament que le gap d'énergie à la température ambiante de ZnO est de 3.3 eV , tandis qu'une bande de valence à la transition de niveau de donneur à 3.15 eV explique le fait qu'une plus petite valeur (typiquement 3.2 eV) est souvent rapportée. Ainsi, le gap à la température ambiante de ZnO peut être placé dans la gamme 3.2 à 3.3 eV[14].

La conductivité élevée ( $>5000\Omega^{-1}cm^{-1}$ ) est possible dans le ZnO de type n, en raison des défauts intrinsèques, des dopants( Al , In , Ga , B,F ) ou en combinaison [15].Les mobilités rapportés des électrons dans les couches minces ZnO sont typiquement de l'ordre  $\sim 20$  à  $30\text{ cm}^2/V \cdot s$  : par contre la mobilité maximale obtenue dans les cristaux simples de ZnO est  $\sim 200\text{ cm}^2/V \cdot s$  .

La déviation à la stœchiométrie peut être due aux lacunes d'anions ou à un excès d'ions en position interstitielle, La nature exacte des défauts de structure dans la plupart des cas est encore incertaine. La réaction de formation de ZnO stœchiométrie :



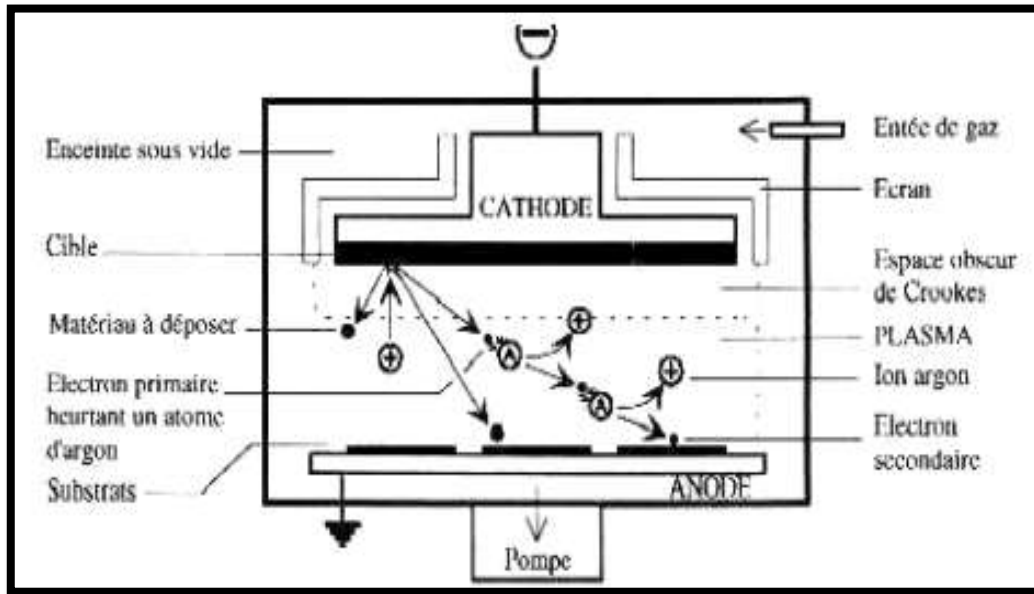
Actuellement, la conductivité de type p a été obtenue par T.Aoki et al en 2001 [16] était impossible avant.

### **I.2.5 Les méthodes de croissance de ZnO**

L'oxyde de zinc est l'un des matériaux fonctionnels les plus prometteurs en raison de ses propriétés catalytiques, électriques, optoélectroniques et piézoélectriques [17]. Les couches minces de ZnO ont été préparées par beaucoup de techniques comme : L'évaporation thermique, La pulvérisation cathodique, L'Épitaxie par Jets Moléculaires, Ablation laser, Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD), Sol gel, spray pyrolyse...etc. [18]

#### **I.2.5.1 La pulvérisation cathodique**

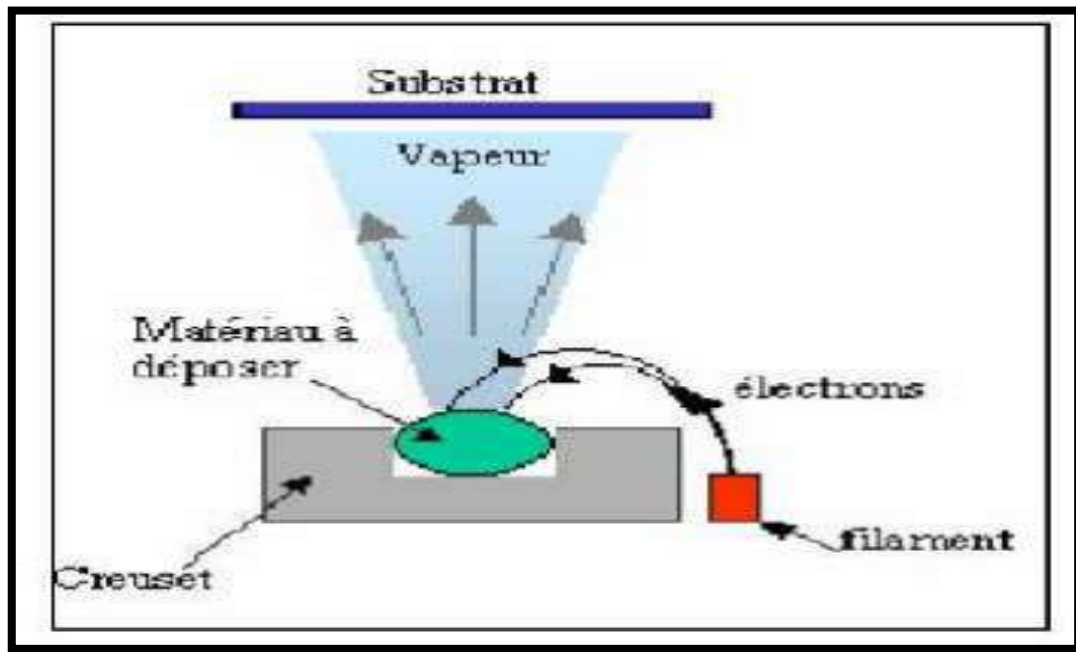
La pulvérisation cathodique (« sputtering » en anglais) est l'une des techniques les plus anciennes. Des ions lourds d'un gaz rare, généralement  $Ar^+$ , sont accélérés sous une forte tension jusqu'à la cathode constituée du matériau cible à déposer. Les atomes de surface vont alors être arrachés et projetés vers le substrat refroidi afin de s'y déposer. Ce processus se déroule toujours dans une chambre à vide où l'on place la cible et le substrat. Les ions de bombardement sont créés à partir d'argon, qui est introduit dans la chambre à vide pour en abaisser la pression. L'avantage de la méthode de pulvérisation cathodique est de pouvoir réaliser des dépôts sous atmosphères contrôlées. Cependant, le coût trop élevé de l'installation, associé à un faible taux de production fait de la pulvérisation cathodique une technique réservée à des applications spécifiques réduites [19].



**Figure I.8:** la technique de pulvérisation cathodique.

### I.2.5.2 Dépôt par évaporation

La technique d'évaporation thermique est très simple et consiste simplement à chauffer par effet Joule un matériau qui, vaporisé, va se déposer sur les substrats. La charge du matériau à déposer est placée dans un creuset (généralement en tungstène). Cette technique est applicable notamment pour le dépôt métallique. La température d'évaporation de ce métal étant inférieure à la température de fusion du creuset. La figure I.9 montre le principe de cette. Afin d'améliorer l'homogénéité des couches déposées (très faible variations d'épaisseur), on fait tourner en permanence les substrats. Dans le but d'augmenter la vitesse du film mince l'évaporation est effectuée sous un vide poussé (pression de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $10^{-4}$  Pa) [20].



**Figure I.9:** Schéma conventionnel d'une évaporation thermique [20].

### I.2.5.3L'Epitaxie par Jets Moléculaires

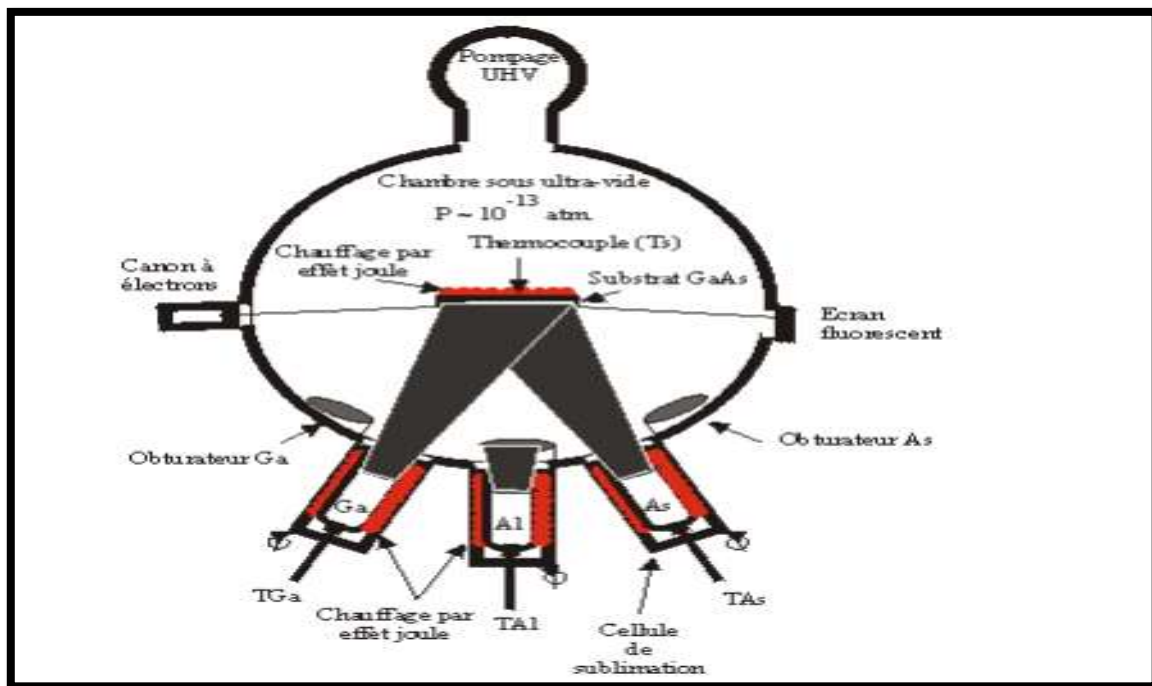
L'Epitaxie par Jets Moléculaires (EJM) est une technique de croissance de couches minces. La figure I.10 présente une vue schématique d'un bâti d'épitaxie. Un substrat monocristallin est porté à une température  $T_S$  déterminée et des flux atomiques ou moléculaires réagissent à la surface, menant si les conditions sont adéquates à la formation d'une couche de matériau semi-conducteur de haute qualité cristallographique. Il faut pour cela que la température du substrat soit supérieure à celle de la cellule d'éléments V ( $T_V$ ) et inférieure à celle de la cellule d'éléments III ( $T_{III}$ ), soit :

$$T_N < T_V < T_{III}$$

Prenons le cas de l'arséniure de gallium, dont l'épitaxie est typiquement réalisée à une température de substrat de 600 °C. Pour que le matériau soit rigoureusement composé d'un atome de gallium pour un atome d'arsenic, la croissance doit se faire en excès d'éléments V. En effet, si la condition des trois températures est respectée, avec typiquement une source de

gallium portée à 900 °C et une source d'arsenic aux environs de 250 °C, les atomes de gallium se condensent au contact de la surface. A l'inverse, les atomes d'arsenic s'évaporent et ne se fixent en surface que sur des atomes de gallium (un atome d'arsenic se fixe pour un atome de gallium). Cela permet donc d'obtenir un composé comportant autant d'atomes d'arsenic que de gallium tant que les éléments V sont en excès. La vitesse de croissance ne dépend alors que du flux d'éléments III, qui est lui-même contrôlé par la température de la cellule. La croissance est réalisée sous ultravide pour limiter au maximum les risques de pollution (pression de l'ordre de  $10^{-11}$  Torr hors croissance, voisine de  $10^{-6}$  Torr en croissance).

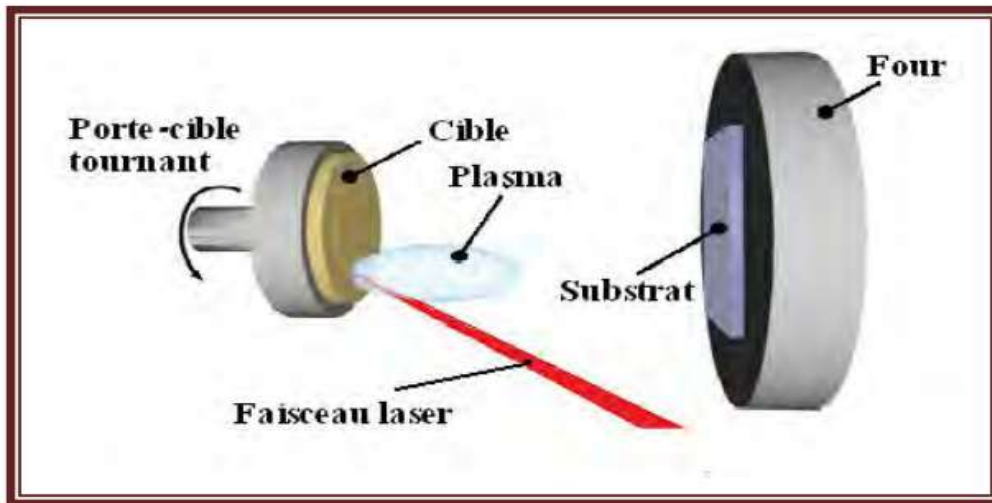
La vitesse de croissance est faible (de l'ordre du micron par heure, soit environ une mono couche par seconde pour les matériaux III-V) ; de plus, des caches peuvent s'interposer entre la cellule et le substrat, stoppant ainsi brutalement la croissance et permettant un bon contrôle de l'épaisseur déposée.



**Figure I.10:** schéma d'un bâti d'épitaxie par jets moléculaires [21].

Un autre avantage de l'EJM est la possibilité de contrôler in situ les conditions de croissance grâce à la diffraction d'électrons à haute énergie en incidence rasante (RHEED). Les diagrammes de diffraction donnent en direct des informations sur l'état de la surface particulièrement sur les reconstructions [21].

#### I.2.5.4 Ablation laser (Pulse Laser Déposition PLD)



**Figure I.11** : Principe de l'ablation par faisceau laser pulsé [22].

Le principe de base de la PLD est schématisé sur la figure I.11 ci-dessus. La technique consiste à focaliser un rayonnement laser intense à travers le hublot d'une enceinte à vide sur la surface d'une cible massive où le faisceau est partiellement absorbé.

A partir d'une certaine densité de puissance fournie à la cible, une quantité significative de matière est arrachée de la cible sous la forme d'une vapeur dense et lumineuse (plasma) dont la forme rappelle celle d'une plume. Le seuil de densité de puissance à partir duquel une telle plume se développe dépend du matériau cible, de sa morphologie mais aussi et surtout des caractéristiques de la source laser comme la longueur d'onde et la durée de l'impulsion [22].

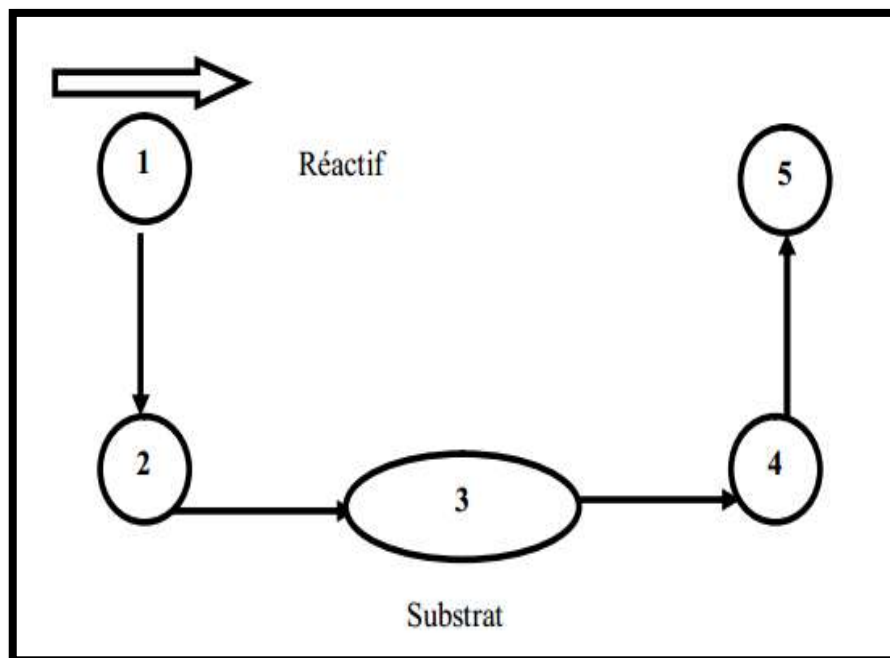
Ce seuil d'ablation est très généralement de l'ordre de 10 à 50 MW/cm<sup>2</sup> pour les lasers de type UV (Ultraviolet-Visible). Un substrat est situé à quelques centimètres face à la cible et les espèces de la plume d'ablation viennent se condenser à sa surface. La croissance du film est obtenue par impulsion après impulsion. Au cours du procédé de croissance, un gaz neutre ou réactif peut être introduit dans l'enceinte, qui peut affecter les espèces de la plume ou en surface du film en croissance. Le substrat peut également être chauffé durant la croissance pour apporter de l'énergie supplémentaire aux espèces adsorbées et ainsi favoriser la cristallisation du film mince [22].



### I.2.5.5 Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est un procédé au cours duquel un film solide est formé sur un substrat, via une ou plusieurs réactions chimiques, à partir d'une phase gazeuse. Des composés volatils contenant les atomes constitutifs du matériau à élaborer, les précurseurs, sont transportés sous forme de vapeurs, par un gaz porteur neutre comme l'azote ou l'argon vers un substrat chauffé.

La déposition par les procédés CVD suit les étapes suivantes : 1- Diffusion du réactif vers la surface du substrat, 2- L'adsorption du réactif, 3- La réaction chimique, 4- La désorption des gaz produits, 5- Diffusion des gaz hors de la surface du substrat [23].



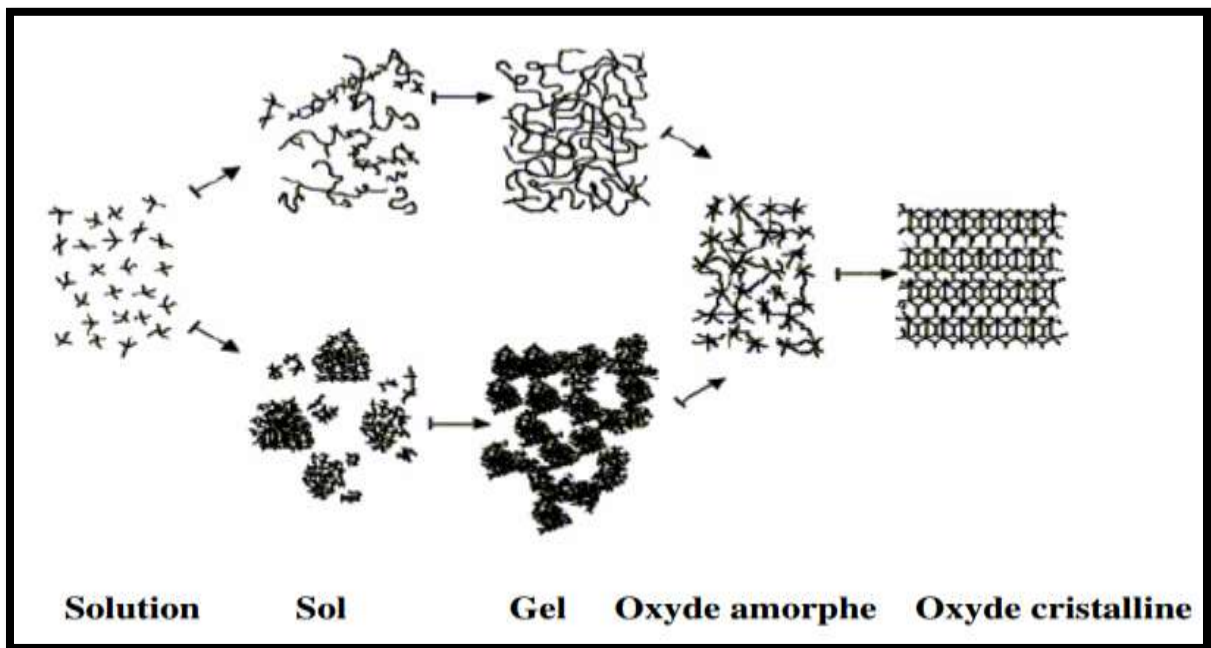
**Figure I.12 :** Les étapes d'une déposition CVD [23].

### I.2.5.6 Méthode de sol gel

Lors d'une synthèse par voie sol-gel, les précurseurs moléculaires contenus dans la solution de départ (« le sol ») polymérisent suivant divers mécanismes et forment un réseau d'oxydes (« le gel »). Une étape de séchage suivie de traitements thermiques permet d'éliminer les composés organiques pour former le matériau oxyde inorganique. Le procédé sol-gel est

particulièrement bien adapté à la fabrication de matériaux homogènes, sous forme de poudres et de films, avec des performances optiques élevées. Les différentes étapes qui interviennent dans la synthèse sol-gel sont schématisées sur la figure I.13.

Cette technique présente de nombreux avantages. Parmi les plus significatifs, citons la très grande pureté et l'homogénéité des solutions liées au fait que les différents constituants sont mélangés à l'échelle moléculaire en solution, les contrôles de la porosité des matériaux et de la taille des nanoparticules [19].



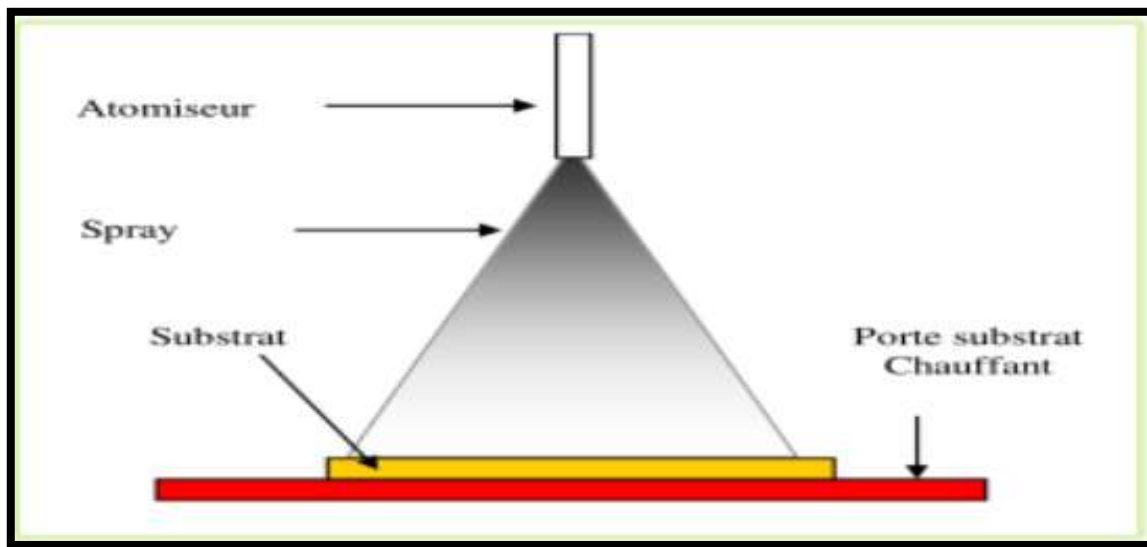
**Figure I.13:** Schéma de principe de la synthèse sol-gel d'un oxyde cristallin [19].

### I.2.5.7 Dépôt par spray pyrolyse

Le spray pyrolyse est une technique de dépôt utilisée pour préparer les films minces et épais. A la différence de beaucoup d'autres techniques de dépôt de film, le spray pyrolyse représente une méthode très simple, n'exige pas de produits chimiques de haute qualité. Cette méthode a été utilisée pour le dépôt des films denses et poreux. Même des films multicouches peuvent être facilement préparés en utilisant cette technique. L'équipement typique du spray pyrolyse se compose d'un atomiseur, une solution de précurseur, réchauffeur de substrat et un régulateur de température. Les atomiseurs ultrasoniques sont utilisés dans la technique de

spray pyrolyse. Dans un atomiseur ultrasonique les fréquences ultrasoniques produisent les ondes courtes nécessaires pour l'atomisation fine.

Le dépôt de couches minces par la technique spray pyrolyse se traduit par la pulvérisation d'une solution d'un sel de métal sur un substrat chauffé figure I.14. Les gouttelettes arrivant sur le substrat conduisent à la formation d'un dépôt après décomposition et réaction chimique en surface [24].

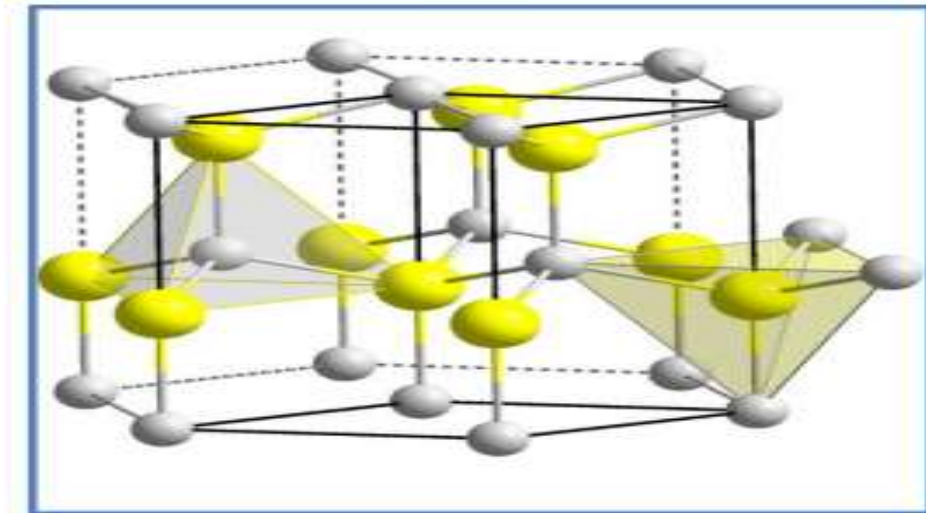


**Figure I.14:** Schéma synoptique d'un équipement de dépôt par spray pyrolyse [24].

### I.2.6 ZnO monocristalline

L'oxyde de zinc et les composés et alliages associés sont les oxydes métalliques semi-conducteurs les plus étudiés, utilisés comme matériaux actifs dans les dispositifs électroniques et optoélectroniques. Applications dans les transistors à couche mince, la lumière Les diodes émettrices, les photos détectrices et photo détecteurs UV sont réalisables en raison de leur stabilité chimique et de leurs propriétés électroniques et physiques exceptionnelles. Le ZnO est transparent dans tout le spectre visible, a une large bande interdite (directe) ( $E_g \sim 3.37$  eV), une grande mobilité électronique et une grande énergie de liaison des excitons ( $\sim 60$  meV). Il se cristallise sous forme de mélange de zinc cubique ou de structure hexagonale de Wurtzite, le latter étant la forme la plus stable thermodynamiquement dans les conditions ambiantes. À

des températures et pressions relativement élevées, la structure cristalline du sel de roche (NaCl) peut également être formée. La figure I.15 montre la Structure cristalline du ZnO (Wurtzite). Dans cette structure, chaque cation est entouré de quatre anions situés aux coins d'un tétraèdre et vice versa, avec une coordination de nature de liaison covalente typiquement  $sp^3$ [25].



**Figure I.15:** Structure cristalline du ZnO (Wurtzite) [26].

On peut obtenir des monocristaux de ZnO en utilisant des substrats appropriés au moyen de techniques de dépôt très contrôlées telles que le dépôt par laser pulsé (PLD), le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et l'épithaxie par jet moléculaire (MBE)...etc.[26]

### **I.2.7 ZnO polycristalline**

Le ZnO polycristallin a été activement étudié dans de nombreux domaines et potentiellement utilisables comme électrodes transparentes dans les dispositifs d'affichages, en technologie des cellules solaires, diodes émettrices de lumière (LED et OLED), Transistor en couche mince... [Gao, 2004]. Combiné à toutes ces propriétés, son faible coût place donc l'oxyde de Zinc en bonne position en vue d'applications industrielles. Où ils ont été déposés par des techniques de croissance suivant : Sol-gel, Spray pyrolyse, CVD, Evaporation thermique, pulvérisation cathodique, Ablation laser et MBE... etc. Où utiliser des techniques d'analyse à

étudier les caractérisations des couches minces d'oxyde de zinc polycristalline comme : La diffraction des rayons X (DRX), la microscopie électronique à balayage (MEB), les spectroscopies UV-Vis-proche infrarouge...etc. Où l'étude par les techniques d'analyses a montré que [27]:

- Les résultats de la DRX ont montré la formation de ZnO polycristallin de structure hexagonale de type wurtzite dans tous les échantillons traités à des températures supérieures à 300 °C [27].

- La micrographie des surfaces effectuées par microscopie électronique à balayage (MEB) des couches minces de ZnO a mis en évidence la dépendance de la morphologie de la technique utilisée pour le dépôt et de la température de recuit [27].

-Les images AFM (Atomique force microscope) ont montré des surfaces granulées avec des rugosités qui dépendent de la technique utilisée pour le dépôt [27].

-La caractérisation optique par transmission et absorption dans l'UV-Vis-proche infrarouge ont révélé que les films déposées sont transparent (77 % à 87 %).et gap optique est comprises entre 3.21 eV et 3.40 eV pour toutes les techniques [27].

## **I.2.8ZnO amorphe**

Le matériau ZnO est un semi-conducteur typique du groupe 2B-6A, un groupe avec une bande interdite directe large et des rapports surface / volume plus élevés pour une utilisation potentielle dans différentes technologies, Telles que les capteurs de gaz de taille nanométrique. Parmi les matériaux semi-conducteurs, le ZnO est un métal de transition qui possède des propriétés physiques uniques et convient très bien à applications dans les dispositifs électroniques et optiques. Récemment, l'oxyde d'étain indium (ITO), l'oxyde de zinc dopé à l'aluminium (AZO: F) et l'oxyde d'étain indium dopé au fluor (ITO: F) ont été largement appliqués dans l'industrie des semi-conducteurs. Deux types de structures de film sont étudiés, ceux des films polycristaux et non poly cristaux. Parce qu'il est facile pour un film poly cristal de percer des ondulations répétées, des films non polycristallins ont été développés pour améliorer ce défaut. Des études expérimentales ont montré que les films d'oxyde de zinc amorphe présentaient d'autres caractéristiques intéressantes; par exemple, dans optiques, ils peuvent adsorber efficacement la lumière ultraviolette. En outre, le film d'oxyde de zinc amorphe évite non seulement l'hétéromorphisme, mais peut également être

synthétisé à basse température. Diverses études expérimentales ont porté sur le processus de production du ZnO monocristallin, mais les études sur le ZnO amorphe font encore défaut. Cependant, le film mince semi-conducteur amorphe possède certains avantages qui permettent au solide amorphe de remplacer le matériau cristallin. Les matériaux Crystal ZnO ont une dureté faible, car le film de ZnO est formé sur l'axe à (0002) perpendiculairement au substrat, la couche d'interface absorbant les défauts causée par un grand mésappariement du réseau. Le film mince amorphe est moins cher à produire que la forme cristalline et peut être fabriqué à une température plus basse, même à la température ambiante. Des recherches expérimentales ont décrit le film mince amorphe de ZnO méthodes de fabrication telles que le magnétron à fréquence radio pulvérisation cathodique, épitaxie par jets moléculaires (MBE), dépôt au laser à impulsions (PLD), sol-gel, dépôt en phase vapeur par procédé chimique organométallique (MOCVD), et procédé de recuit de préchauffage final, qui peuvent tous utiliser différents matériaux de substrat et réguler la température, D'autres conditions. Une série de structures internes cristallines ont été analysées par analyse DRX et des films minces amorphes en ZnO ont été cultivés sur différents substrats matériels par différentes méthodes. Les propriétés des structures de films de ZnO amorphes dépendent fortement sur l'environnement de croissance, en particulier le substrat matériaux et température. Les références mentionnent différentes surfaces cristallines développées observées lors du processus de trempe de films amorphes de ZnO et concluent que les modifications de la structure interne dépendent de la température. Cette étude porte sur les structures moléculaires internes du ZnO amorphe et utilise une méthode simple et efficace pour configurer le modèle [28].

## **I.2.9 Les avantages et inconvénients de ZnO amorphe**

### **I.2.9.1 Les' avantages**

Le ZnO amorphe peut être préparé à basse température et s'est avéré bien adapté pour déterminer la constante optique du film de ZnO amorphe sur une large plage spectrale [28].

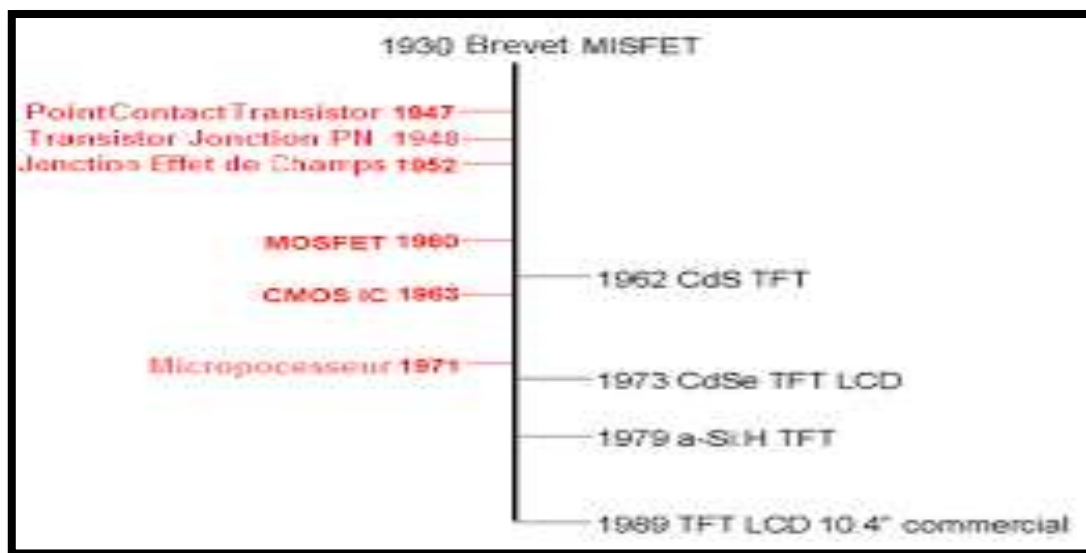
Propriétés thermoélectriques supérieures pour les dispositifs thermoélectriques tels qu'un capteur d'hydrogène gazeux ou un capteur infrarouge dans des conditions extrêmes, mais pas pour la génération d'énergie thermoélectrique [28].

### I.2.9.2 Les inconvénients

La bande interdite est plus petite que le cristal et doit être dopée avec un autre élément pour produire les caractéristiques ioniques et augmenter la bande interdite en vue d'applications potentielles [28].

## I.3 Transistor en couche mince (thin film transistor en Anglais TFT)

### I.3.1 Historique de l'évolution des TFTs



**Figure I.16 :** Historique des transistors en couches minces [5].

L'histoire des transistors en couches minces fut jalonnée de plusieurs étapes Figure I.16, allant de la naissance du concept du transistor jusqu'à la commercialisation de produits les utilisant. Le tout premier rapport traitant des transistors date de 1930, il est attribué à Julius Edgar Lilienfeld lors du dépôt d'un brevet. Ces documents sont les premiers à présenter l'idée de contrôler le courant électrique. Toutefois, aucune preuve du fonctionnement de ces dispositifs n'a été réalisée. Pour obtenir une première preuve de concept, il faut attendre l'année 1948 avec les travaux de William Bradford Shockley au sein des « Bell Laboratoires ». Celui-ci obtient le prix Nobel en 1956 conjointement avec John Bardeen et Walter Houser Brattain pour leurs recherches sur les semi-conducteurs et leur découverte de l'effet transistor. Ces deux derniers ont découvert le « point contact transistor » en 1948, alors que Shockley

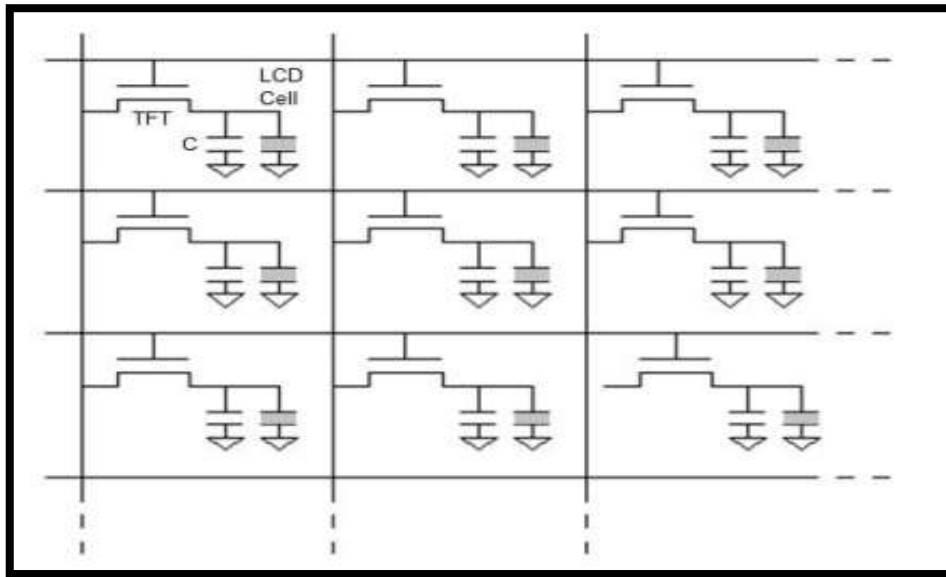
proposait en 1949 le transistor à jonction PN et en 1952 le transistor à jonction effet de champ (JFET). Le premier transistor en couches minces, (dispositif étudié dans ce manuscrit) n'a été fabriqué qu'en 1962 au « RCA Laboratoires ». Il a été produit par l'évaporation successive d'une couche de sulfure de cadmium (CdS) poly cristallin et d'oxyde de silicium à travers des masques sur un substrat isolant en verre. A partir des années 1960 les performances de ces dispositifs ont été améliorées grâce à l'utilisation de matériaux alternatifs ; tel que le séléniure de cadmium (CdSe) (type n) et le tellure (Te) (type p) atteignant tous les deux des mobilités respectivement de l'ordre de 30 et 200  $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . Il est à noter que le premier TFT imprimé a été produit dans les années 60. En effet, en 1967 Sihvonen réalise un TFT totalement imprimé en utilisant des encres de CdSe: CdS pour réaliser le canal semi-conducteur, un ciment basé sur des silicates pour déposer la couche isolante et une pâte de mercure et d'indium (Hg: In), pour créer les électrodes.

Silicates pour déposer la couche isolante et une pâte de mercure et d'indium (Hg: In), pour créer les électrodes. Cependant, l'émergence entre 1960 et 1963 des transistors à effet de champ métal oxyde semi-conducteur (MOSFET), basés sur les wafers de silicium monocristallin, a mis un frein au développement des TFT. Néanmoins, dix ans plus tard, un regain d'intérêt fut observé dans l'histoire de ces dispositifs et ce grâce à la publication de Lechner en 1971. Elle démontre la possibilité de contrôler chaque pixel d'un affichage « liquide Crystal display » (LCD) avec un transistor en couches minces]. Ces systèmes sont appelés « matrices actives » Figure I.17. Elles sont composées d'un TFT s'ouvrant pendant un laps de temps très court, permettant ainsi la charge d'une capacité (C). Cette dernière, une fois chargée pourra maintenir la cellule LCD ouverte jusqu'au prochain rafraîchissement (ouverture du TFT). Les MOSFETs ne sont pas adaptés pour ces applications, à cause du coût prohibitif pour une grande surface. De plus, les matrices actives permettent d'améliorer les performances d'affichage, notamment en diminuant les problèmes de diaphonie.

La Figure I.17 présente le schéma de matrice active simple. Cependant, il peut être complexifié, en particulier, pour les matrices actives dans les écrans de type « organic light emitting diode » (OLED). Ces circuits nécessitent au minimum deux TFT.

Un pour l'adressage du condensateur et un second pour l'alimentation de la diode organique émettant la lumière. Ce second transistor est maintenu ouvert par la décharge du condensateur.





**Figure I.17:** Schéma d'une matrice active pour écran LCD [5].

Pour permettre l'émergence d'applications industrielles, une seconde avancée technologique a été nécessaire: il s'agit de l'utilisation du silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) comme matériau semi-conducteur. Bien qu'il présente une moins bonne mobilité que le Cd:Se, seulement  $1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , il a l'avantage d'avoir un coût de fabrication faible ainsi qu'une bonne reproductibilité et une excellente uniformité sur grande surface. La première publication traitant des TFTs à base d'a-Si:H a été réalisée en 1979 par Le Comber, Spear et Ghaith. Néanmoins, une décennie supplémentaire a été nécessaire pour voir l'apparition des premiers écrans TFTs commerciaux, soit à partir de 1989 [5].

L'évolution du transistor TFT est toujours en cours. Ainsi les performances électriques, principalement en terme de mobilité, du TFT à base de silicium amorphe est insuffisante pour les besoins plus avancés des écrans AMLCD comme la résolution plus haute ( $\sim 4000 \times 2000$  pixels) et l'adressage plus rapide ( $> 240 \text{ Hz}$ ). Pour les écrans AMOLED de petite taille comme ceux utilisés dans les téléphones portables et les tablettes, le matériau actuellement utilisé est LTPS (low température poly-Si) ; mais son coût de fabrication et sa dispersion spatiale des performances rendent difficile son emploi sur une surface plus grande comme un écran de télévision. En outre, d'autres domaines d'application émergents suscitent un intérêt croissant pour ce type de transistors à savoir une électronique embarquée à très faibles coûts financiers et environnementaux sur substrat rigide ou flexibles : capteurs intelligents, étiquettes, écrans souples, électroniques sur vêtements, ... Bref, pour toutes ces raisons, le TFT est toujours un domaine de recherche très actif et qui mérite notre intérêt [29].

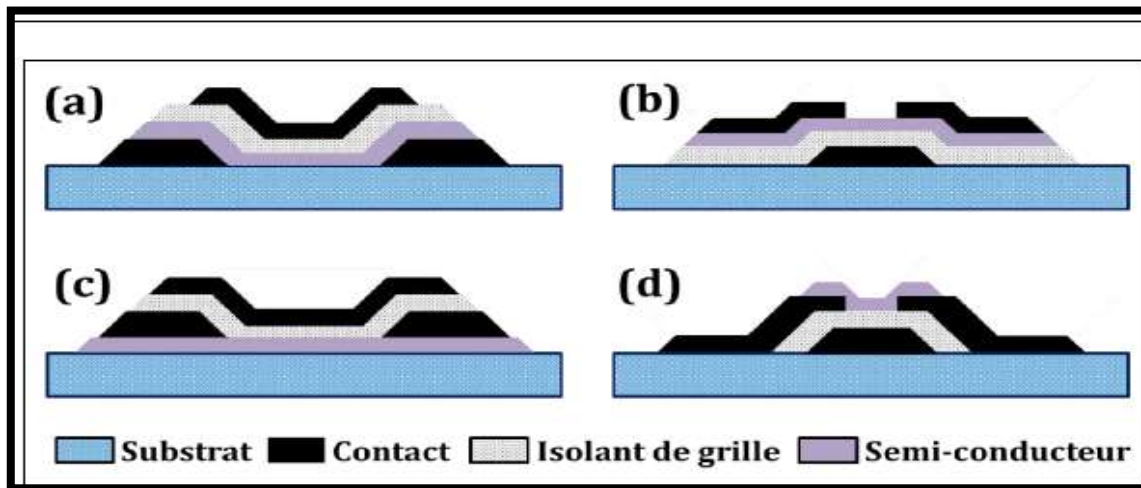
### I.3.2 Fonctionnement du TFT

Un TFT est un transistor à effet de champ constitué par trois électrodes et des couches minces de semi-conducteurs et d'isolants. Les deux électrodes entre lesquelles le courant circule sont appelées « drain » et « source », et la couche semi-conductrice, par laquelle le courant passe, est appelée « couche active ». La conductivité de la couche semi-conductrice est modulée par la tension appliquée à la troisième électrode, la « grille ». Cette dernière se trouve électriquement isolée des autres parties du TFT par une couche d'isolant appelée « isolant de grille ». Cela est le principe basique de fonctionnement du TFT et du MOSFET.

Les TFTs se répartissent en deux types : N et P, selon les porteurs de charge formant le courant principal (électrons pour le type N et trous pour le type P). Nous décrivons ici, d'une façon très simpliste, le mode de fonctionnement d'un TFT du type N. Quand une tension supérieure à la « tension de seuil » est appliquée à la grille ( $V_{GS}$ ), les électrons s'accumulent dans la couche active près de l'isolant de grille, augmentant ainsi la conductivité entre le drain et la source. Cette région avec une densité de porteurs de type N plus élevée est appelée « canal ». En appliquant une différence de potentiel aux électrodes drain et source ( $V_{DS}$ ), nous obtenons un courant à travers le canal. La densité de porteurs dans le canal et ainsi, le courant entre le drain et la source deviennent plus importants quand  $V_{GS}$  augmente. Nous avons la même physique pour les TFTs du type P sous la tension  $V_{GS}$  négative, avec un canal formé de trous [29].

#### I.3.2.1 Différentes structures de TFT

La structure d'un TFT est définie par la position de la couche active, de l'isolant de grille et des électrodes source et drain. La Figure I.18 représente quatre structures trouvées le plus souvent dans les études des transistors en couches minces.

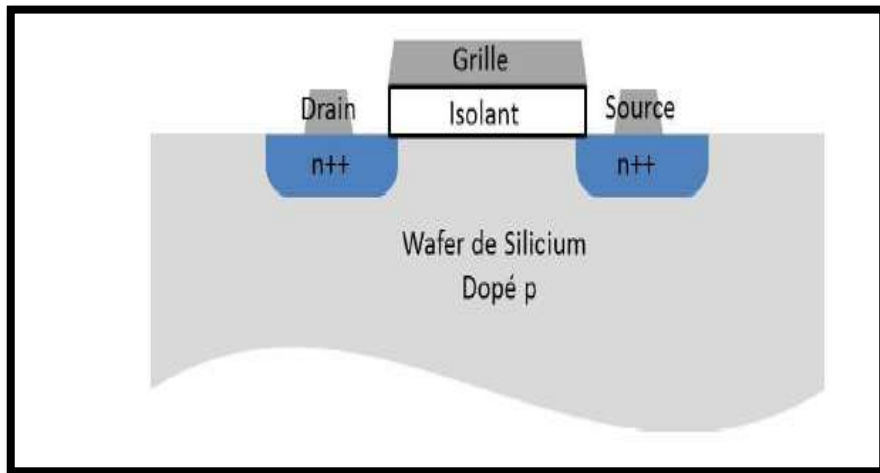


**Figure I.18 :** Schéma des structures classiques de TFT sans passivation: a) « empilée » Grille Dessus (Top Gate) ; b) « empilée » grille dessous (Bottom Gate) ; c) Coplanaire (grille dessus) ; d) coplanaire inversée (grille dessous) [30].

La structure d'un TFT est typiquement classifiée dans une des deux types : Les structures « empilées » (staggered) ou les structures coplanaires. Les structures « empilées » sont des configurations dans lesquelles la grille et les drain/source sont disposés de chaque côté de la couche active. Alors qu'avec les structures coplanaires, les trois électrodes se positionnent au même côté de la couche semi-conductrice. Concernant les structures « empilées », on les divise en deux types différents selon la position de la grille par rapport à la couche semi-conductrice : la structure dite « grille dessus » (Top Gate) est celle où la grille est au-dessus du semi-conducteur, et la structure dite « grille dessous » (Bottom Gate) est dans laquelle la grille se positionne en dessous de la couche active. Quant aux TFTs coplanaires, ils se retrouvent soit dans la structure coplanaire simple où les contacts sont au-dessus de la couche active (grille dessus), soit la structure coplanaire inversée dans laquelle les contacts sont sous la couche active (grille dessous) [30].

Dans le cadre de cette mémoire, les TFTs sur lesquels nous avons travaillé sont des TFT Un composé de trois électrodes et des couches minces de semi-conducteurs ZnO amorphe avec d'isolants  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Oxyde d'alumine) et  $\text{HfO}_2$  (Oxyde de hafnium).

### I.3.3 Comparaison avec le MOSFET



**Figure I.19:** Structure d'un MOSFET [5].

Les MOSFETs aussi bien que les TFTs sont des transistors à effet de champ dans lesquels l'empilement vertical métal/isolant/semi-conducteur est présent. Par conséquent, leur principe de fonctionnement est similaire. Cependant, deux différences sont à noter :

- La première se situe au niveau de la structure. Comme il a été précédemment expliqué, les TFTs sont composés uniquement de couches minces, ce qui leur permet d'avoir un coût de production faible pour des applications sur grandes surfaces, mais aussi d'envisager des applications flexibles ou encore transparentes. Le MOSFET est, quant à lui, fabriqué sur un wafer de silicium Figure I.19. Son canal est composé de silicium monocristallin, ce qui lui permet d'obtenir des mobilités de porteurs de charge très élevées. Ce sont deux architectures complémentaires.

- La seconde se situe au niveau du fonctionnement. Pour les MOSFETs, Le courant passe à travers une couche d'inversion, alors que pour les TFTs, Il traverse une couche d'accumulation. En effet, Un MOSFET à l'état bloquant peut être vu comme deux diodes PN têtes-bèches empêchant le passage du courant dans un sens comme dans l'autre. La polarisation de la grille va engendrer la création d'une couche d'inversion dans le canal, qui sera en mesure de laisser passer les électrons. Alors que le TFT à l'état bloquant s'oppose au courant uniquement à cause d'une très forte résistivité. Des charges dans le canal provoquent une augmentation de la conductivité. Ce mode de fonctionnement peut être divisé en deux sous types :

**Enrichissement** : si le canal est bloquant lorsque le potentiel de la grille est nul, et que l'enrichissement par polarisation est nécessaire pour permettre le passage du courant.

**Déplétion** : si le canal est passant lorsque le potentiel de la grille est nul, et que la déplétion par polarisation est nécessaire pour bloquer le passage du courant.

Une erreur courante est de vouloir opposer le MOSFET au TFT. Chacun de ces dispositifs possède des avantages et des inconvénients. Le point fort du premier est indéniablement ses performances (mobilité d'environ  $500 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ), qui sont supérieures à celle généralement obtenues pour des TFTs. De plus, la très bonne maîtrise des procédés de fabrication permet d'aller toujours plus loin dans la miniaturisation des composants. En 2014, Intel a atteint le nœud technologique de 14 nm avec le processeur « Core M ». Cet avantage permet d'atteindre des densités d'intégration ainsi que des fréquences de fonctionnement incomparables. Parmi ses points faibles, il est possible de citer les températures de fabrication pouvant atteindre les  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , notamment lors de la fabrication de l'oxyde de grille. Deux autres points faibles du MOSFET sont la taille et la nature du substrat. Il se limite à des « wafers » en silicium de 300 mm de diamètre, alors que les TFTs peuvent être fabriqués sur des substrats carrés ou rectangulaires qui dépassent les  $2 \times 2 \text{ m}^2$  et peuvent être de différentes natures : verre, plastique, rigide, flexible voire même étirable. Ces deux architectures sont donc complémentaires. Là où le MOSFET trouve ses limites, les TFTs peuvent être une alternative excellente. Le meilleur exemple est bien évidemment les matrices actives d'écran LCD, mais avec le développement de ces dispositifs de nouvelles applications voient le jour, notamment dans les « system-on-glass ». A terme, il serait même possible d'envisager des architectures 3D dans lesquelles des TFTs seraient empilés sur des MOSFETs, ce type d'architecture pourrait avoir des applications intéressantes, particulièrement dans les mémoires non-volatiles [5].

## I.4 TFT à base d'oxyde de Zinc

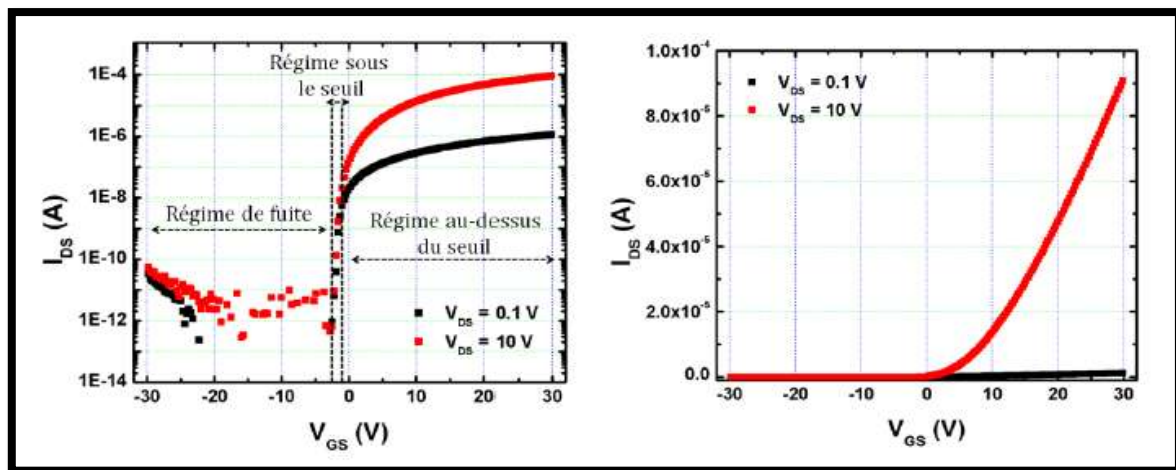
### I.4.1 Les figures de mérite du TFT

Dans cette partie, Les caractéristiques de transfert et de sortie seront présentées. Et Une description des méthodes d'extraction des paramètres importants d'un TFT.

### I.4.1.1 Caractéristique de transfert $I_{DS}-V_{GS}$

Notons qu'afin de simplifier les résultats, toutes les mesures électriques de transistor seront réalisées avec la source placée à la masse. Par conséquent, la polarisation entre la grille et la source (ou entre le drain et la source) sera la valeur de la tension appliquée sur la grille (ou le drain).

En appliquant une tension constante sur le drain ( $V_{DS}$ ), nous mesurons le courant traversant le canal (ou le courant de drain ( $I_{DS}$ )) en fonction de la tension de grille ( $V_{GS}$ ). La courbe présentée sur la Figure I.20 et nommée « la caractéristique de transfert », représente la variation d' $I_{DS}$  en fonction de  $V_{GS}$ , pour des valeurs fixes de  $V_{DS}$ .



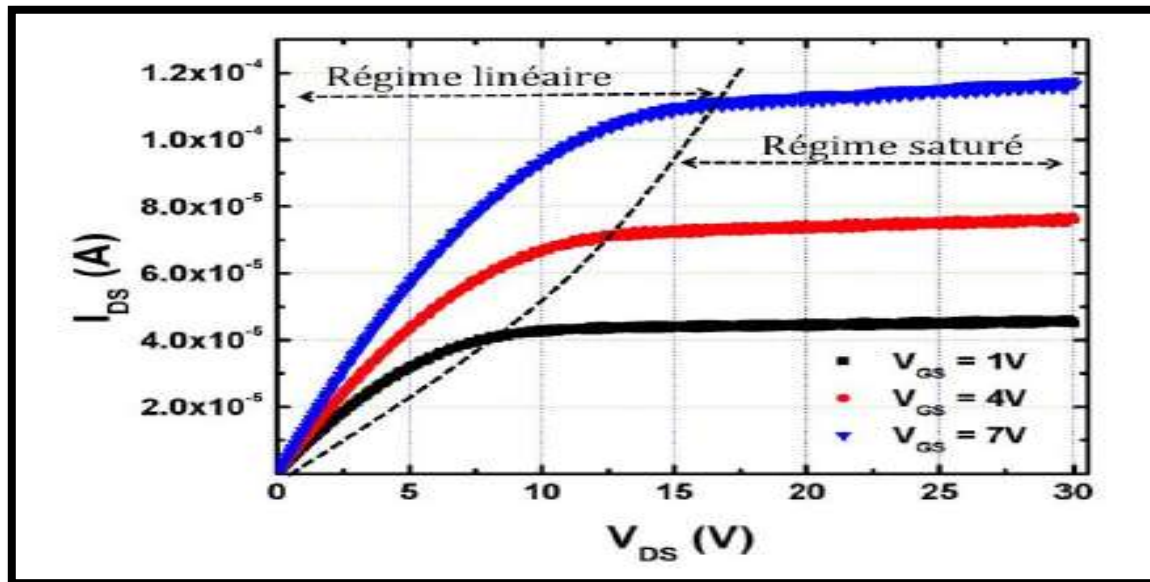
**Figure I.20 :** Caractéristique de transfert  $I_{DS}-V_{GS}$  d'un TFT n MOS à différentes  $V_{DS}$  :  
En Échelle semi logarithme (gauche) ; en échelle linéaire (droite)[32].

Les quatre paramètres clés représentant les performances électriques d'un TFT, à partir de courbe de transfert ont été distingués : le courant  $I_{on}$ , la tension de seuil ( $V_{TH}$ ), la pente sous le seuil (SS) et la mobilité à effet de champ ( $\mu_{FE}$ ). Les méthodes d'extraction de ces paramètres seront présentées par la suite.

### I.4.1.2 Caractéristique de sortie $I_{DS}-V_{DS}$

Abordons à présent une autre façon d'illustrer les différents régimes du fonctionnement d'un transistor. Cette dernière se base sur la tension appliquée au drain ( $V_{DS}$ ). En appliquant une

tension constante sur la grille, on étudie la variation du courant de drain ( $I_{DS}$ ) en fonction de la tension de drain. La courbe alors relevée est appelée la caractéristique de sortie Figure I.21.



**Figure I.21:** Caractéristique de sortie  $I_{DS}$ - $V_{DS}$  d'un TFT de type n à différentes  $V_{GS}$ .

Selon la tension  $V_{DS}$  appliquée, deux régimes de fonctionnement du TFT peuvent être distingués : le régime linéaire pour de petites valeurs de  $V_{DS}$  et le régime saturé pour de plus grandes valeurs. Dans le régime linéaire, le courant  $I_{DS}$  croît linéairement avec la tension  $V_{DS}$ . En revanche, dans le régime saturé,  $I_{DS}$  n'augmente quasiment plus, et sature en fonction de  $V_{DS}$ . Cette courbe nous permet d'évaluer notamment la qualité du contact entre la couche active et le métal (notamment les contacts source drain) du TFT. La linéarité de la section à basse tension de drain montre que le contact est ohmique. Par ailleurs, l'observation du comportement de  $I_{DS}$  à haute tension  $V_{DS}$  indique si le transistor sature bien ou si on est en présence du phénomène d'injection des électrons chauds (effet Kink ou self-heating dans les TFTs).

#### I.4.1.3 Courant de drain en état passant de TFT ( $I_{ON}$ )

Le courant  $I_{ON}$  est défini comme étant le courant maximum de drain lorsque le TFT est en état passant.

Dans le régime linéaire,  $I_{DS}$  s'exprime selon la relation suivante :

Avec :

$$I_{DS(lin)} = \frac{W}{L} \mu_{FE} C (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} \quad (I.2)$$

- $W$  et  $L$  la largeur et la longueur du canal, respectivement
- $\mu_{FE}$  La mobilité à effet de champ
- $C$  la capacité surfacique En régime saturé, le courant de drain est relié avec ces facteurs ci-

Dessus via l'équation

$$I_{DS(sat)} = \frac{W}{2L} \mu_{FE} C (V_{GS} - V_{TH})^2 V_{DS} \quad (I.3)$$

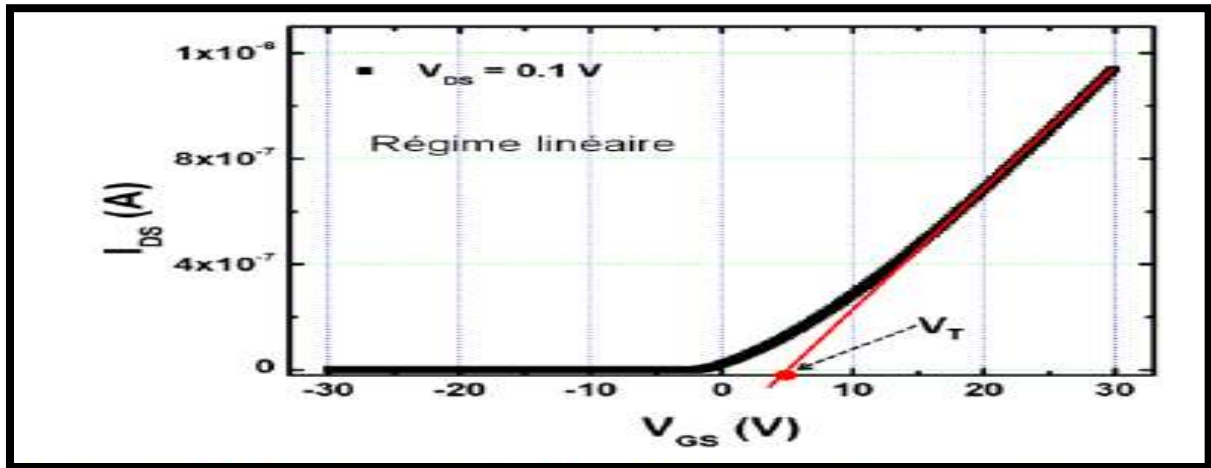
Les relations (I.2) et (I.3) indiquent qu' $I_{ON}$  est proportionnel à la dimension  $W/L$  du TFT, à la mobilité et à la capacité surfacique de l'isolant de grille. Par ailleurs, dans le régime linéaire,  $I_{ON}$  dépend linéairement de la tension  $V_{DS}$  tandis qu'il est indépendant avec  $v_{DS}$  dans le régime saturé. Cela explique les noms utilisés pour chaque régime.

#### I.4.1.4 Tension de seuil ( $V_{TH}$ )

La tension de seuil  $V_{TH}$  est la tension de grille à partir de laquelle apparait le courant traversant le canal. De même que dans le cas du courant de drain, l'extraction de  $V_{TH}$  est différente selon le régime du fonctionnement du TFT. Dans le régime linéaire,  $V_{TH}$  est extrait à partir de la relation (I.2).

Dans le cas particulier où serait nul,  $V_{TH}$  serait égal à  $V_{GS}$ . La tension de seuil dans le régime linéaire de transistor correspond donc à l'intersection entre la partie linéaire de la courbe  $I_{DS}$ - $V_{GS}$  et l'abscisse (Figure I.22).

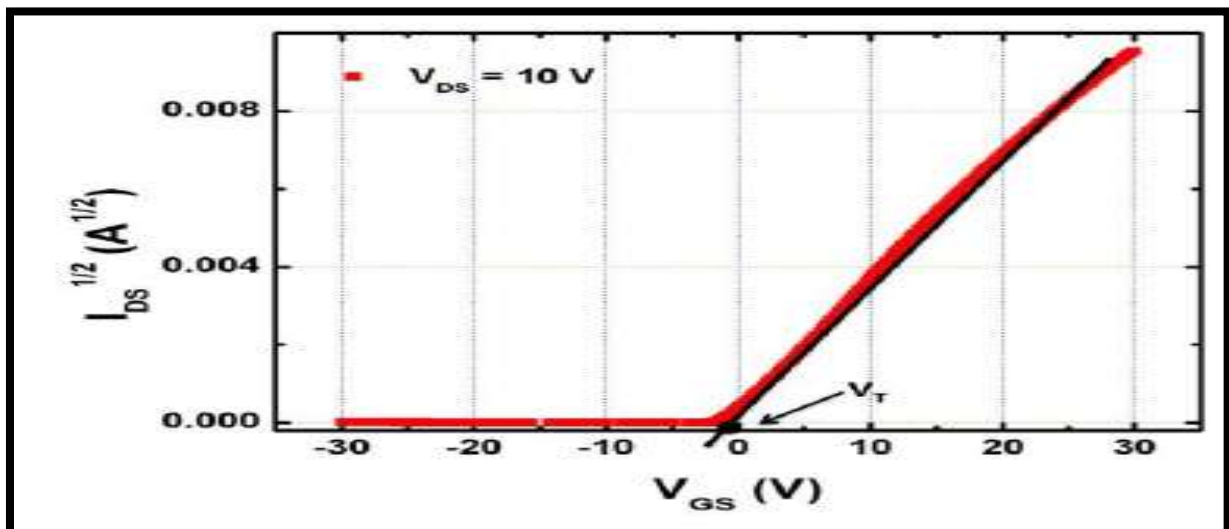




**Figure I.22 :** Extraction de la tension de seuil en régime linéaire à partir

D'une courbe  $I_{DS}$ - $V_{GS}$  à  $V_{DS} = 0.1$  V.

En régime saturé, la tension de seuil est calculée à partir de l'expression (I.3). Dans ce régime,  $V_{TH}$  correspond à l'intersection entre la partie linéaire de la courbe  $\sqrt{I_{DS}}$ - $V_{GS}$  et l'abscisse



**Figure I.23:** Extraction de la tension de seuil en régime linéaire à partir

D'une courbe  $\sqrt{I_{DS}}$  - à  $V_{DS} = 10$  V.

Il a été établi dans la littérature que la tension de seuil de TFT dépend de plusieurs paramètres tels que la concentration des porteurs de charge libres dans le canal, la qualité de l'interface entre la couche active et les électrodes ainsi que la qualité de la couche isolant de grille .

#### I.4.1.5 Mobilité ( $\mu_{FE}$ )

La mobilité à effet de champ ( $\mu_{FE}$ ) représente la mobilité des porteurs de charge majoritaires de la couche semi-conductrice. Ce paramètre illustre donc la conductivité du matériau de la couche active d'un transistor. De même que  $V_{TH}$ , la mobilité s'exprime de façon différente selon le régime de fonctionnement du TFT.

En régime linéaire, la mobilité s'exprime comme suite :

$$\mu_{lin} = \frac{L}{WC} \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \quad (I.4)$$

Quant à la mobilité dans le régime saturé, elle s'exprime via la relation :

$$\mu_{sat} = \frac{2Lg^2}{WC} \quad (I.5)$$

Avec la transconductance de transistor qui s'exprime comme suite :

$$g = \frac{d\sqrt{I_{DS}}}{d(V_{GS} - V_T)} \quad (I.6)$$

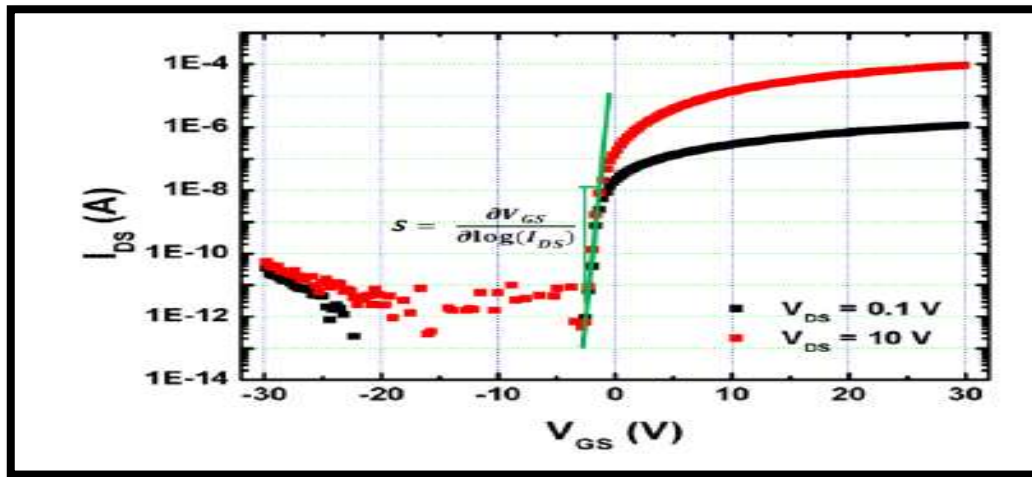
Ce paramètre dépend de la dimension du canal, de la qualité de la couche d'isolant de grille et celle de la couche active. Il variera donc selon la tension appliquée sur le drain.

#### I.4.1.6 Pente sous le seuil (SS)

La pente sous le seuil est définie comme l'écart de tension nécessaire à appliquer sur la grille pour que le courant de drain augmente d'une décade (en semi logarithme). Elle s'exprime en Volt par décade et sera déterminée à partir de la relation :

$$SS = \frac{\partial V_{GS}}{\partial \text{Log}(I_{DS})} (V_{DS} = \text{Cte}) \quad (I.7)$$

Ce paramètre représente la vitesse de passage entre l'état bloqué et l'état passant d'un TFT. Plus la pente sous le seuil est faible, plus la transition entre ces deux états est rapide. L'extraction de la pente sous le seuil nécessite de tracer la courbe de transfert  $I_{DS}$ - $V_{GS}$  en échelle semi logarithmique. La pente de la partie sous le seuil de cette courbe sera la valeur de SS Figure I.24 [31].



**Figure I.24:** Extraction de la pente sous le seuil à partir d'une courbe  $I_{DS}$ - $V_{GS}$ .

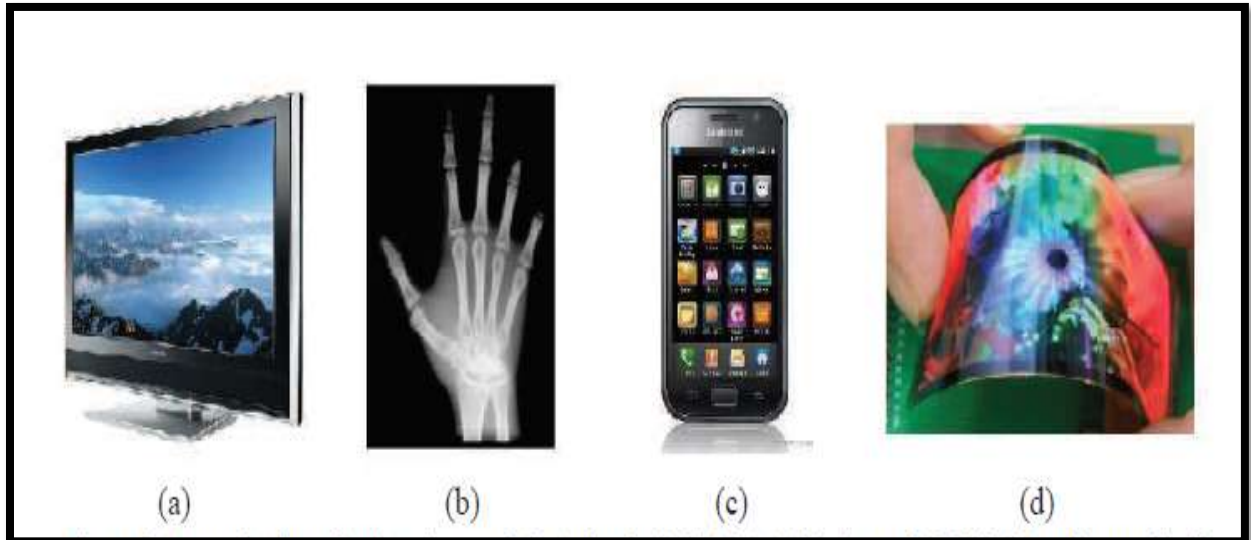
#### I.4.1.7 Rapport $I_{ON}/I_{OFF}$

Ceci est simplement défini comme le rapport du maximum au minimum. Le minimum est généralement donné par le niveau de bruit de l'équipement de mesure, tandis que le maximum dépend du matériau semi-conducteur lui-même et de l'efficacité de l'injection capacitive par effet de champ [32].

#### I.4.2 Application du TFT ZnO

Utilisation de transistors à couches minces à base de ZnO (TFT- ZnO) dans le domaine des écrans plats lucrative. (LCD or OLED), et les circuits pixels que pour les circuits de commandes D'affichage, et d'autres domaines d'applications font appel aux transistors en couches minces, parmi lesquelles nous pouvons retrouver l'imagerie médicale, qui est certainement le 2nd marché d'activité des TFTs et qui utilise par exemple des afficheurs de

type AMFPI (Active Matrix Flat Panel Imager) dans lesquels les TFTs sont intégrés aux convertisseurs de rayons X. On retrouve également les TFTs dans les capteurs biologiques [29].



**Figure I.25:** Exemple d'applications issues de la technologie TFT: (a)téléviseurs LCD, (b) radiographie X, (c) écrans AMOLED de téléphone portable  
Et (d) Écran OLED flexible [29].

# ***Chapitre II***

***L'analyseur de dispositif à  
semi-conducteur***

***KEYSIGHT B1500A***

## II .1Introduction

Ce chapitre couvre tout ce qui concerne l'appareil Analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A (KEYSIGHT B1500A Semi-conducteur Device Analyzer en Anglais). Il comprend une définition générale du L'analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A, les accessoires de l'analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A, les modules, le logiciel Easy EXPERT, les caractéristiques de base et Les bibliothèques d'applications prêtes à l'emploi.

## II .2 L'analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A :

L'analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A de la série d'analyseurs de courant et de tension de précision est un analyseur tout-en-un prenant en charge les technologies IV, CV, IV pulsé / dynamique et plus, conçu pour une caractérisation complète des applications de base aux applications de pointe. Il offre une vaste gamme de capacités de mesure couvrant la caractérisation et l'évaluation électriques des dispositifs, matériaux, semi-conducteurs, composants actifs / passifs, etc. ou pratiquement tout autre type de composant électronique avec une fiabilité et une efficacité de mesure sans compromis[33]. Cet appareil est présenté dans la figure II.1.



**Figure II .1:** Représentation de l'appareil analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A.

### II.3 Les accessoires de l'analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A :

Le B1500A est équipé d'un écran LCD de 15 pouces avec écran tactile, lecteur de disque dur, lecteur de DVD-RW / DVD-ROM / CD-RW / CD-ROM et d'interfaces USB / LAN / GP-IB. Le clavier USB, la souris USB et le stylet sont disponibles en option.

Ici, les images de l'accessoire typique inclus dans la Demo B1500A sont présentées afin qu'on puisse trouver les éléments de démonstration nécessaires lors de la configuration de la configuration de la démonstration[34]. Ces accessoires sont résumés dans le tableau II.1.

Accessoire	Nom
	Clavier
	Câble d'alimentation
	Souris
	Câble RSU et WGFMU / RSU
	N1301A-200 GSWU et câbles

	<p>N1301A-100 SCUU</p>
	<p>Câble GNDU 16493L</p>
	<p>N1300A-002 Câble CMU</p>
	<p>Câble de verrouillage 16493J</p>
	<p>Câble Triax 16494A</p>
	<p>16493P Câble SPGU</p>

**Tableau II.1:** Les accessoires de l'analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A [35].

#### II.4 Les module :

Les types des modules sont: Commencer (Getting Started), Affichage et gestion des données (Data Display and Management), Environnement de test classique (Classic Test



Environment), Mesure de base (Basic Measurement), Mesure de courant faible (Low Current Measurement), Fonctions de mesure (Measurement Functions), Mesure de capacité (Capacitance Measurement), Modification des définitions de test d'application (Modifying Application Test Definitions), Créer vos définitions de test (Creating Your Test Definitions), Définitions et opérations avancées (Advanced definitions and Operations).....etc.[34]

### **II.5 Le logiciel Easy EXPERT :**

Les caractéristiques les plus importantes de ce logiciel sont :

- Approche «descendante» axée sur les tâches pour la caractérisation des appareils.
- Exécution de tests multiples.
- Fonctions de mesure automatique, d'auto-analyse.
- Classés et organisés.
- Facile à utiliser.
- Utilisation de l'écran tactile (avec stylet en option).
- Plusieurs types de SMU (source/monitor unit (SMU)).
- CMU (Capacitance measurement unit) multifréquence.
- Touches logicielles contextuelles et commande de bouton.
- Clavier et souris USB en option ...etc.[36]

### **II.6 Les Étapes pour mesurer les propriétés électriques par Analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A :**

#### **II.6.1 B1500A Configuration Easy EXPERT:**

Les opérations suivantes sont décrites dans cette section.

Étape 1. Allumez le KEYSIGHT B1500A

Étape 2. Démarrage de KEYSIGHTEasy EXPERT

Étape 3. Préparation de la démonstration par l'utilisateur du KEYSIGHTEasyEXPERT.

### **Étape 1. Allumer le KEYSIGHT B1500**

Après avoir reçu le B1500A, effectuez la configuration suivante :

1. Assurez-vous que le commutateur Veille est désactivé.
2. Sur le panneau arrière du B1500A, assurez-vous que la borne Circuit Common est connectée à la borne de terre du châssis avec une barre de court-circuit.
3. Connectez le clavier USB KEYSIGHT 16444A-001 et la souris 16444A-002 au port USB du B1500A.
4. Branchez le câble d'alimentation du B1500A sur une prise secteur.
5. Ouvrez les terminaux de mesure (débranchez les appareils de mesure, le cas échéant), puis appuyez sur le commutateur Veille (coin inférieur droit du panneau avant) pour allumer le B1500A.

Windows, l'initialisation du module de mesure et l'auto-étalonnage vont commencer.

6. La configuration par défaut de Windows se connecte automatiquement à Windows par «l'utilisateur KEYSIGHT B1500», qui doit être l'utilisateur défaillant du B1500A.

### **Étape 2. Démarrage de KEYSIGHTEasy EXPERT**

Une fois connecté, cliquez sur le bouton Démarrer EasyEXPERT.

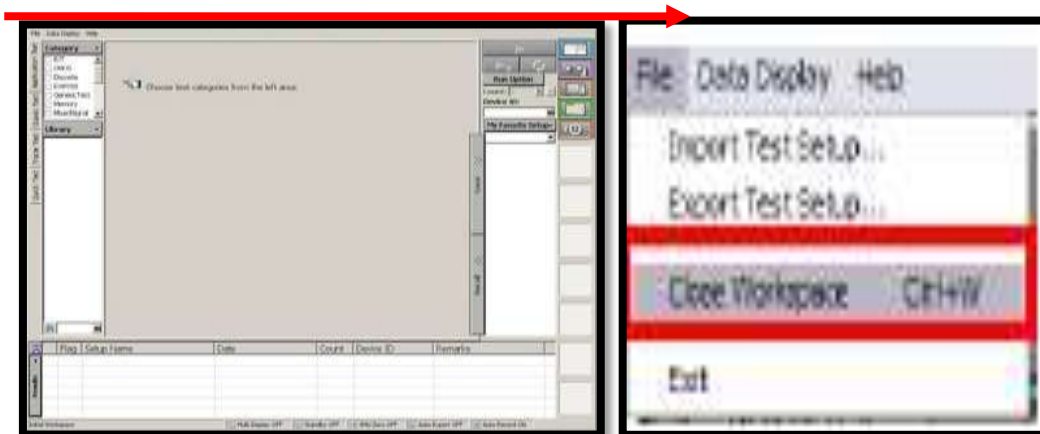
Attendez qu'Easy EXPERT soit active.



Juste après l'initialisation de Windows, la fenêtre de démarrage d'EasyEXPERT s'ouvre dans l'un des trois cas suivants:

Suivez les instructions pour configurer l'espace de travail de démonstration EasyEXPERT.

Cas 1: première utilisation



Fermer l'espace de travail en sélectionnant "Fermer Espace de travail "dans le menu" Fichier", et retournez à EasyEXPERT fenêtre de gestion de l'espace de travail.



Cliquez sur « Fermer l'espace de travail », changez la fenêtre en « Fenêtre 2 » de gestion de l'espace de travail.

Cas 2: Un espace de travail existant



Cochez la case d'option "Non, je veux démarrer un nouvelle session".

Passez à l'étape 3 de la page suivante pour créer un nouvel espace de travail à utiliser à titre de démonstration.

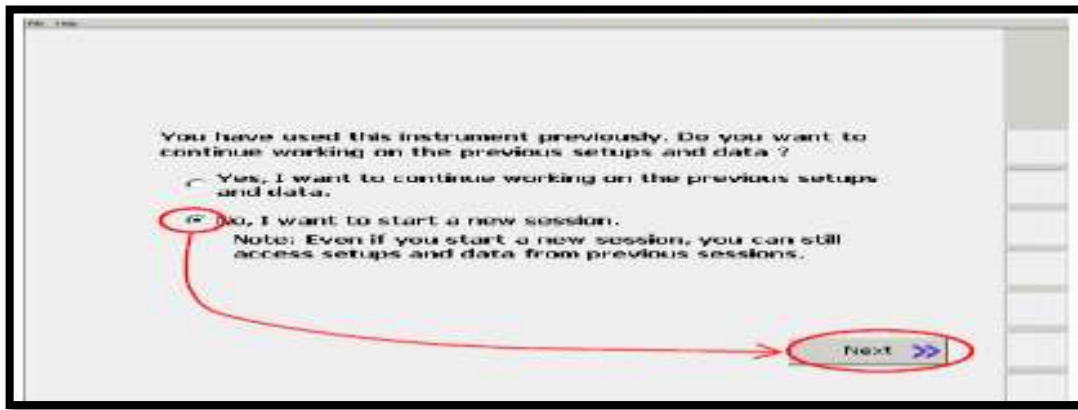
Cas 3: Plus de deux espaces de travail existants



Passez à l'étape 3f de deux pages à partir de cette page et créez un nouvel espace de travail à utiliser en démonstration.

### Étape 3. Préparation de l'espace de travail de démonstration utilisateur de KEYSIGHT Easy EXPERT

Étape 3a. Sélectionnez le bouton radio "Non" et cliquez sur Suivant.

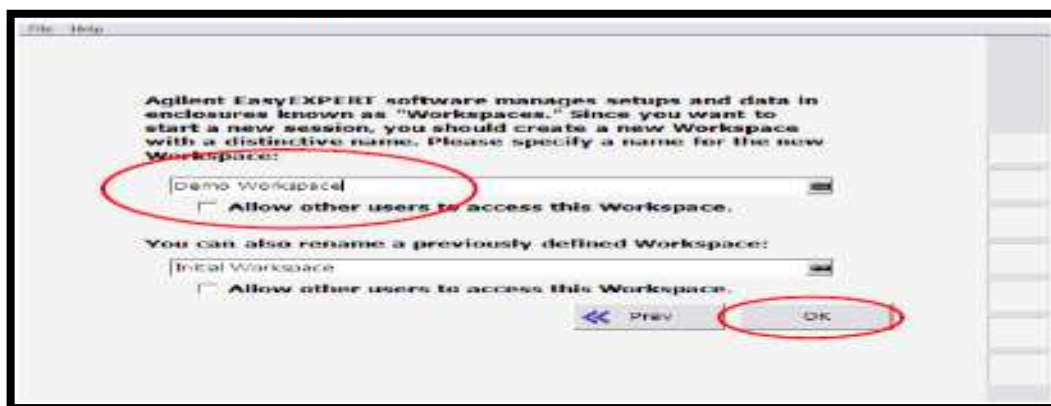


Étape 3b. Le configurateur d'espace de travail suivant apparaît.

Entrez, dites «Demo Workspace XX» sous un nom unique new

Espace de travail dans le nouveau champ de saisie de l'espace de travail.

Étape 3c. Cliquez sur OK

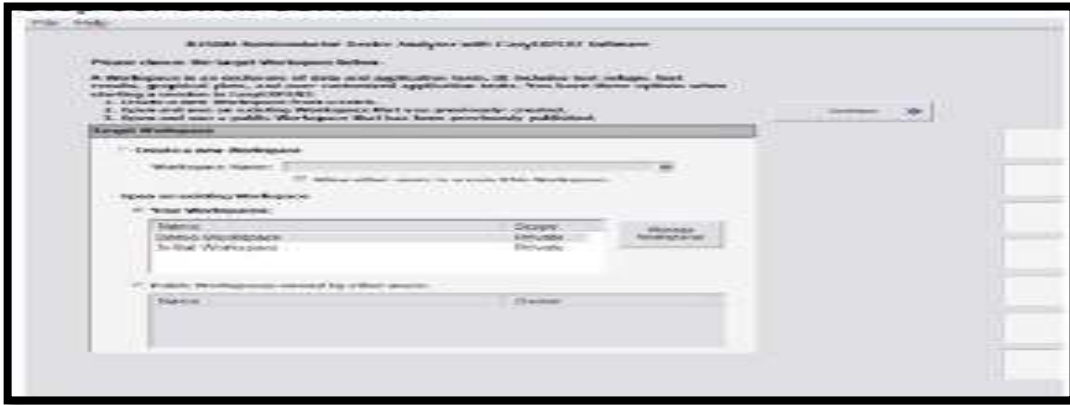


Aller à l'étape 3d de la page suivante

(Suite: Configuration de l'espace de travail de démonstration)

Étape 3d. Cliquez sur le nouveau "Demo Workspace XX" pour le surligner.

Étape 3e. Cliquez sur Continuer



Allez à "Étape 3j" de la page suivante.

Étape 3f. Création d'un nouvel espace de travail.

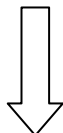
Si deux ou plusieurs espaces de travail existent déjà, le B1500A affiche le configurateur d'espace de travail suivant.



Étape 3g. Cliquez sur "Créer un nouveau bouton radio d'espace de travail"

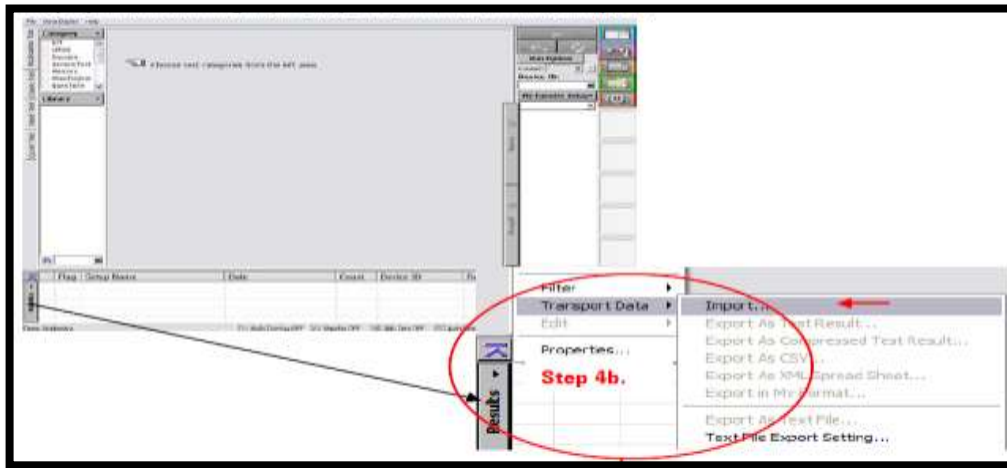
Étape 3h. Entrez, par exemple, «Espace de travail de démonstration XX» en tant que nouvel espace de travail avec un nom unique dans le champ de saisie du nouvel espace de travail.

Étape 3i. Cliquez sur Continuer



Allez à "Étape 3j" de la page suivante.

Étape 3j. La nouvelle fenêtre initiale EasyEXPERT suivante s'ouvre.



### Étape 4. Importer les données des résultats de la démonstration

Nous sommes maintenant dans la phase finale de configuration de la démo.

Suivez les étapes suivantes.

Étape 4a. Insérez le CD de démonstration utilisateur dans le lecteur de CD.

Étape 4b. Importer des données de démonstration

- **Click > Results >> Transport data >> Import.**

- Puissélectionnez le fichier **B1500A\_QuickStartGuide\_Data.ztr** from the DVD/CD-RW.

(B1500A\_QuickStartGuide\_Data.ztr is downloadable form the Keysight web site, too.)

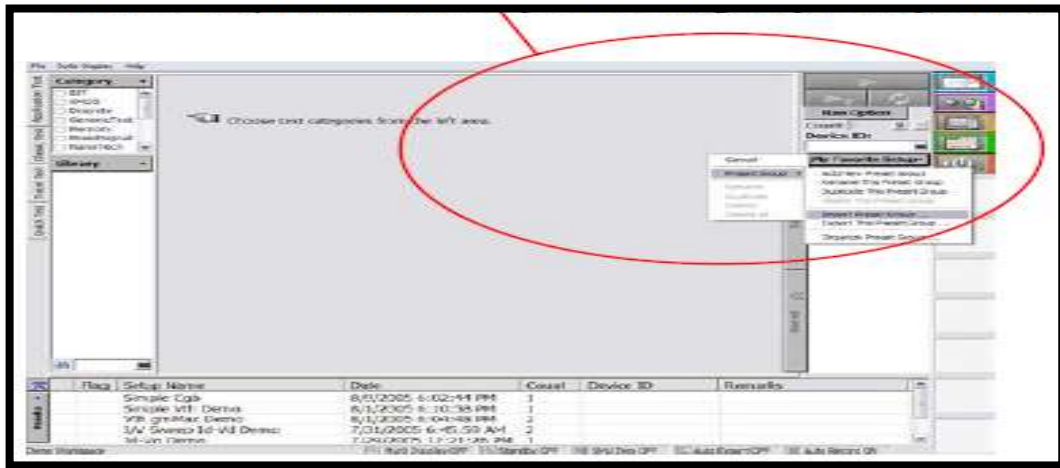
- Le jeu de données de démonstration est importé et apparaît dans la zone de résultats.

- Vous êtes maintenant dans la phase finale de configuration de la démo

### Étape 5. Importation de la configuration de mesure de démonstration

- Cliquez sur > Ma configuration préférée > Groupe de préreglages > Importer un groupe de préreglages.

- Cliquez sur > Ma configuration préférée > Groupe de préreglages > Importer un groupe de préreglages



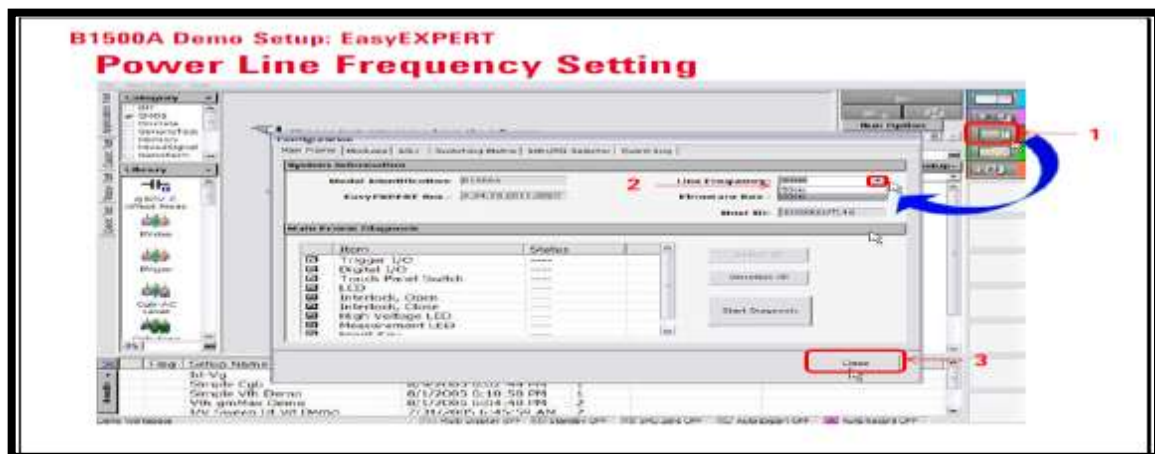
Sélectionnez ensuite le fichier B1500A\_QuickStartGuide\_FavoriteSetup.xpg à partir du DVD / CD-RW.

(B1500A\_QuickStartGuide\_FavoriteSetup.xpg est également téléchargeable sur le site Web Keysight.

Le fichier de configuration de la mesure de démonstration est importé et apparaît dans le groupe Ma configuration préférée: «Démon».

Maintenant, le «User Démon WS» est créé et la configuration de la démonstration utilisateur est terminée.

### Étape 6. Préparation de l'environnement B1500A



Fréquence de ligne électrique:

Le réglage de la fréquence du secteur est très important pour des mesures précises et stables avec une tension de signal faible ou actuel.



## Chapitre II: Analyseur de dispositifs à semi-conducteurs Keysight B1500A

Veillez vérifier le réglage de la fréquence de ligne de votre Démo B1500A. Si la fréquence de ligne est définie différemment de la fréquence de ligne de votre région, veuillez la définir correctement.

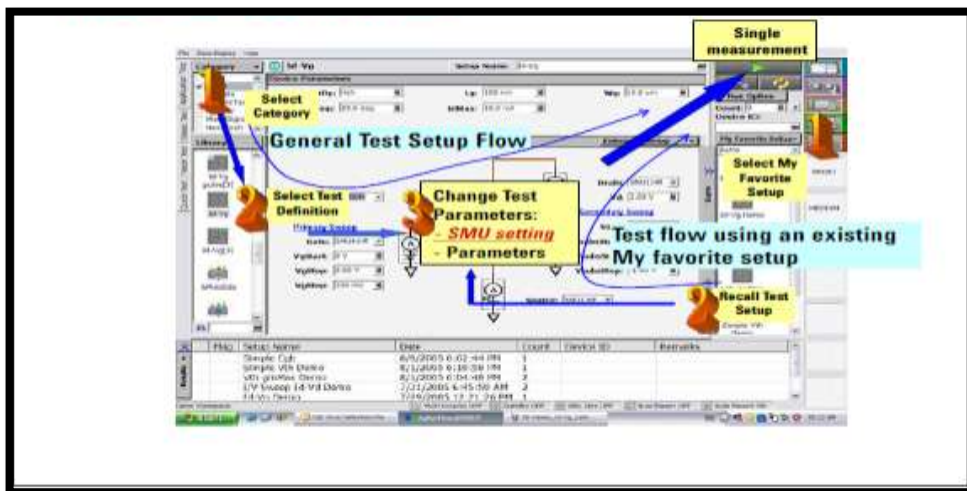
Veillez vérifier le réglage de la fréquence de ligne de votre Démo B1500A.

Si la fréquence de ligne est définie différemment de la fréquence de ligne de votre région, veuillez la définir correctement.

Pour changer:

- Cliquez sur le bouton "Configuration".
- La fenêtre de configuration s'ouvre.
- Cliquez sur le bouton Fréquence de ligne pour ouvrir la liste des fréquences de ligne.
- Sélectionnez 50Hz ou 60Hz.

### II.6.2 Ordre de configuration de mesure :



La diapositive montre deux manières de commencer les mesures.

#### 1. Flux de configuration de test général à l'aide du modèle de bibliothèque

Effectuez la séquence de configuration de test suivante:

1. Choisissez la catégorie de test de la bibliothèque.

2. Choisissez une définition de test dans la bibliothèque.
3. Modifiez les paramètres de test.
4. Appuyez sur mesures simples



### 2. Flux de démonstration

Rappelez la configuration du test et exécutez les tests:

1. Choisissez et rappelez une configuration de test à partir de My Favorite Demo Setup.
2. Vérifiez la connexion SMU, si le fichier est importé à partir d'un fichier configuré différemment. B1500A.
3. Appuyez sur mesures simple[35].



## II.7 Les caractéristiques de base

### II .7.1 Capabilités de mesure

#### II .7.1 .1 Courants en fonction du voltage (IV)

- Mesures précises des plages de courant of 0.1 fA - 1 A et voltage 0.5  $\mu$ V - 200 V.
- Mesures d'échantillonnage temporel (taux d'échantillonnage minimum de 100  $\mu$ s).

#### II .7.1 .2 Mesure de capacité

- La mesure d'impédance multifréquence prend en charge les mesures CV (capacité en fonction de la tension), C-t (capacité en fonction du temps) et C-f (capacité en fonction de la fréquence).

- Gamme de fréquence de mesure de capacité de 1 kHz à 5 MHz.

### II .7.1.3 Mesure IV pulsée / IV rapide / IV transitoire :

- Offre une capacité de mesure à haute vitesse et haute sensibilité pour les mesures IV(courant-tension), IV pulsées et IV transitoires ultra rapides.

- Mesure simultanée tension / courant à grande vitesse (200 MSa / s, taux d'échantillonnage de 5 ns)[37].

### II.8 Les bibliothèques d'applications prêtes à l'emploi :

Quelques applications de l'appareil B1500A sont montrées dans le tableau II.2.

Type d'appareil	Tests d'application
Transistor CMOS	$I_d-V_g$ , $I_d-V_d$ , $V_{th}$ , panne, capacité, QSCV, etc.
Transistor bipolaire	$I_c-C_v$ , diode, tracé de Gummel, claquage, $h_{fe}$ , capacité, etc.
Dispositif discret	$I_d-V_g$ , $I_d-V_d$ , $I_c-V_c$ , diode, etc.
Mémoire	$V_{th}$ , capacité, test d'endurance, etc.
Dispositif d'alimentation	$I_d-V_g$ pulsé, $I_d-V_d$ pulsé, panne...etc.
Nano Device	Résistance, $I_d-V_g$ , $I_d-V_d$ , $I_c-V_c$ , etc.
Test de fiabilité	NBTI / PBTI, pompage de charge, électromigration, injection de pores chauds, J-Rampe, TDDB, etc.
Et plus	Et plus

**Tableau II.2 :** Certaines applications de L'analyseur de dispositif à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A sur les dispositifs électroniques [38].

# ***Chapitre III***

## ***Matériel et méthode***

### III.1 Introduction

Ce chapitre porte sur les procédures expérimentales utilisées pour étudier les caractéristiques des transistors en couches minces à base de ZnO amorphe avec des isolants  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Alumine) et  $\text{HfO}_2$  (Hafnium). Dans ce travail, l'analyseur de caractéristiques des dispositifs à semi-conducteur, KEYSIGHT B1500A a été utilisé pour mesurer les caractéristiques de ces transistors. Cet appareil est situé dans le laboratoire de recherche sur les matériaux semi-conducteurs et métalliques (LMSM) de l'Université de Biskra.

### III.2 Les caractéristiques $I_D$ - $V_G$ de TFT

#### III.2.1 La description de la mesure

C'est la mesure du courant de drain en fonction de la tension de grille des deux transistors en couche mince ZnO avec d'isolants ( $\text{HfO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) pour plusieurs tensions entre le drain et la source ( $V_D$ ). La figure III.1 présente le schéma du setup utilisé pour mesurer ces caractéristiques.



**Figure III.1** : L'appareil de l'analyseur à semi-conducteur KEYSIGHT B1500A montrant

Le schéma du setup utilisé pour mesurer les caractéristiques  $I_D$ - $V_G$ .

### III.3 La procédures expérimentale

#### III.3.1 La méthode de mesure

Les caractéristiques électriques ( $I_D$ -  $V_G$ ) des TFTs ont été mesurées à l'aide d'un analyseur KEYSIGHT B1500A. Les mesures sont effectuées à l'air à température ambiante, Ils ont été effectués en utilisant les étapes expérimentales suivantes :

Étape 1. Allumer le KEYSIGHT B1500.

Étape 2. Démarrage de KEYSIGHT EASY EXPERT. (Le logiciel de mesure).

Étape 3. Préparation de l'espace de travail de démonstration utilisateur de KEYSIGHT EASY EXPERT. Étape 4. Importer les données des résultats de la démonstration.

Étape 5. Importation de la configuration de mesure.

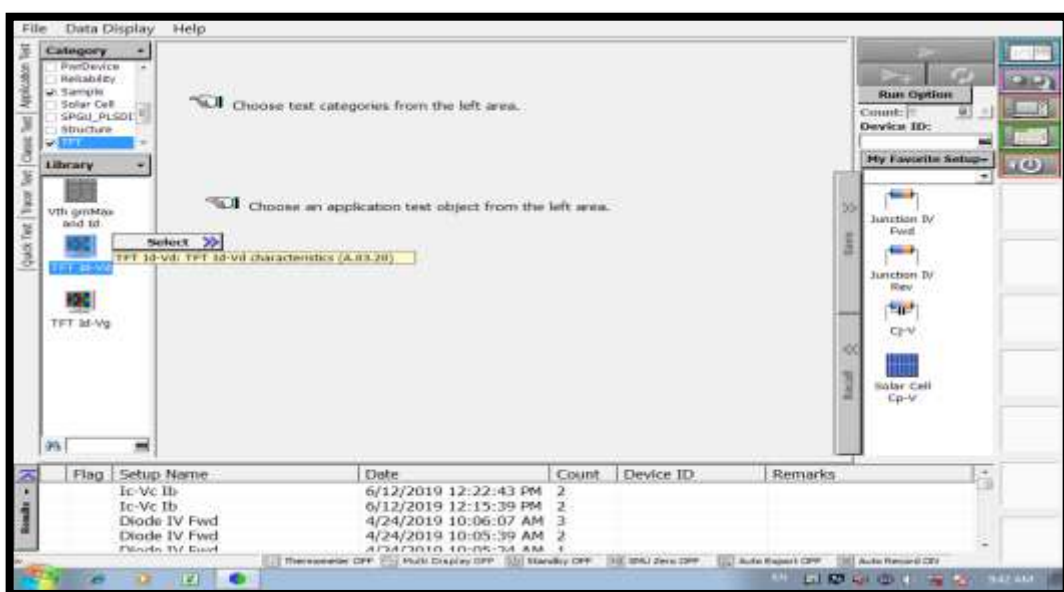
Étape 6. Préparation de l'environnement B1500A.

(Ces étapes sont expliquées en détail au chapitre II).

Étape 7. Ordre de configuration de mesure :

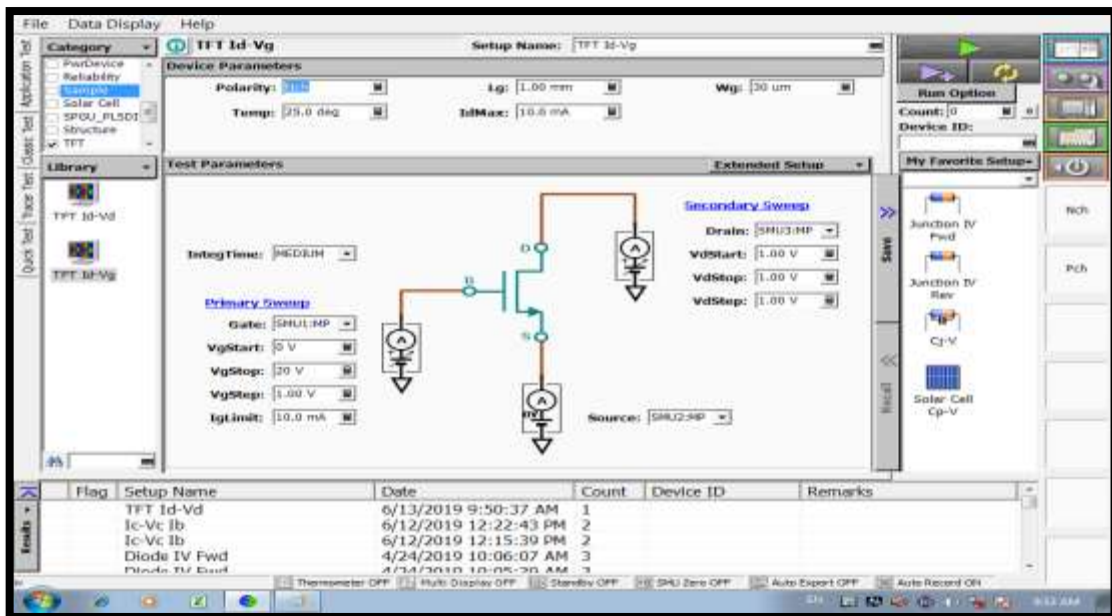
1- Sélectionnez la catégorie de test dans la bibliothèque:

Dans cette étape, une application TFT a été sélectionnée dans le menu « catégorie » pour la procédure de mesure. La fenêtre suivante apparaît.



## 2.Sélection d'une définition de test dans la bibliothèque :

Dans cette étape, le type de mesure la caractéristique I-V a été choisi en cliquant sur  $I_D$ - $V_G$  dans le menu « Library ».La fenêtre suivante apparaît.



Cettefenêtre de définition de canal configure les SMU et leur fonction de mesure. Le transistor est connectéau dispositif« Test Fixture »à l'aide des câbles.La figure III.2 montre le schéma pour connecter les transistors à l'appareil Test Fixture à l'aide des câbles.



**Figure III.2 :** montre un tracé expérimental pour connecter les transistors

À l'appareil Test Fixture à l'aide des câbles.



La relation entre les définitions SMU et les broches d'alimentation TFT doit être identique. Source connecte avec le SMU2, drain avec le SMU3 et la grille connecte avec le SMU1.

### III.3.2 Modifiez les paramètres de mesure selon les besoins

#### ➤ Paramètres de device

Dans cette étape, les paramètres de l'appareil TFT représentés dans le tableau III.1 ont été entrés :

Les parametres	Les valeurs
Polarity	NTFT
$L_G$ (longuer de grille ) $\mu\text{m}$	1000
$W_G$ (larguer de grille ) $\mu\text{m}$	30
$I_D$ Max mA	10
Temp deg	25

**Tableau III .1:** Les paramètres de l'appareil TFT.

#### ➤ Paramètres de test

La même chose, Paramètres de test entrés et représentés dans le tableau III.2

Les parametres de test	Les valeurs
$V_G$ start V	-7
$V_G$ stop V	23
$V_G$ step V	5
$I_G$ limit mA	10
$V_D$ Start V	0
$V_D$ stop V	1
$V_D$ Step V	1

**Tableau III.2** : Les paramètres de test de TFT.

On vérifie la connexion SMU avant d'appuyer sur un bouton de mesure (  )

4-Appuyez sur le bouton Mesurer (  )

Appuyez sur le bouton de mesure pour lancer la mesure. Les résultats de mesure graphiques et numériques, les analyses de données et les extractions de paramètres sont automatiquement affichés[39].

### III.4 Sauvegarder le résultat de la mesure

Vous devez sauvegarder les résultats du test en suivant les étapes ci-dessous :

- Cliquez sur le bouton « Save » pour enregistrer les résultats.



- Entrez le nom du fichier et enregistrez vos données sur un support d'enregistrement approprié.

# *Chapitre IV*

## *Résultats et discussion*

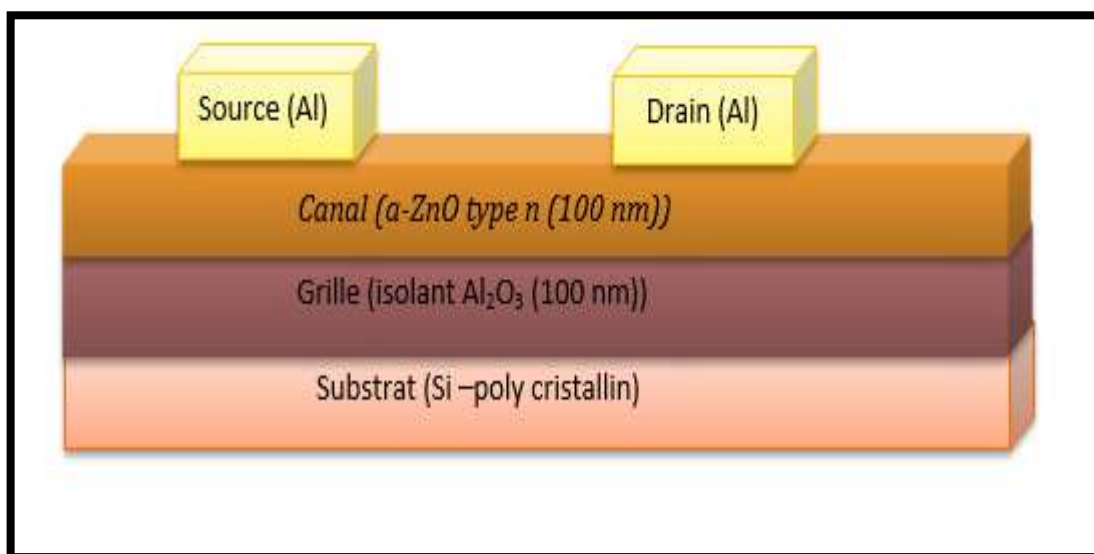
## IV.1 Introduction

Le canal des transistors en couches minces (TFT) constitués de semi-conducteurs transparents tels que le ZnO. Les TFT attirent une grande importance technologique en raison de leur insensibilité à la lumière visible. En fait, plusieurs études ont été menées sur les TFT ZnO. Dans ce chapitre les résultats du travail concernant les caractérisations des transistors en couches minces de ZnO amorphe avec deux types d'isolants ( $\text{Hf}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sont présentés et discutés.

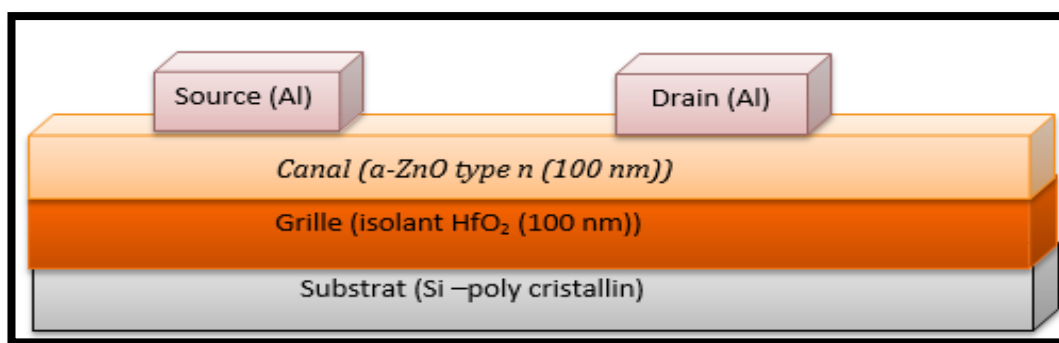
## IV.2 Structure TFT et paramètres de sortie

### IV.2.1 La structure TFT ZnO

Les transistors étudiés sont des TFTs avec ZnO amorphe (a-ZnO) comme matériau actif pour le canal et avec des diélectriques  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{HfO}_2$ . La figure IV.1 présente les structures étudiées dans ce travail. Ils sont constitués d'une couche active a-ZnO (avec une épaisseur de 100 nm) comme canal des couches isolantes ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{HfO}_2$  d'épaisseurs de 100 nm chacun) comme diélectriques de la grille et d'un substrat en forme de grille de Si polycristallin. La longueur (L) et la largeur (W) du canal sont respectivement de 1000 et 30  $\mu\text{m}$ . La source et le drain de l'aluminium (Al d'épaisseurs de 100 nm chacun). Les figures schématisent deux transistors étudiés dans ce travail.



**Figure IV.1** : Structure schématique a- TFT ZnO avec un isolant ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).



**Figure IV.2** : Structure schématique de a- TFT ZnO avec un isolant (HfO<sub>2</sub>).

Les paramètres physiques des matériaux constituant les deux transistors sont résumés dans le tableau IV.1.

Couches	Paramètres	Désignation	Valeur
<b>a -ZnO</b> ( Canal Type-n)	Eg (eV)	Gap d'énergie	3.4
	$\epsilon$	Permittivité relative	8.656
	L ( $\mu\text{m}$ )	Longueur	1000
	W ( $\mu\text{m}$ )	Largeur	30
	d (nm)	Épaisseur	100
<b>HfO<sub>2</sub> (Isolant)</b>	Eg (eV)	Gap d'énergie	5.7
	$\epsilon_{OX}$	Permittivité relative	24
	$d_{OX}$ (nm)	Épaisseur	100
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Isolant)</b>	Eg (eV)	Gap d'énergie	7.0
	$\epsilon_{OX}$	Permittivité relative	9
	$d_{OX}$ (nm)	Épaisseur	100
<b>Source (Al)</b>	d (nm)	Épaisseur	100
<b>Drain (Al)</b>	d (nm)	Épaisseur	100

**Tableau IV.1**: les paramètres physiques des matériaux constituant les deux transistors.

### IV.2.2 Paramètres de sortie

Les principales caractéristiques électriques d'un TFT sont:

- Le courant drain-source en fonction de la tension drain-source ( $I_{DS}$ - $V_{DS}$ ) à une tension de grille différente  $V_{GS}$ . Ils sont appelés caractéristiques de sortie.
- Le courant drain-source en fonction de la tension de grille de ( $I_{DS}$ - $V_{GS}$ ), à différentes tensions de drain-source  $V_{DS}$ . Connu par les caractéristiques de transfert.

À partir de la caractéristique de transfert, un certain nombre de paramètres de sortie sont extraits. On rappelle brièvement ces paramètres, qui sont également présentés à la figure IV.3 (pour plus de détails, voir le chapitre I):

- **Rapport  $I_{ON}/I_{OFF}$** : est le rapport entre les courants de drain maximal et minimal extraits de la caractéristique de transfert TFT en échelle semi logarithmique ( $\log(I_{DS}) - V_{GS}$ )[40].
- **La pente sous le seuil (Subthreshold Swing en Anglais) (S)**: indique l'efficacité de l'activation et de la désactivation du transistor ou la vitesse de sa réponse. Cette métrique est également extraite de la courbe ( $I_{DS} - V_{GS}$ )[40]. en échelle semi logarithmique. Donc elle est l'inverse de la pente maximale de la caractéristique de transfert.
- **La mobilité à effet de champ ( $\mu_{FE}$ )**:  $\mu_{FE}$  est calculé dans le régime linéaire à partir de la pente de la courbe comme suit [41].

$$I_D = \alpha(V_{GS} - V_T) \quad (IV.1)$$

Où

$$\alpha = \frac{W \mu_{FE} C_i}{L} V_{DS} \quad (IV.2)$$

Ensuite :

$$\mu_{FE} = \frac{\alpha L}{W C_i V_{DS}} \quad (IV.3)$$

Où  $L$  et  $W$  sont respectivement la longueur et la largeur du canal,  $C_i$  est la capacité d'oxyde par surface qui est donnée par [41].

$$C_i = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{OX}}{d_{OX}} \quad (\text{IV.4})$$

$\epsilon_{OX}$  est la permittivité relative de l'oxyde,  $\epsilon_0$  est la permittivité du vide et  $d_{OX}$  est l'épaisseur de l'oxyde.

- **Tension de seuil ( $V_{th}$ )** : Cela correspond au  $V_{GS}$  pour lequel une charge significative est proche de l'interface diélectrique / semi-conducteur. Une méthodologie possible pour déterminer ce paramètre consiste à utiliser une extrapolation linéaire de  $I_{DS}$ - $V_{GS}$  à faible  $V_{DS}$ .

La figure IV.3 résume comment les paramètres de sortie ci-dessus sont calculés:

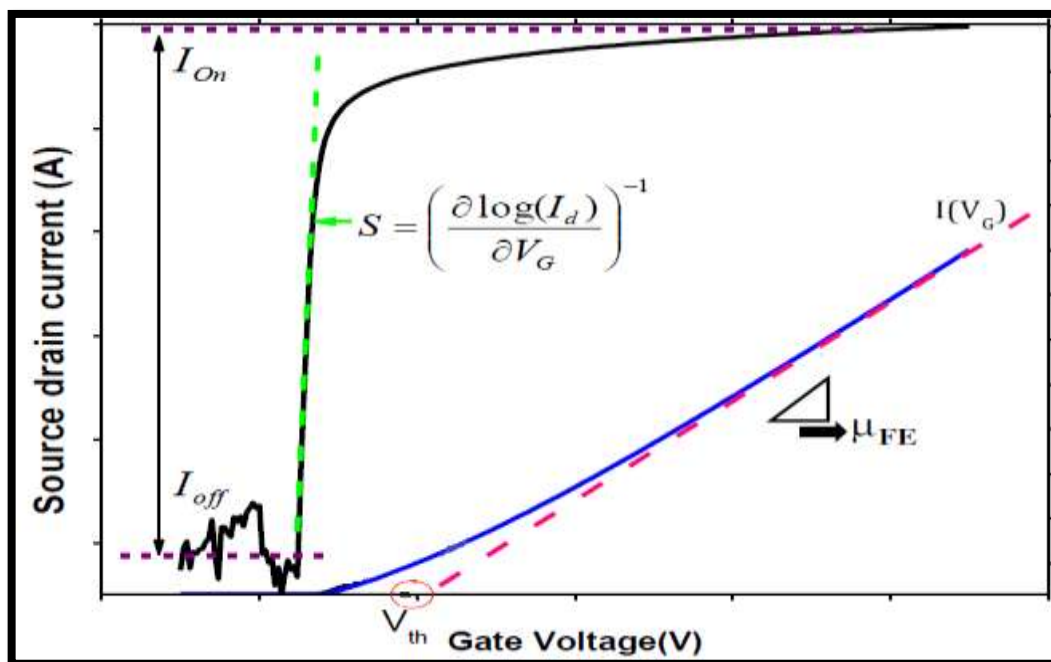
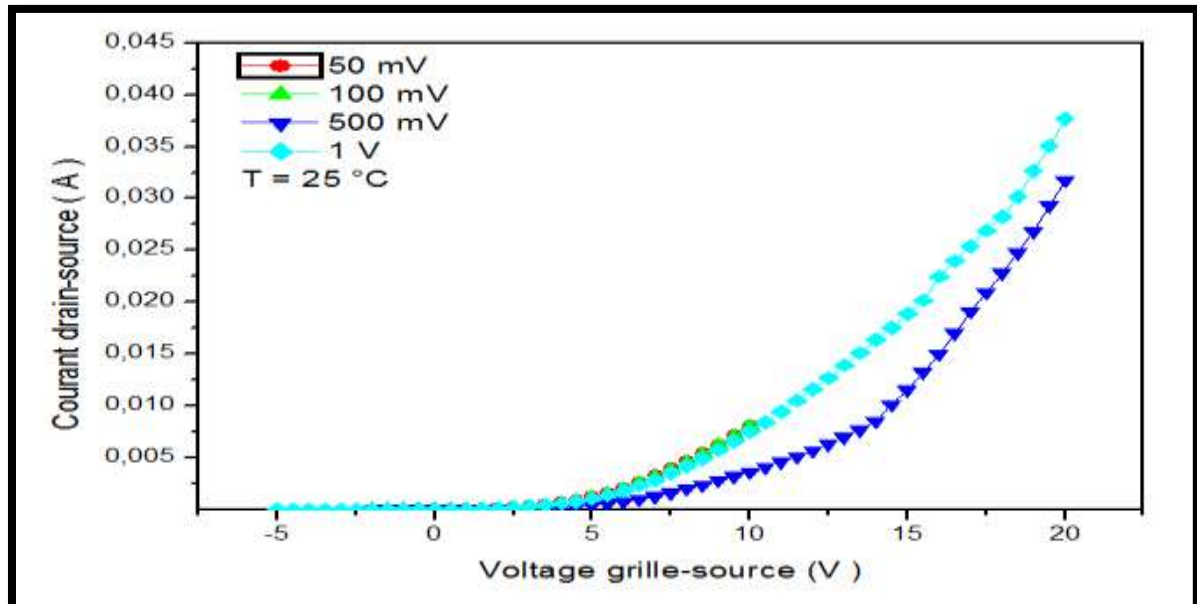


Figure IV .3: Méthodes d'extraction des paramètres de sortie du TFT.

### IV.3 Les caractéristiques de transfert et paramètres de sortie

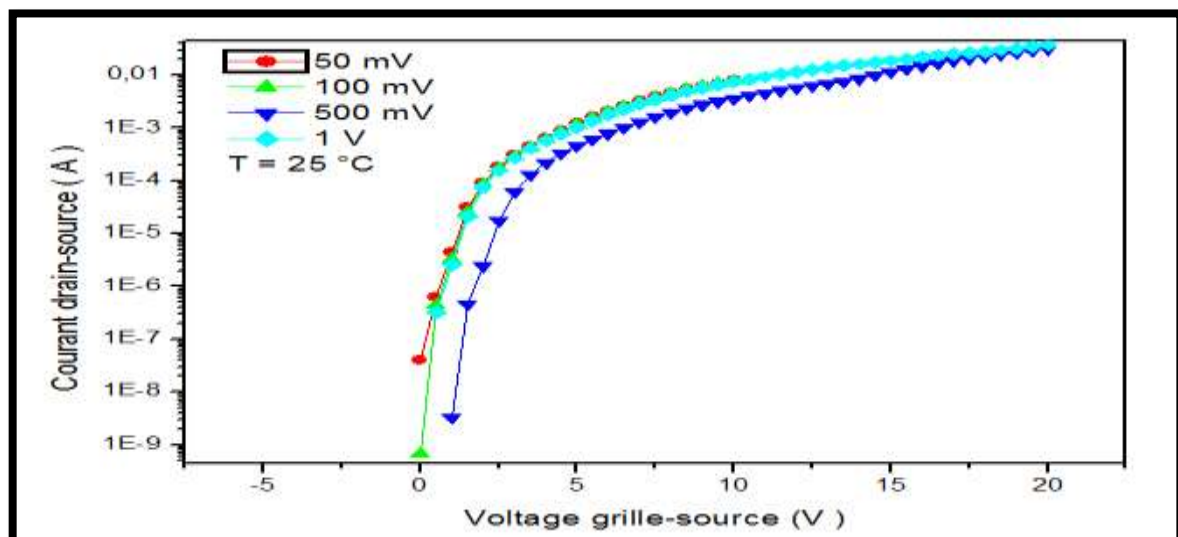
### IV.3.1 Le transistor a-ZnO avec isolant HfO<sub>2</sub>

La figure IV.4 (a et b) représente les variations du courant de drain en fonction des variations de la tension de grille de TFT a-ZnO avec isolant HfO<sub>2</sub> à différentes valeurs de la tension de drain (0.05V, 0.1 V, 0.5V, 1V).



**Figure IV.4.a :** La caractéristique de transfert ( $I_{DS}$ - $V_{GS}$ ) du TFT a-ZnO (HfO<sub>2</sub>)

En échelle linéaire.



**Figure IV.4.b :** La caractéristique de transfert ( $I_{DS}$ - $V_{GS}$ ) du TFT a-ZnO (HfO<sub>2</sub>)

En échelle semi logarithmique.



Les paramètres de sortie calculées à partir de la caractéristique de transfert de TFT a-ZnO HfO<sub>2</sub> sont résumées dans le tableau IV.2.

$V_{DS}$ (V)	$\mu_{FE}$ ( $cm^2.Vs^{-1}$ )	$I_{ON}$ (A)	$I_{OFF}$ (A)	$I_{ON}/I_{OFF}$	$V_{TH}(V)$	SS (V/dec)
<b>1</b>	21.34	$3.76 \times 10^{-2}$	$3.18 \times 10^{-7}$	$1.18 \times 10^5$	7	5.90
<b>0.5</b>	32.32	$3.18 \times 10^{-2}$	$3.30 \times 10^{-9}$	$9.64 \times 10^6$	6.5	4.77
<b>0.1</b>	89.68	$7.46 \times 10^{-3}$	$6.81 \times 10^{-10}$	$1.09 \times 10^7$	4.5	1.18
<b>0.05</b>	192.71	$7.46 \times 10^{-3}$	$4.03 \times 10^{-8}$	$1.81 \times 10^5$	4	2.48

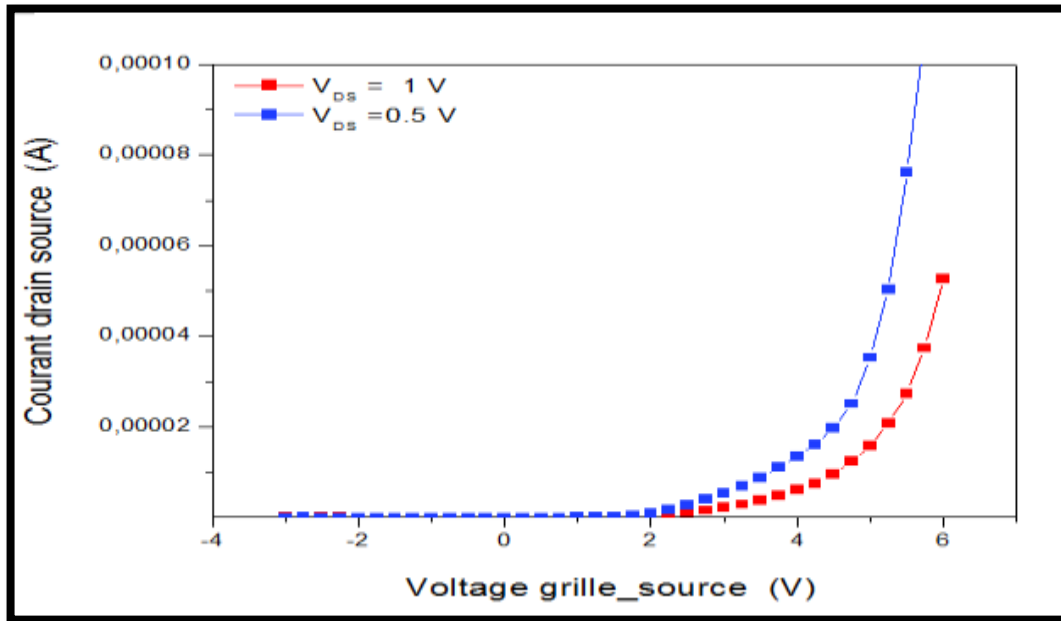
**Tableau IV.2 :** Les sorties calculées à partir de la caractéristique de transfert

De TFTa-ZnO HfO<sub>2</sub>.

Les valeurs de mobilité augmentent de manière plus ou moins inattendue lorsque le voltage entre la source et le drain est réduite. La mobilité est liée à l'efficacité du matériau de transporter le courant. Lorsque la tension  $V_{DS}$  diminue, le champ électrique diminue lui aussi et donc la mobilité augmente. Il faut rappeler que cette mobilité est effective et pas caractéristique du matériau. Les tensions des seuils sont raisonnables avec de petites valeurs et qui augmente avec l'augmentation de  $V_{DS}$ . Ceci est raisonnable selon la relation (IV .1). Les valeurs de la pente sous seuil sont un peu élevées qui indiquent la qualité réduite du transistor. Les valeurs d' $I_{ON}$  et  $I_{OFF}$  et le rapport  $I_{ON}/I_{OFF}$  est très bon.

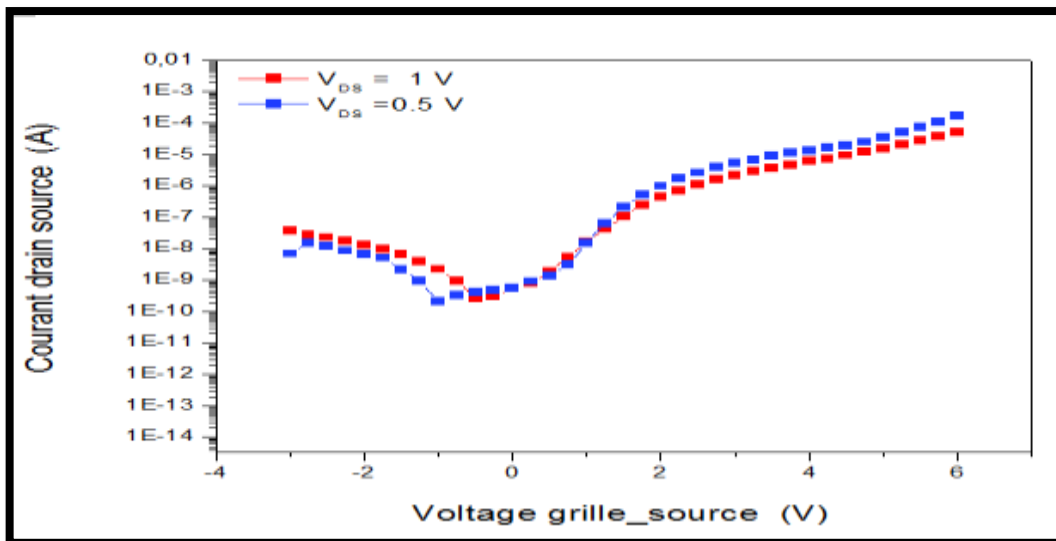
### IV.3.2 Le transistor a-ZnO avec isolant Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

La figure IV.5 (a et b) représente les variations du courant de drain en fonction des variations de la tension de grille de TFT a-ZnO avec isolants Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à différentes valeurs de la tension de drain (0.5 V, 1V).



**Figure IV.5.a** : La caractéristique de transfert ( $I_{DS}$ - $V_{GS}$ ) du TFT a-ZnO ( $Al_2O_3$ )

En échelle linéaire.



**Figure IV.5.b** :La caractéristique de transfert ( $I_{DS}$ - $V_{GS}$ ) du TFT a-ZnO ( $Al_2O_3$ )

En échelle semi logarithmique.

Les sorties calculées à partir de la caractéristique de transfert de TFT a-ZnO  $Al_2O_3$  sont résumées dans le tableau IV.3.

$V_{DS}(V)$	$\mu_{FE}$ ( $cm^2Vs^{-1}$ )	$I_{ON}$ (A)	$I_{OFF}$ (A)	$I_{ON}/I_{OFF}$	$V_{TH}(V)$	SS (V/dec)
<b>1</b>	0.12	$5.27 \times 10^{-5}$	$5.053 \times 10^{-9}$	$1.3 \times 10^4$	3.94	1.92
<b>0.5</b>	0.67	$1.45 \times 10^{-4}$	$2.24 \times 10^{-9}$	$6.9 \times 10^4$	4.58	1.56

**Tableau IV.3 :** Les sorties calculées à partir de la caractéristique de transfert

De TFT a-ZnO Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Les valeurs de mobilité augmentent mais avec une légère augmentation lorsque le voltage entre la source et le drain est réduite. Les tensions de seuil est raisonnable avec des très petites valeurs. Et exceptionnellement ils augmentent avec la diminution de  $V_{DS}$ . Les valeurs de la pente sous le seuil est diminué avec la diminution de la tension  $V_{DS}$ . Les valeurs d' $I_{ON}$ ,  $I_{OFF}$  et le rapport  $I_{ON}/I_{OFF}$  est un peu faible.

#### IV.4 La comparaison

Parmi tous les paramètres du transistor, l'effet du type d'isolant peut être déterminant à la performance du transistor. Et en comparant les caractéristiques obtenues à partir de ce travail, il a été observé qu'il existe une variation considérable entre la mobilité des deux transistors. Pour que les valeurs de mobilités de transistor a-ZnO avec isolant HfO<sub>2</sub>, ils sont très élevés par rapport au le transistor a-ZnO avec comme isolant Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. De plus, il a été constaté que la tension de seuil dans le dispositif à transistor a-ZnO (HfO<sub>2</sub>) est supérieure à celui du transistor a-ZnO (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Aussi, Les valeurs de rapport  $I_{ON}/I_{OFF}$  et les pentes sous le seuil SS au dispositif TFT a-ZnO (HfO<sub>2</sub>) sont beaucoup plus grandes que celles d'un dispositif TFT a-ZnO (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

#### IV.5 Conclusion

Les résultats dans ce chapitre montrent que le type d'isolation a un impact significatif sur les caractéristiques et les performances du transistor. Il en a également constaté que les performances du TFT a-ZnO (HfO<sub>2</sub>) sont bien meilleures que celles du TFT a-ZnO (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

***Conclusion  
Générale***

### Conclusion général

Dans ce travail, une étude expérimentale a été menée sur les transistors à effet de champ en couches minces de ZnO. L'étude expérimentale est réalisée à l'aide de l'analyseur de dispositifs à semi-conducteurs KEYSIGHT B1500A. Cet appareil mesure les propriétés électriques  $I_D$ - $V_G$  de ces transistors, en tenant compte des effets du type des isolants de grille ( $HfO_2$ ) et ( $Al_2O_3$ ). Ceci a comme but la comparaison des transistors avec différents isolants de grille et en déduire les performances de ces transistors. Les conclusions sont les suivantes:

- Lorsqu'une tension faible est appliquée entre la source et le drain, les paramètres : mobilité ; la pente sous seuil et la tension de seuil sont élevées.
- Il est constaté que les valeurs des pentes sous-seuil pour TFT-ZnO ( $HfO_2$  comme isolant) est plus grande par rapport à ceux pour de TFT-ZnO ( $Al_2O_3$  comme isolant).
- Le transistor TFT-ZnO ( $Al_2O_3$ ) a une mobilité à effet de champ plus grand par rapport à celle de TFT-ZnO ( $HfO_2$ ).
- Le rapport  $I_{ON} / I_{OFF}$  a été trouvé plus important pour TFT-ZnO ( $HfO_2$ ) par rapport ce du TFT-ZnO ( $HfO_2$ ).
- La tension de seuil pour le TFT ZnO ( $HfO_2$ ) est supérieure à celui du TFT-ZnO ( $Al_2O_3$ ).

Comme perspective, il est proposé d'améliorer la qualité du transistor en utilisant d'autres méthodes de croissance des couches minces de ZnO ainsi que la déposition de l'isolant.

***Références***  
***Bibliographiques***

## **References Bibliographiques**

1. Guiza, D. (2009) "Analyse Des Transistors A Effet De Champ Mesfet Gaas." Memoire De Magister ,Universite Mentouri Constantine.
2. Noviyana, I., A. D. Lestari, Et Al. (2017). "High Mobility Thin Film Transistors Based On Amorphous Indium Zinc Tin Oxide." *Materials* **10**(7): 702.
3. Kandpal, K. And N. Gupta (2016). "Zinc Oxide Thin Film Transistors: Advances, Challenges And Future Trends." *Bulletin Of Electric Al Engineering And Informatics* 5(2): 205-212.
4. Nguyen, T. T. T. (2014). "Etude Des Transistors En Couches Minces A Base D'igzo Pour Leur Application Aux Ecrans Plats A Matrice Active Lcd Et Oled". Thèses De Doctorat, Université De Grenoble.
5. Talagrand, C. M. (2015). "Transistor En Couches Minces Avec Canal En Oxyde D'indium De Gallium Et De Zinc: Matériaux, Procédés, Dispositifs.", Thèses De Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Des Mines De Saint-Etienne.
6. Agti, S. (2013). "Prédiction Des Propriétés Structurales, Electroniques, Elastiques Et Optiques Des Composes Binaires Zno, Beo. Mémoire De Master, Université De Biskra
7. Gogoi, P., R. Saikia, Et Al. (2015). "Top Gate Zno– Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Thin Film Transistors Fabricated Using A Chemical Bath Deposition Technique." *Journal Of Semi-Conductors* **36**(4): 044002.
8. Taouririt, T. (2013). "L'effet Du Débit De La Solution Sur Les Propriétés Des Couches Minces D'oxyde De Zinc (Zno) Déposées Par Spray Pyrolyse, Mémoire De Master Université De Biskra.
9. Khadidja, N. (2018). "Numerical Simulation Of Polycrystalline Zno-Based Thin Film Transistor By Silvaco-Atlas.". Mémoire De Master, Université De Biskra.
10. Davesne, C. (2014). "Elaboration Et Caractérisation De Films De Zno Dopé Pour Des Applications Optoélectroniques.", Thèses De Doctorat, Université De Caen Basse Normandie.
11. Bouhssira, N. (1955). "Elaboration Des Films Minces D'oxyde De Zinc Par Evaporation Et Par Pulvérisation Magnétron Et Etude De Leurs Propriétés.". Thèses De Doctorat, Université Constantine 1.

12. Bedia, A. A. (2015). "Synthèse Et Caractérisation Des Nanostructures D'oxyde De Zinc (Zno) Pour Des Dispositifs A Applications Biomédicale S.". Thèses De Doctorat, Université Université
13. Brochen, S. (2012). "Propriétés Electriques Du Zno Monocristallin, Grenoble."
14. Srikant, V. And D. R. Clarke (1998). "On The Optical Band Gap Of Zinc Oxide." *Journal Of Applied Physics* **83**(10): 5447-5451.
15. Gasaki, Y. And H. Saito (1991). "Substrate Temperature Dependence Of Electrical Properties Of Zno: Al Epitaxial Films On Sapphire (1210)." *Journal Of Applied Physics* **69**(4): 2190-2195.
16. Aoki, T., Y. Shimizu, Et Al. (2002). "P-Type Zno Layer Formation By Excimer Laser Doping." *Physica Status Solidi (B)* **229**(2): 911-914.
17. Gokarna, A., R. Parize, Et Al. (2014). "Highly Crystalline Urchin-Like Structures Made Of Ultra-Thin Zinc Oxide Nanowires." *Rsc Advances* **4**(88): 47234-47239.
18. Derbali, A. (2011). "Effet De La Distance Du Bec Et La Température Du Substrat Sur Les Propriétés Des Couche Minces D'oxyde De Zinc (Zno)". Mémoire De Master, Université Mohamed Khider-Biskra.
19. Daranféd, O.(2007) "Elaboration Et Caractérisation Des Couches Minces De Sulfure De Zinc Préparées Par Spray Ultrasonique.",Mémoire De Master, Université Mentouri-Constantine
20. Besra, S Et S, Afif. (2017). "Elaboration Et Caractérisation De Couches Minces De Sulfure De Zinc Obtenues Par Spray Pyrolyse.", Mémoire De Master Université De Ouargla.
21. Dhellemmes, S. (2006). "Contribution A L'étude De L'épitaxie Par Jets Moléculaires A Grande Echelle De Semi-Conducteurs Phosphorés.". Thèses De Doctorat, Université Des Sciences Et Technologie De Lille-Lille I.
22. Ynineb, F. (2010). "Contribution A L'élaboration De Couches Minces D'oxydes Transparents Conducteurs (Tco)". Mémoire De Magister, Université Mentouri Constantine.
23. Barir, R. (2013). "Etude De Propriétés Thermiques En Phase Gazeuse Lors De La Déposition Dans Les Procèdes Lcvd ", Mémoire De Master Université Kasdi Merbah Ouargla.
24. Kamli, K. (2013). "Elaboration Et Caractérisations Physicochimique Des Couches Minces De Sulfure D'étain Par Spray Ultrasonique: Effet Des Sources D'étain.", Mémoire De Master, Université Mohamed Khider-Biskra.



25. [Http://Dx.Doi.Org/10.5772/Intechopen.78221](http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78221)
26. Bozetine, H. (2017). "Synthèse Des Nanostructures De Zno Par La Méthode Hydrothermale Et Leurs Applications.", Thèses De Doctorat, Université Mouloud Mammeri.
27. - Feltane Et All. A.Roumili, (2016). "Élaboration Et Caractérisations Des Couches Minces D'oxyde De Zinc Déposées Par Voies Chimique Et Physique.". Mémoire De Master, Université Abderrahmane Mira – Bejaia.
28. [Http://Dx.Doi.Org/10.1063/1.4789956](http://dx.doi.org/10.1063/1.4789956)
29. Jin, J. W. (2013). "Modélisation Physique Et Compacte De Transistors En Couches Minces A Base De Silicium Amorphe Ou Microcristallin.". Thèses De Doctorat, Ecole Polytechnique X.
30. Brochet, J. (2011). "Etude De Transistors En Couches Minces A Base De Silicium Polymorphe Pour Leur Application Aux Ecrans Plats A Matrice Active Lcd Ou Oled.". Thèses De Doctorat, Université De Grenoble.
31. Nguyen, T. T. T. (2014). "Etude Des Transistors En Couches Minces A Base D'igzo Pour Leur Application Aux Ecrans Plats A Matrice Active Lcd Et Oled." Thèses De Doctorat, Université De Grenoble.
32. Grove, A. S. (1967). "Physics And Technology Of Semiconductor Devices, Wiley.
33. [Http://Literature.Cdn.Keysight.Com](http://literature.cdn.keysight.com)
34. [File:///C:/Users/Lenovo/Appdata/Local/Temp/B1500aconfigurationconnect ionguide-3.Pdf. .](file:///C:/Users/Lenovo/Appdata/Local/Temp/B1500aconfigurationconnect ionguide-3.Pdf)
35. [Https://Mail.Google.Com](https://mail.google.com)
36. [Https://Mail.Google.Com/Mail/U/0/#Inbox?Projector=1](https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox?projector=1)
37. [Http://Literature.Cdn.Keysight.Com/Litweb/Pdf/5989-2785en.Pdf](http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-2785en.pdf)
38. [Https://Www.Keysight.Com](https://www.keysight.com)
39. [Https://Www.Instrumex.De/Datasheet/B1500a.Pdf](https://www.instrumex.de/datasheet/B1500a.pdf)
40. Fedrizzi Vidor, F., G. Inácio Wirth, And U. Hilleringmann, Zno Thin-Film Transistors For Cost-Efficient Flexible Electronics(2018).
41. Labeled, M., "A Study Of An A-Igzo Based Thin Film Transistor.", (2015), Mémoire De Master, Université De Biskra.