

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

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



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

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electronique

Spécialité : **Matériaux et dispositifs électroniques
et photovoltaïques**

Présenté par

M. HAMROUN Ali

M. ZIANI Samir

Thème

**Utilisation de dioxyde d'étain SnO_2 et l'oxyde
de Zinc ZnO comme couche antireflet
pour une cellule solaire à base de silicium.**

Mémoire soutenu publiquement le 02/07/2015 devant le jury composé de :

M. ZIRMI Rachid

Maître de Conférence B, Université M. MAMMERI, Tizi-Ouzou

Président

Mme. NEMMAR Farida

Maître de Conférence B, Université M. MAMMERI, Tizi-Ouzou

Promotrice

Mme. LAGHA-MENOUAR Kahina

Maître de Conférence A, Université M. MAMMERI, Tizi-Ouzou

Examinatrice

Mme. BOUGHIAS.Ouiza

Maître Assistante A, Université M. MAMMERI Tizi-Ouzou

Examinatrice

Remerciement

Nous tenons à remercier Mme NEMMAR, Farida, notre promotrice, pour la totale confiance qu'elle nous a accordée. Nous lui sommes tout particulièrement reconnaissants pour les conseils et l'autonomie qu'elle a su nous donner qui nous ont, entre autre, permis d'élargir l'horizon de nos recherches.

Nous voudrions remercier aussi les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail, Monsieur R. ZIRMI, le responsable du master photovoltaïque, qui nous a fait l'honneur d'accepter de présider le jury et les membres de jury Mme K.LAGHA-MENOUER et Mme. O.BOUHIAS, qui ont manifesté l'amabilité d'examiner ce travail.

Nous tenons à remercier tous nos enseignants du master :

*BELKAID.M.S, ZIRMI.R, NEMMAR.F, LAGHA-MENOUER.K,
BOUGHIAS.O, HATEM.DJ, HOUCINE.D, DJAHMOUM.M,
ALLEM.H, KACHENORA, SIDI-SAID.A, AMIROU.Z
ZOUAK.B, NACHEF.M, TAZIBT.S,
HADJ ARAB.A . MELLAH. R,*

Nous tenons à remercier aussi tous nos camarades du master.

Dédicaces

A mes parents

A ma femme

A toutes ma famille

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

Mr. HAMROUN Ali

Dédicaces

A mes parents

A ma femme

A toutes ma famille

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

Mr. ZIANI Samir

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Largeurs des bandes interdites de quelques TCOs	6
Tableau IV.1 : Effet de la réflexion sur les propriétés de la structure [SnO ₂ -Si(N ⁺⁺)-Si(P)].....	43
Tableau IV.2: Influence du dopage de la couche SnO ₂ sur les paramètres de la structure [SnO ₂ -Si(N ⁺⁺)-Si(P)].....	44
Tableau IV.3 : Effet de la réflexion sur les propriétés de la structure [ZnO-Si(N ⁺⁺)-Si(P)].....	47
Tableau IV.4: Influence du dopage de la couche ZnO sur les paramètres de la structure [ZnO-Si(N ⁺⁺)-Si(P)].....	47
Tableau IV.5 : Propriétés de la cellule solaire simulée dans les différents cas.....	49

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Evolution du nombre de publications traitant de zinc, In ₂ O ₃ ET SnO ₂ depuis 1970 à 2008	4
---	---

Figure I.2 : La fenêtre optique des oxydes transparents conducteurs (TCOs).....	9
Figure I.3 : Rayonnements incidents, réfléchis et transmis entre trois milieux d'indice de réfraction diffère.....	10
Figure I.4 : Maille élémentaire du SnO ₂ (structure rutile).....	11
Figure I.5 : Présentation de la bande interdite de dioxyde d'étain.....	12
Figure I.6 : spectres de transmission (T), réflexion(R) et absorption(A) d'un échantillon de SnO ₂ : F de 1.14 μ m d'épaisseur.....	13
Figure I.7. Schéma de la structure hexagonale compact.....	16
Figure I.8 : Structure cristalline type wurtzite de l'oxyde de zinc.....	16
Figure I.9 : Présentation du gap de l'oxyde de zinc.....	17
Figure. I.10 : Transmission d'un film d'oxyde de zinc recuit pour différentes températures.....	18
Figure II.1: représentation schématique des processus CVD.....	21
Figure II .2 : Représentation schématique de la technique spray pyrolyse.....	22
Figure II.3 : Dépôt de couches minces par trempage–tirage.....	23
Figure II.4 : Schéma conventionnel d'un système d'ablation laser.....	23
Figure II.5: Schéma de principe de la méthode des quatre pointes.....	24
Figure II.6 : Principe de mesure de l'épaisseur par le profilomètre TENCOR P11.....	25
Figure II.7 : Schéma représentant le principe de la diffraction des rayons X par les plans réticulaires d'indices h, k et l.....	26
Figure II.8 : Dispositif Microscope Electronique à Balayage.....	27
Figure II.9 : Représentation schématique du la Spectroscopie UV-Visible.....	28
Figure III.1 : Représentation de l'irradiation du rayonnement solaire.....	30
Figure III.2 : Structure et diagramme de bandes d'une cellule solaire sous éclairment.....	31
Figure III.3 : Schéma électrique d'une cellule solaire idéal.....	32

Figure III.4 : circuit équivalent d'une cellule solaire réelle.....	33
Figure III.5 : Caractéristiques I-V sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.....	34
Figure IV.1 : Fenêtre du logiciel de simulation PC1D.....	39
Figure IV.2 : La structure à homojonction [Si(N ⁺⁺)-Si(P)] sous PC1D.....	40
Figure IV.3 : La caractéristique I(V) et Pmax de la jonction [Si(N ⁺⁺)-Si(P)] sous PC1D.....	40
Figure IV.4 : La structure à homojonction avec couche antireflet [SnO ₂ -Si(N ⁺⁺)-Si(P)] sous PC1D...	41
Figure IV.5 : Absorption de SnO ₂ en fonction de la longueur d'onde.....	42
Figure IV.6: La caractéristique I(V) et Pmax de [SnO ₂ -Si(N ⁺⁺)-Si(P)] sous PC1D.....	42
Figure IV.7: La structure à homojonction avec couche antireflet [ZnO-Si(N ⁺⁺)-Si(P)] sous PC1D.....	44
Figure IV.8 : Absorption de ZnO en fonction de la longueur d'onde.....	45
Figure IV.9 : La caractéristique I(V) de La structure [ZnO-Si(N ⁺⁺)-Si(P)].....	46

Sommaire

Table des matières

RESUME.....	1
INTRODUCTION.....	2
Chapitre I : Etat de l'art des TCO	
I. Etat de l'art des TCOs.....	4
I.1. Introduction	4
I.2. Définition d'un TCO.....	5
I.3. Propriétés des TCOs.....	5
I.3.1. Propriétés électriques des TCOs.....	5
I.3.2. Les propriétés optiques des oxydes transparents conducteurs.....	8
I.4. Principe d'utilisation des TCOs comme couches antireflet.....	10
I.5. Le dioxyde d'étain SnO ₂	11
I.5.1. Structure cristalline.....	11
I.5.2. Propriétés électriques.....	12
I.5.3. Propriétés optiques.....	13
I.5.4. Applications du SnO ₂	14
I.6. L'oxyde de Zinc ZnO.....	15
I.6.1. Propriétés structurales du ZnO.....	15
I.6.2. Propriétés électriques du ZnO.....	17
I.6.3. Propriétés optiques du ZnO.....	18
I.6.4. Applications du ZnO.....	19
Chapitre II : Techniques d'élaborations et de caractérisation des couches minces	
II. Techniques d'élaborations et de caractérisation des couches minces.....	20
II.1. Méthodes chimique.....	20
II.1.1. Dépôt chimique en phase vapeur (CVD).....	20
II.1.2. Le spray pyrolyse.....	22
II.1.3. La technique sol-gel.....	22
II.2. Dépôt physique en phase vapeur (PVD)	23
II.2.1. Le dépôt par ablation laser réactive.....	23
II.3. Techniques de caractérisations structurale, optique et morphologique.....	24
II.3. 1. Méthode des quatre pointes.....	24
II.3.2. Les mesures mécaniques avec le profilomètre.....	25

II.3.3. La diffraction des rayons X (DRX).....	26
II.3.4. La microscopie électronique à balayage.....	27
II.3.5. Spectroscopie UV-Visible.....	28
Chapitre III : la cellule solaire photovoltaïque	
III. Définition d'une cellule solaire photovoltaïque.....	29
III.1. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire.....	29
III.2. Principe de fonctionnement de la cellule solaire.....	30
III.3. La modélisation d'une cellule solaire.....	31
III.4. Différents paramètres de la cellule photovoltaïque.....	34
III.4.1. Courant de court-circuit I_{cc}	34
III.4.2. Tension à circuit ouvert V_{co}	35
III.4.3. Facteur de forme ff	35
III.4.4. Rendement de conversion.....	35
III.5. Pertes fondamentales et technologiques dans les cellules photovoltaïques.....	36
III.5.1. Pertes physiques.....	36
III.5.2. Pertes technologiques.....	37
Chapitre IV : Simulation de l'effet de la couche antireflet sur les paramètres d'une cellule solaire	
IV. Simulation de l'effet anti reflet sur les paramètres d'une cellule solaire.....	38
IV.1. Présentation du logiciel.....	38
IV.2. Simulation de la structure à homojonction [Si(N ⁺⁺)-Si(P)].....	40
IV.2.1. La caractéristique I(V) de la structure [Si(N ⁺⁺)-Si(P)].....	40
IV.3. Simulation de la structure à homojonction avec couche antireflet [SnO ₂ -Si(N ⁺⁺)-Si(P)].....	41
IV.3.1. Paramètres de la structure [SnO ₂ -Si(N ⁺⁺)-Si(P)] simulées.....	41
IV.3.2. La caractéristique I(V) de la structure [SnO ₂ -Si(N ⁺⁺)-Si(P)].....	42
IV.3.3. Les paramètres qui influent sur le rendement d'une cellule solaire [SnO ₂ - Si(N ⁺⁺)-Si(P)].....	43
a. Influence de la réflexion du SnO ₂	43
b. Influence du dopage de SnO ₂	43
IV.4. Simulation de la structure à homojonction avec couche antireflet [ZnO-Si(N ⁺⁺)-Si(P)].....	44
IV.4.1 Paramètres de la structure [ZnO-Si(N ⁺⁺)-Si(P)] simulées.....	44
IV.4.2 La caractéristique I(V) de la structure [ZnO-Si(N ⁺⁺)-Si(P)]......	46

IV.4.3. Les paramètres qui influent sur le rendement d'une cellule solaire	
[ZnO- Si(N ⁺⁺)-Si(P)].....	46
a. Influence de la réflexion du ZnO.....	46
b. Influence du dopage de ZnO.....	47
IV.5. Comparaisons des résultats obtenus.....	49
CONCLUSION.....	50
Références bibliographiques.....	51

RESUME :

Au cours de ce travail, nous avons étudié l'utilisation des TCOs (Oxyde Transparents Conducteur), (le dioxyde d'étain SnO_2 et l'oxyde de zinc ZnO) comme couche antireflet pour une cellule solaire à base de silicium, aussi leurs bonne conductivité électrique combinée à une transparence élevée nous permet de les utilisés comme électrode transparente. Afin d'optimiser l'influence de ces couches, soit de SnO_2 ou de ZnO sur les paramètres de la cellule $[\text{Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$, on a utilisé une simulation numérique à une dimension PC1D, on tenant compte des variations de la réflexion, l'épaisseur et le dopage de ces couches. En effet les résultats de la simulation montrent que ces paramètres jouent un rôle primordial dans les performances de la cellule, d'après une comparaison entre les trois cellules $[\text{Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$, $[\text{SnO}_2\text{-Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$, $[\text{ZnO}\text{-Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$, l'utilisation de couche antireflet à la surface de la cellule homo-jonction apporte une amélioration importante sur ces paramètres à savoir le courant de court circuit (I_{cc}) qui augmente de 0.0088 A et l'augmentation du rendement de 4.4 % pour la couche antireflet SnO_2 , et de 4.5 % pour la couche antireflet ZnO . Ces résultats montrent aussi que la cellule $[\text{ZnO}\text{-Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$ de (17.3 %) à un bon rendement que la cellule $[\text{SnO}_2\text{-Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$ (17.2 %).

Mots clés :

Photovoltaïque, cellule solaire, TCO, couche antireflet, ZnO , SnO_2 , simulation PC1D.

Sommaire

INTRODUCTION :

En raison du développement de l'industrie, une croissance de la consommation mondiale d'électricité a été observée pendant les dernières décennies. Cependant, la plupart de l'énergie par combustion de ressources non renouvelables (carbone, pétrole, gaz, nucléaire) ont un délai d'épuisement est estimé à quelques décennies.

De plus, ce type de production d'énergie est très polluant. Le développement des sources d'énergies renouvelables et non polluantes est donc d'actualité. Parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent, les flux marins et océaniques, la géothermie, le solaire (cellules photovoltaïques), etc.... Ce dernier est une source d'énergie très puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 Watt/m² [1]. Donc la conversion (transformation) de l'énergie du rayonnement solaire en électricité est nécessaire. L'électricité photovoltaïque est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules photovoltaïques. Le matériau le plus commercialisé dans l'industrie photovoltaïque est le silicium cristallin (abondant, non toxique).

Dans la fabrication des cellules photovoltaïque en silicium, la réduction des pertes par réflexion doit impérativement être prise en compte, ces pertes s'évaluent entre (30 % à 35 %) sur la surface de silicium, des améliorations importante peuvent être atteintes sur le rendement de la cellule par réduction de ces pertes en utilisant des TCOs (exemple SnO₂ ou ZnO comme couche antireflet qui fait l'objectif de notre travail, au premier lieu, on va faire une étude bibliographique puis une simulation sous PC1D avec la variation des différentes paramètres à savoir l'épaisseur, la réflexion et le dopage des TCOs.

Notre travail est reparti en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons l'état de l'art des oxydes transparents conducteurs (TCOs), leurs propriétés électriques et optiques, le principe d'une couche antireflet et plus particulièrement celles de SnO₂ et ZnO, qu'on va utiliser comme couche antireflet dans une cellule solaire à base de silicium.

Le deuxième chapitre est consacré pour les techniques de dépôt et de caractérisation des Oxydes Transparents Conducteurs en couches minces.

Dans le troisième chapitre nous présentons quelques notions préliminaires sur le rayonnement solaire, puis sur la cellule solaire, son principe de fonctionnement et ces différents paramètres et on termine par les pertes fondamentales dans les cellules photovoltaïques.

Enfin dans le dernier chapitre nous faisons une simulation sous logiciel PC1D (Personnel Computer One Dimensionnel), de ces trois structure solaire à savoir [Si(N⁺⁺)-Si(P)], [SnO₂-Si(N⁺⁺)-Si(P)], [ZnO-Si(N⁺⁺)-Si(P)], suivie d'une interprétation des résultats et une comparaison entre ces dernières.

Chapitre I

Etat de l'art des TCOs

I. Etat de l'art des TCOs :

Dans ce chapitre nous présentons l'état de l'art sur les oxydes transparents conducteurs (TCO), leurs propriétés électriques et optiques, aussi nous présentons le principe d'une couche antireflet et enfin nous ferons la présentation de SnO_2 et ZnO qu'on va les utiliser comme couche antireflet dans une cellule solaire.

1.1 Introduction :

Les oxydes transparents conducteurs (Transparents Conductive Oxydes) TCO sont des semi-conducteurs dégénérés à large gap. Ils présentent la double propriété d'être de bons conducteurs électriques et transparents dans le domaine du visible.

Le premier TCO étudié et synthétisé est l'oxyde de cadmium en 1907 par K. Badeaker ; il a remarqué qu'après exposition à l'air d'un film de cadmium, celui-ci devient transparent tout en maintenant son aspect conducteur [2]. Le premier oxyde transparent conducteur qui a été breveté pour sa découverte à l'état non dopé et à l'état dopé est l'oxyde d'étain SnO_2 , ceci, respectivement en 1931 et 1942 [3,4].

Un des facteurs illustrant l'activité liées à une recherche spécifique est le nombre de publications éditées par année portant sur ces matériaux. La figure (I.1) montre l'évolution de publication concernant l'oxyde de zinc, d'indium et d'étain depuis les années 70 jusqu'à 2008[5]. Ces trois oxydes métalliques sont les plus étudiés car ils ont démontré les meilleurs propriétés. Nous remarquons que l'oxyde de zinc le plus étudié récemment.

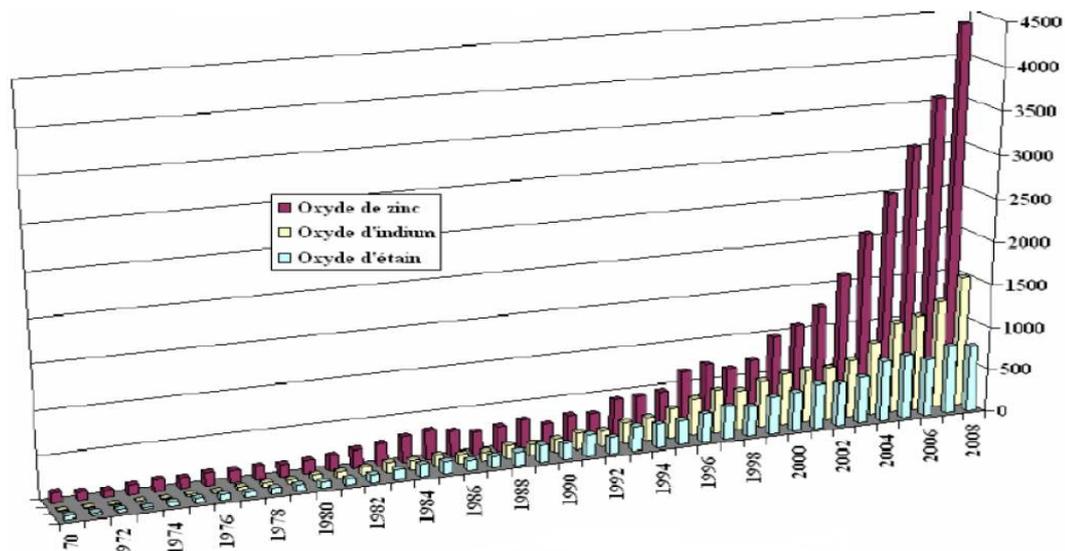


Figure I.1 : Evolution du nombre de publications traitant de zinc, Indium et SnO_2 depuis 1970 à 2008. [6].

I.2. Définition d'un TCO :

Selon la théorie des bandes d'énergie, trois états électriques sont possibles : métal, isolant et semi-conducteur :

✓ Le métal, la bande de conduction (BC) et la bande de valence (BV) se recouvrent, permettant la libre circulation des électrons.

✓ Le semi-conducteur, quant à lui, a une bande interdite qui sépare BV et BC communément appelée gap et notée E_g . Les électrons ne peuvent pas prendre les énergies situées dans cette bande. Il faut qu'ils acquièrent de l'énergie pour passer dans BC.

✓ Pour un gap supérieur à 5 eV [7], on parle d'isolant car même à température ambiante, BC est vide.

✓ Les TCOs sont des semi conducteurs dégénérés, c'est-à-dire leurs niveau de Fermi se situe proche de la bande de conduction, voire même à l'intérieurs de celle-ci pour des TCOs fortement dopés. Cela signifie que leur bande de conduction est déjà remplie même à température ambiante ce qui les rend conducteurs. De plus leurs gap élevé (3 à 4.2) eV les empêche d'absorber les photons ayant une énergie inférieure à ce gap et les rend donc transparent dans le visible.

Cependant, les semi-conducteurs possédant un large gap (au minimum supérieur à 3.1 eV correspondant à une longueur d'onde de 400 nm) sont théoriquement transparents dans le domaine du visible [8].

I.3. Propriétés des TCOs :

En général, un TCO doit présenter trois qualités importantes : haute transparence optique, une bonne conductivité électrique et la durabilité mécanique. [4].

I.3.1. Propriétés électriques des TCOs :

Les propriétés électriques des oxydes transparents conducteurs sont étudiées depuis les années 1970 [9]. Ces propriétés électriques sont décrites par celles de :

A. La largeur de la bande interdite des TCOs :

Les oxydes transparents conducteurs ont un large gap qui varie entre 3,01 eV et 4,6 eV (tableau I-1). Les largeurs des bandes interdites des oxydes transparents varient selon la méthode utilisée pour leurs dépôts:

Le TCO	Le gap (eV)
SnO ₂	(3,6-4,2)
ZnO	(3,2-3,3)
ITO	4,2
ZTO	> 3
TiO ₂	(3-3,2)

Tableau I.1 : Largeurs des bandes interdites de quelques TCOs.

B. La conductivité électrique σ ($\Omega \cdot \text{cm}$)-1 :

Du fait de l'aspect semi-conducteur dégénéré de ces matériaux, leur conductivité σ se réduit à

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu = 1/\rho \quad (\text{I.1})$$

Avec :

q : la charge d'électron,

n : la concentration d'électron,

μ : la mobilité d'électron,

L'inverse de la conductivité est la résistivité ρ .

C. La résistance surfacique R_s (Ω .):

Comme les oxydes transparents conducteurs sont utilisés sous forme de couches minces, leurs propriétés électriques sont définies par une grandeur importante qui est la résistance surfacique R_s , (équation I-2), connue sous le nom de la résistance par carrée. Elle s'exprime par le rapport entre la résistivité ρ et l'épaisseur d de la couche d'oxyde:

$$R_s = \rho/d \quad (\text{I.2})$$

D. La mobilité μ :

La mobilité des porteurs est un paramètre qui influe sur la conductivité électrique, et l'augmentation de cette grandeur améliorera les propriétés électriques du TCO. La mobilité dépend essentiellement de la diffusion des porteurs de charge dans le réseau du matériau.

En effet, plus la concentration des porteurs est élevée, plus leur diffusion devient importante donc la mobilité diminue [10].

Les TCOs préparés sans impuretés désirable, c'est-à-dire non dopé sont des semi-conducteurs dégénérés de type n, avec une concentration en porteurs de charges qui varie entre 10^{19} cm^{-3} à 10^{21} cm^{-3} [2], leurs conductivité électrique est due essentiellement au non stœchiométrie de ces matériaux déposés en couche minces qui fait apparaitre des lacunes d'oxygène lors de la synthèse de ces film minces. Ces lacunes augmentent la conduction, du fait qu'elles créent sous la bande de conduction des niveaux qui s'ionisent, les atomes interstitiels participent aussi à la conduction des TCOs non dopé.

I.3.1.1 - Dopage des TCOs :

➤ Dopage type n :

Ce type de dopage se fait par le remplacement des atomes du métal ou de l'oxygène. Un tel dopage dépend de la taille du dopant et de sa solubilité dans le réseau de l'oxyde transparent conducteur. Le dopage de dioxyde d'étain est possible avec les éléments comme : le fluor (F) [11], l'antimoine (Sb) [12], le niobium (Nb) [13], le Tantale (Ta) [14], ainsi que par certains métaux comme : le cuivre (Cu) [15], le fer (Fe) [16], le cobalt (Co) [17] et le nickel (Ni) [18]. Quant à l'oxyde de zinc il est dopé généralement par l'aluminium Al [19] mais aussi par du gallium Ga [20] et de l'indium In [21].

➤ Dopage type p :

Les TCOs à l'état intrinsèque sont de type n alors le dopage des TCOs de type p reste à l'état de la recherche. Ces dernières années le dopage type p [22] fait partie des études faites sur certains oxydes transparents conducteurs. L'oxyde de zinc dopé p est le TCO le plus étudié pour ce type de dopage. Il est obtenu par substitution de l'oxygène [23], par l'aluminium azote Al-N [23] et par l'azote N [24].

I.3.2. Les propriétés optiques des oxydes transparents conducteurs :

Les propriétés optiques des matériaux sont régies par trois phénomènes essentiels qui sont la transmission, la réflexion et l'absorption, ces phénomènes étant caractérisés par les paramètres suivants :

T : Transmittance ou facteur de transmission,

R : Réflectance ou facteur de réflexion,

A : absorbance ou facteur d'absorption,

α : coefficient d'absorption.

- **Le facteur de transmission T :**

Cette grandeur optique est définie comme étant le rapport entre l'intensité de la lumière transmise (ϕ_T) à travers un matériau par rapport à l'intensité de la lumière incidente à sa surface (ϕ_0).

$$T = \frac{\phi_T}{\phi_0} \quad (\text{I.3})$$

- **Le facteur de réflexion R :**

La réflectance d'un matériau est l'intensité de la lumière qui est réfléchi au niveau de sa surface (ϕ_R) par rapport à l'intensité lumineuse incidente (ϕ_0).

$$R = \frac{\phi_R}{\phi_0} \quad (\text{I.4})$$

- **Le facteur d'absorption A:**

$$A = \frac{\phi_A}{\phi_0} \quad (\text{I.5})$$

➤ La conservation du flux donne les relations suivantes :

$$\phi_0 = \phi_A + \phi_R + \phi_T \quad (\text{I.6})$$

$$1 = A + R + T \quad (\text{I.7})$$

- **Le coefficient d'absorption α :**

La loi de Beer-Lambert permet de relier le flux transmis à la distance d au coefficient d'absorption illustré par l'équation (I-8).

$$T = (1 - R) e^{-\alpha d} \quad (\text{I.8})$$

Avec T et R : transmission et réflexion du film TCO

Le coefficient d'absorption α du film, il est lié au coefficient d'extinction k par la relation (I.9)

$$k = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} \quad (\text{I.9})$$

Les mesures de la transmission, de la réflexion et de l'épaisseur des oxydes transparents conducteurs permettent de déduire l'indice de réfraction n, le coefficient d'extinction k et le gap E_g .

$$(\alpha \cdot \lambda)^{1/2} = B(\lambda - E_g). \quad (\text{I.10})$$

La figure (I.2) représente le spectre typique de la transmittance d'un film de TCO :

Il montre trois régions distinctes :

Absorption Transmission Réflexion.

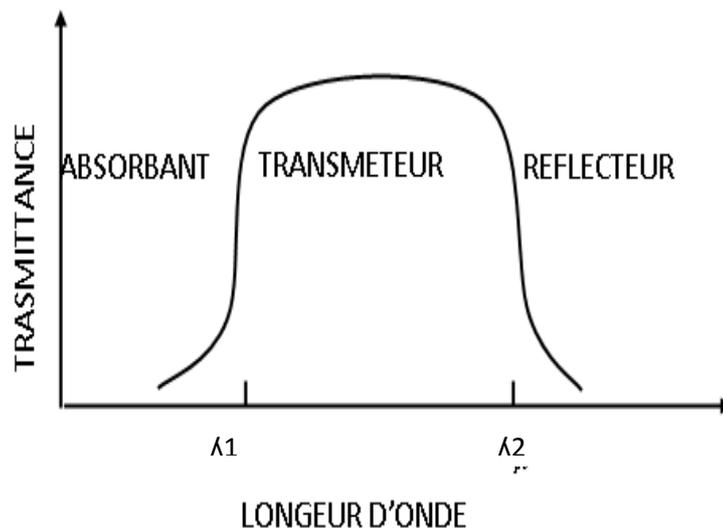


Figure I.2 : La fenêtre optique des oxydes transparents conducteurs (TCO)

I.4. Principe d'utilisation des TCOs comme couches antireflet :

Le fonctionnement des couches antireflets, repose sur l'adaptation de l'indice de réfraction de la couche de façon à produire des interférences destructives à une certaine longueur d'onde en tenant compte de l'épaisseur de la couche. Le matériau utilisé comme couche antireflet doit être non absorbant dans la gamme du visible.

On considère une couche fine antireflet d'épaisseur d et d'indice de réfraction n_2 . Cette dernière est située entre l'air d'indice de réfraction n_1 et un substrat d'indice $n_3 > n_2$ figure (I-2).

L'onde lumineuse d'amplitude maximale du champ électromagnétique E_0 frappe la surface de la couche antireflet.

Soient r_{ij} et t_{ij} les coefficients de réflexion et de transmission du milieu i vers le milieu j .

Alors le principe des couches antireflets, c'est d'annuler les réflexions, la condition d'interférences destructives c'est-à-dire, $r_{ij} = -r_{ji}$ doit être assurée.

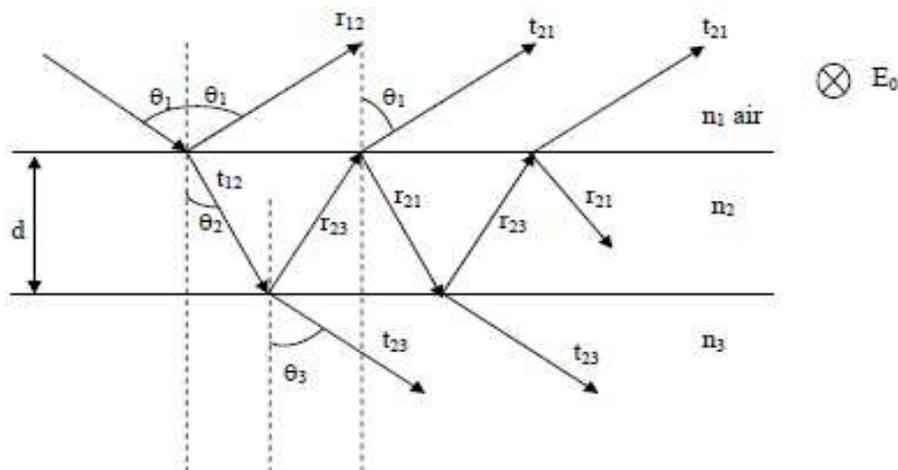


Figure I.3 : Rayonnements incidents, réfléchis et transmis entre trois milieux d'indice de réfraction différents.

I.5 Le dioxyde d'étain SnO_2 :

Le dioxyde d'étain est un oxyde transparent conducteur (TCO) de type n. Il a été le premier TCO à être commercialisé [25]. SnO_2 est un matériau chimiquement inerte et dur mécaniquement. Il résiste aux hautes températures et stable vis à vis de l'atmosphère [26].

I.5.1 Structure cristalline :

La structure du dioxyde d'étain est de type rutile figure (I.3). La maille élémentaire est généralement (tétraogonal) quadratique ($a = b = 0,475 \text{ nm}$ et $c = 0,318 \text{ nm}$) et contient six atomes: deux atomes d'étain et quatre atomes d'oxygène. Chaque atome d'étain est le centre d'un octaèdre presque régulier formé par six atomes d'oxygène, tandis que chaque atome d'oxygène est entouré par trois atomes d'étain situés aux sommets d'un triangle isocèle. [27].

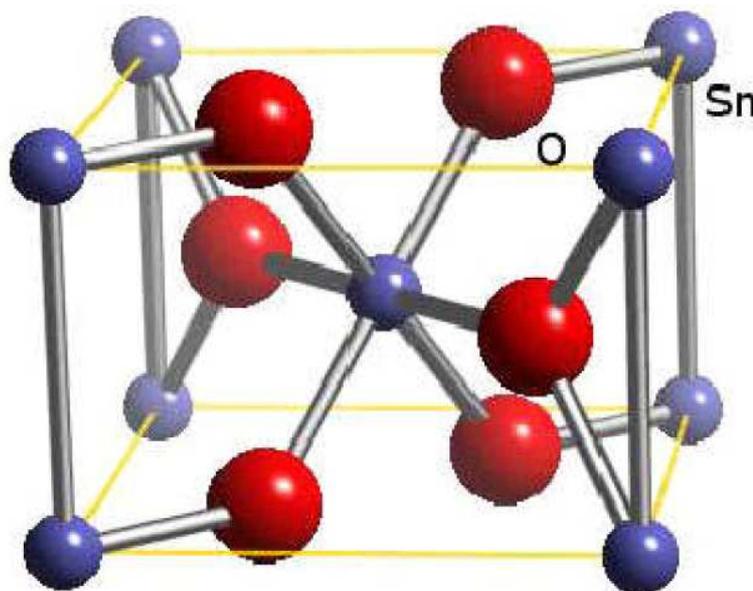


Figure I.4: Maille élémentaire du SnO_2 (structure rutile).

I.5.2 Propriétés électriques :

Le gap de dioxyde d'étain en couches minces varie entre 3.6 eV et 4.2eV, ses variations sont liées aux techniques utilisées pour son élaboration. Le gap de dioxyde d'étain est de type direct. Les extrema de la bande de valence et de la bande de conduction sont sur le même axe des vecteurs \vec{k} (figure I-5) (\vec{k} est le vecteur d'onde dans la zone de Brillouin). Les transitions des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction se font verticalement.

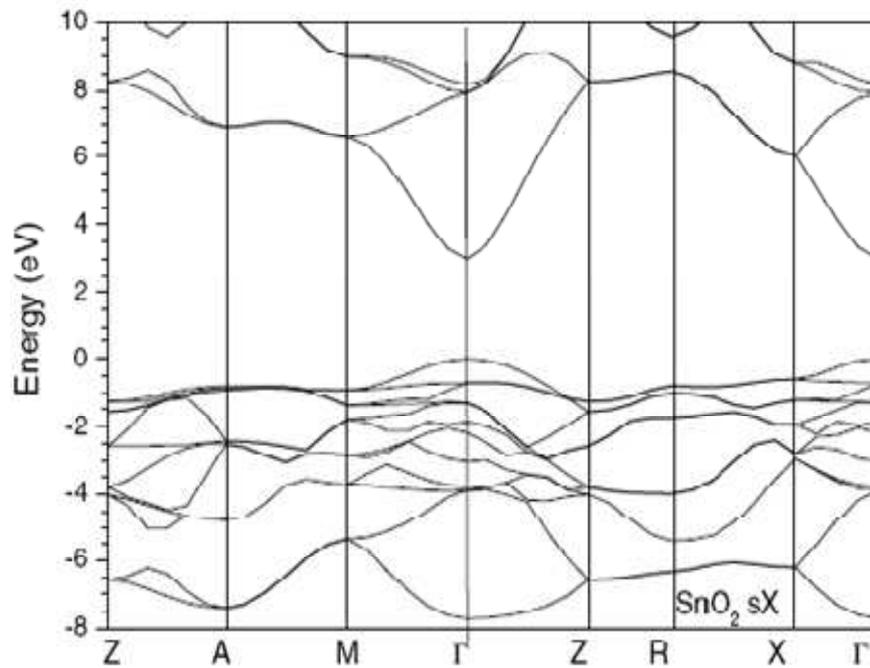


Figure I.5 : Présentation de la bande interdite de dioxyde d'étain.

Le dioxyde d'étain présente une concentration en électrons libres de l'ordre de 10^{19} cm^{-3} à 10^{20} cm^{-3} . Celui-ci peut être dopé pour améliorer ses propriétés électriques. Le SnO_2 est dopé principalement avec l'antimoine (Sb), le fluor (F), l'arsenic (As) et le niobium (Nb). Le fluor augmente la conductivité de dioxyde d'étain et n'affecte pas sa transmission dans la gamme du visible [28]. Ceci grâce aux grandeurs proches des tailles des atomes d'oxygène ($r = 0.132$ nm) et du fluor (0.133 nm) ainsi que des énergies de liaisons Sn-F (466.5 k.J.mol⁻¹) et Sn-O (527.6 k.J.mol⁻¹).

I.5.3 Propriétés optiques :

Le dioxyde d'étain est caractérisé par une valeur de bande interdite qui se situe entre 3.5 eV et 4.2 eV. Il présente une forte absorption dans le domaine d'ultraviolet et une forte réflexion dans le domaine d'infrarouge. Cependant, dans toute la gamme spectrale du visible, les couches minces de dioxyde d'étain présentent une forte transmission (85%) [29] et une transparence dans la gamme des longueurs d'onde d'environ 400 μm à 1500 μm . Les films de SnO₂ ne deviennent très réfléchissants qu' à partir d'une longueur d'onde < 8 μm de la gamme infrarouge en énergie solaire.

Le dioxyde d'étain garde une bonne transmission dans la gamme du visible et une partie de l'infrarouge. La figure (I.7) représente les spectres de transmission, de réflexion et d'absorption d'un film de SnO₂ dopé au fluor.

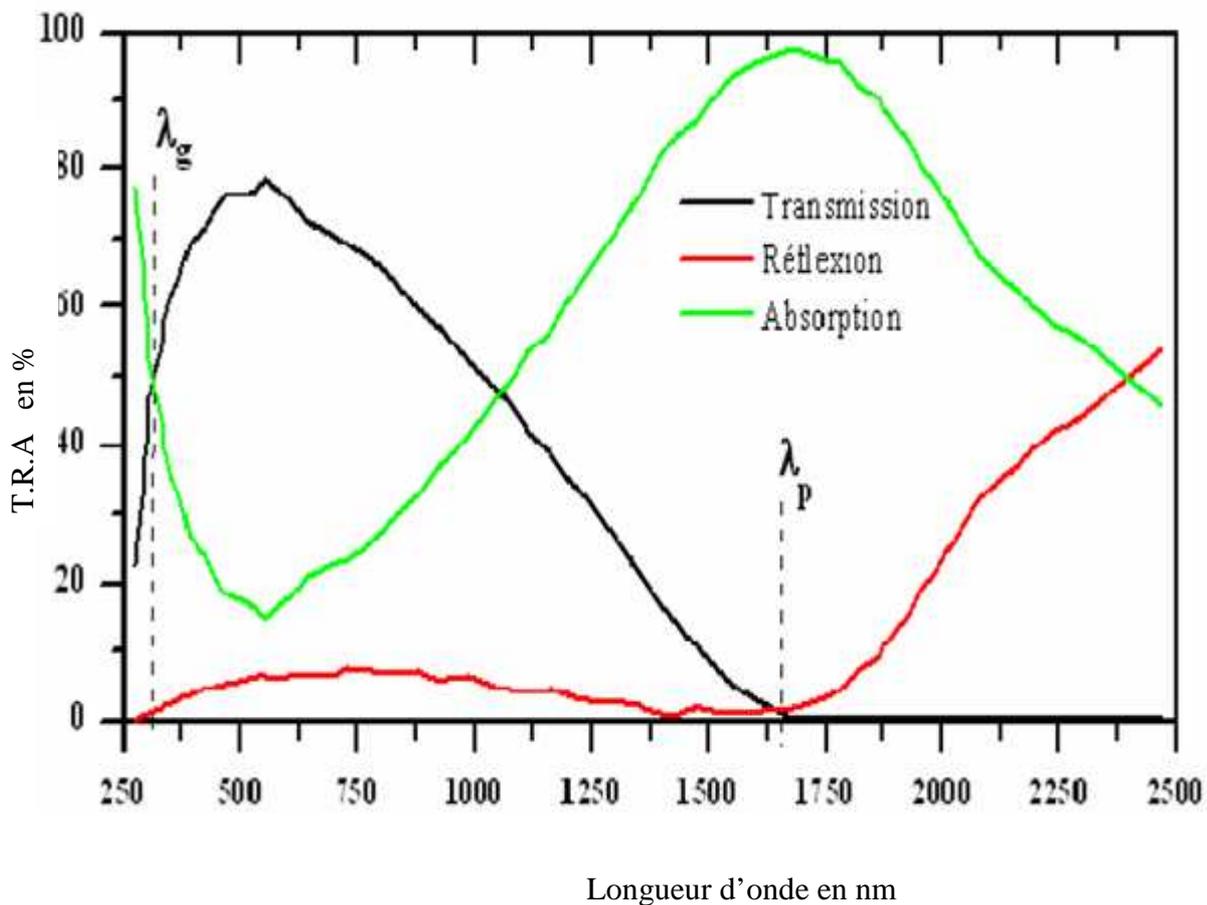


Figure I.6 : spectres de transmission (T), réflexion(R) et absorption(A) d'un échantillon de SnO₂ : F de 1.14 μm d'épaisseur [30].

I.5.4 Applications du SnO₂ :

Le dioxyde d'étain possède des propriétés électrique et optique particulières (forte transmission optique dans le domaine du visible, conductivité électrique élevée, caractère semi-conducteur de type n...) qui lui permettent un grand nombre d'applications et dont nous pouvons citer :

- Les propriétés électriques des couches minces de dioxyde d'étain sont influencées par l'environnement chimique gazeux en contact avec la couche. De ce fait, ces films peuvent être utilisés comme des capteurs chimiques d'un grand nombre de gaz (CO, CO₂, NO_x, éthanol...) avec des sensibilités différentes.
- Dans le domaine des cellules solaires, le dioxyde d'étain peut être utilisé pour les trois propriétés suivantes :
 - couches conductrices.
 - couche barrière de protection chimique.
 - couche antireflet.

I.6 L'oxyde de zinc ZnO :

L'oxyde de zinc est un composé inorganique de formule ZnO .Généralement il apparaît comme une poudre blanche. L'oxyde de zinc est communément appelé blanc de zinc ou zincite .Il apparaît dans la nature sous forme de minerai rouge contenant beaucoup d'impuretés notamment le manganèse. Il est connu depuis l'antiquité et est utilisé sous forme de poudre par les alchimistes Il est employé en médecine comme anti-inflammatoire. La première utilisation fut rapportée par Guyton de Morveau en 1782. Celui-ci insista sur la non toxicité de l'oxyde de zinc et en préconisa sa substitution au blanc de plomb. [31] L'amélioration de technique de production du métal en grande quantité et la commercialisation effective fut entamée au 19 siècle .C'est en 1834 que la maison Wurson and Newton de Londres commercialisa le blanc de zinc sous le nom de blanc de chine.

L'oxyde de zinc s'obtient par voie sèche à partir de deux procédés industriels. Un procédé qui passe directement du minerai à l'oxyde et un autre indirect qui fait intervenir le zinc métallique. Les deux procédés fournissent des oxydes de zinc de pureté inégale dont les propriétés physiques et chimiques sont différentes.

Aujourd'hui, la plus grande partie de la production mondiale de la poudre d'oxyde de zinc est utilisée dans les applications électriques pour l'industrie de caoutchouc, les produits chimiques, les peintures, dans l'agriculture et la céramique.

I.6.1 Propriétés structurales du ZnO :

L'oxyde de zinc est un composé d'origine naturelle comme la zincite. Il appartient à la classe cristalline 6 mm (groupe d'espace P63mc) .Il cristallise selon la structure hexagonale de type wurtzite [32] dans laquelle les ions d'oxygène O^{2-} sont disposés suivant un réseau de type hexagonal compact, et où les ions de Zinc Zn^{+2} occupent la moitié des positions interstitielles tétraédriques ayant le même arrangement que les ions d'oxygène.

La structure wurtzite figure (I.8) est constituée d'un empilement de type AB.AB.AB.....La maille élémentaire comprend deux cotés $a = b$ séparés par un angle de 120° . L'axe c est perpendiculaire au plan de a et b. Les coordonnées du premier atome de la base sont (0, 0 ,0), et celles du deuxième atome sont (2/3,1/3, 1/2). Peu après la découverte de la diffraction de RX en 1914, Bragg a pu déterminer la structure cristalline type wurtzite de ZnO. Elle fut publiée en 1920.

La maille hexagonale dont les paramètres ($a = 0.325\text{nm}$, $c = 0.52066\text{nm}$) de ZnO contient deux molécules est montrée dans la figure (I.7). Les atomes de zinc sont entourés d'atomes d'oxygène suivant une configuration tétraédrique. Le long de l'axe c , la distance Zn-O est un peu plus faible que pour les trois autres atomes d'oxygène voisins.

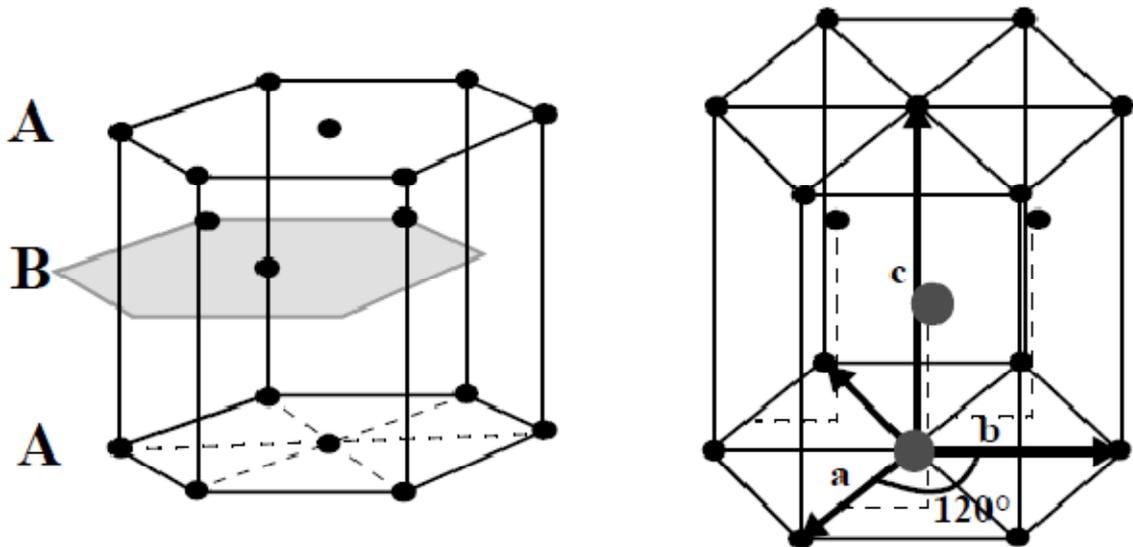


Figure I.7. Schéma de la structure hexagonale compacte.

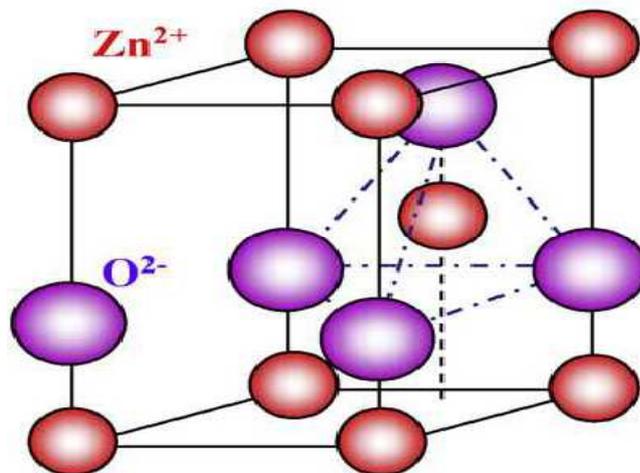


Figure I.8 : Structure cristalline type wurtzite de l'oxyde de zinc

I.6.2 Propriétés électriques du ZnO :

L'oxyde de zinc présente un gap direct figure (I-9) ; ceci est dû au fait que le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent sur le même point de l'espace des \vec{k} (\vec{k} étant le vecteur d'onde dans la zone de Brillouin).

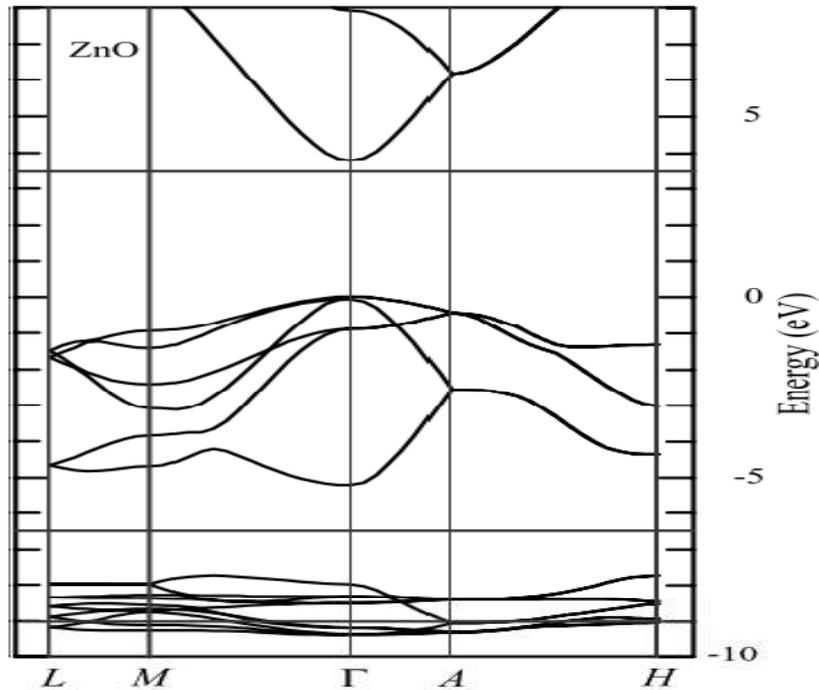


Figure I.9 : Présentation du gap de l'oxyde de zinc.

La conduction électrique de l'oxyde de zinc est due à la présence des atomes de zinc dans des sites interstitiels ainsi qu'aux lacunes d'oxygène. Par ailleurs, le ZnO stœchiométrique est un isolant. Le dopage permet d'améliorer la conductivité électrique de ce matériau. L'oxyde de zinc est un TCO qui peut avoir un dopage type p ou type n [33]. Les éléments chimiques qui permettent un dopage type n du ZnO sont l'aluminium [34], le gallium [35] et l'indium [36]. Ces dernières années, des travaux de recherches se sont orientés vers l'étude et la synthèse de l'oxyde de zinc dopé p [37,38]. Parmi les dopants qui permettent d'obtenir ce type de dopage, il y a l'azote, et le co-dopage azote aluminium. Look et al ont réalisé des films de ZnO de type p, à l'aide d'un dopage à l'azote, présentant une mobilité μ_p des trous de l'ordre de $2 \text{ cm}^2/\text{V.s}$. [34].

I.6.3 Propriétés optiques du ZnO :

Les propriétés optiques des couches minces dépendent fortement de la méthode d'élaboration, la qualité des couches, le traitement thermique appliqué, le type et la concentration du dopant.

Le ZnO fait partie de la famille des oxydes semi-conducteurs transparents et présente une forte absorption et diffusion des rayonnements ultra violets. L'oxyde de zinc est un matériau transparent. Sous forme de couche mince, l'indice de réfraction et le coefficient d'absorption varient en fonction des conditions d'élaboration. L'indice de réfraction du ZnO en couche mince varie entre 1,9 et 2,2 [39]. Sous l'action d'un faisceau lumineux de haute énergie ($E > 3,4$ eV) ou d'un bombardement d'électrons, l'oxyde de zinc émet des photons. Ce phénomène correspond à la luminescence. En fonction des conditions d'élaboration et des traitements ultérieurs, différentes bandes de luminescence ont été observées. Elles vont du proche UV ($\lambda=360$ nm), au visible (rayonnement de couleur verte de longueur d'onde proche de $\lambda=550$ nm). La luminescence visible est dû aux défauts liés aux émissions des niveaux profonds (niveaux virtuels entre la bande de conduction et la bande de valence), tels que les interstitiels de zinc, les lacunes d'oxygène et des impuretés introduites par dopage.

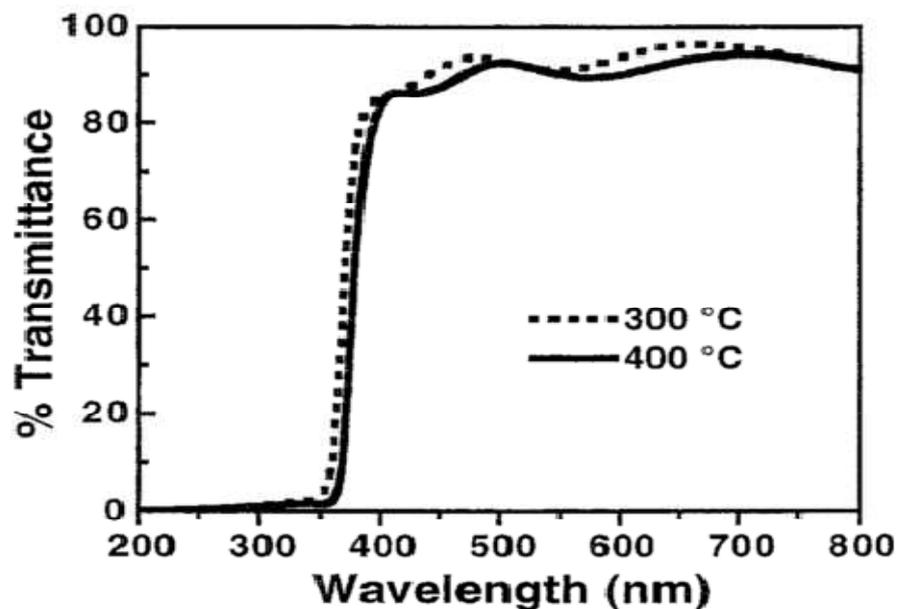


Figure. I.10 : Transmission d'un film d'oxyde de zinc recuit pour différentes températures [40].

I.6.4 Applications du ZnO :

Grâce à ses propriétés semi-conductrices, électriques et optiques, l'oxyde de zinc en couche minces, occupe désormais une place des choix dans le domaine de l'électronique et de l'optoélectronique. Dans ce qui suit nous citons quelques une de ces principales applications :

- En raison de ces propriété piézo-électriques (c'est-à-dire que sous l'effet d'une tension mécanique le cristal se polarise (effet direct) et que à l'inverse, l'application d'un champ électrique conduit à une déformation du cristal (effet inverse), le ZnO en couches minces peut être utilisée comme détecteur de pression.
- Les propriétés optiques de ZnO en couches minces sont exploitées dans les capteurs intégrés de guides d'ondes optiques. Il peut être également utilisé pour la fabrication de photodétecteur ultraviolet et la fabrication de diodes laser émettant dans le bleu ou l'UV. De plus, grâce à l'énergie de son premier exciton de 60 meV, valeur bien supérieure à l'agitation thermique à 25°C qui est de 20 meV, il est possible d'envisager la fabrication d'un laser solide émettant dans l'UV et fonctionne à température ambiante.
- Dans le domaine des cellules solaires photovoltaïques, les films minces de ZnO sont utilisés comme contact électrique transparent dans les photopiles et les cellules en couches minces à silicium amorphe et microcristallin. En plus, ces films peuvent être utilisés comme fenêtre optique et couche antireflet dans les cellules à structure MIS à base de silicium monocristallin et multicristallin.

Chapitre II
Méthodes d'élaborations
et Techniques de
caractérisation des TCOs

II. Méthodes d'élaborations et Techniques de caractérisation des couches minces :

L'utilisation des TCOs, en particulier l'oxyde de Zinc et le dioxyde d'étain, sous forme de couches minces est devenue fréquente dans le domaine technologique : que ce soit en électronique, en optique, en chimie ou en mécanique. Le passage de l'état massif à l'état de couches minces change considérablement ces propriétés physiques. Ces dernières dépendent de la méthode d'élaboration, la qualité des couches minces, le traitement thermique appliqué ainsi que le type et la concentration du dopant.

Devant la diversité des techniques d'élaboration de couches minces, dans ce chapitre nous avons regroupé les principales méthodes de dépôt de ces oxydes. Il existe deux grands types de méthodes, les méthodes dites physiques et les méthodes dites chimiques. Dans les deux cas, la matière à déposer est transférée vers le substrat à l'état gazeux, si la vapeur est simplement transférée depuis une source (évaporation, arrachement de la matière, espèces craquée) vers le substrat par un phénomène assisté (plasma, bombardement ionique ou électronique) le procédé est dit dépôt physique en phase vapeur, (**PVD : Physical Vapor Deposition**). Si le dépôt est obtenu par recombinaison chimique directement sur le substrat, des différentes espèces gazeuses introduites ou générées dans l'enceinte, le procédé est dit dépôt chimique en phase vapeur (**CVD : Chemical Vapor Deposition**).

II.1 Méthodes chimique:

II.1.1 Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) :

Le dépôt chimique en phase vapeur est une méthode dans laquelle les constituants d'une phase gazeuse réagissent chimiquement pour former un film solide sur un substrat. Les composés volatils des matériaux à déposer sont éventuellement dilués dans un gaz porteur et introduit dans une enceinte ou sont placés les substrats. Le film est obtenu par réactions chimiques entre la phase gazeuse et le substrat chauffé.

Dans cette technique, plusieurs paramètres entrent en jeu (température, pression, présence d'un plasma, nature des produits volatils, etc.). La température nécessaire pour provoquer les réactions chimiques dépend du type de réactants utilisés et du type de réactions désirées. Cette température est souvent très élevée, de l'ordre de 800 °C-1000 °C. Cependant, elle peut être considérablement réduite en abaissant la pression de travail, on parle alors de LPCVD (Low-Pressure Chemical Vapor Deposition), qui permet des dépôts à basse pression, l'augmentation de la pression fait appel à la technique HPCVD (High Pressure Chemical Vapor Deposition) et à la pression atmosphérique on trouve la technique APCVD.

Dans le cas de couches isolantes, pour améliorer l'efficacité de la réaction chimique dans le four, on peut activer les molécules mises en jeu par une source radiofréquence dont la fréquence est industriellement fixée à 13,56 MHz, valeur autorisée par l'Administration des Télécommunications. On intitule cette technique PECVD (Plasma enhanced CVD). La présence d'un plasma fait appel à la technique PJCVD (plasma jet CVD) correspondant à un jet de plasma.

En plus, la nature des produits volatilisés a donné lieu au procédé MOCVD qui utilise des précurseurs organométalliques permettant d'abaisser considérablement les températures de dépôts.

La technique CVD comprend donc une grande variété de procédé de dépôt, elle présente quelques avantages tel que : vitesses de dépôt élevées, forme du support peut être complexe et des dépôts possibles sur des réfractaires. Or elle présente beaucoup d'inconvénients : température élevée du substrat, revêtement de basse densité, dépôts impurs, équipement cher et dangerosité des gaz.

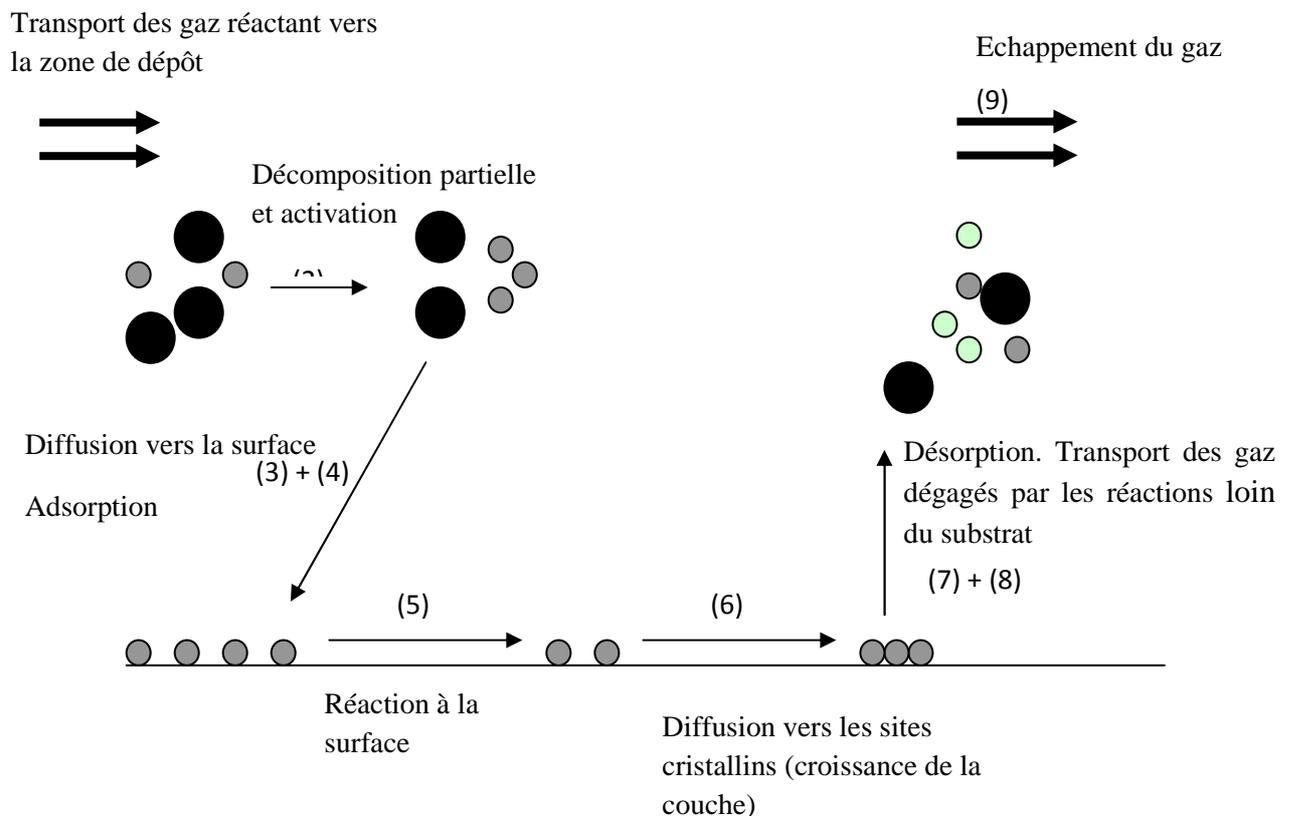


Figure II.1: représentation schématique des processus CVD.

II.1.2. Le spray pyrolyse :

Le spray pyrolyse est une technique de dépôt très utilisée pour l'élaboration des couches minces pour des applications dans les cellules photovoltaïques, comme les TCOs, elle présente un avantage important qui est le faible coût et la simplicité de sa mise en œuvre. Cette technique consiste à pulvériser une solution ionique, qui contient les éléments du matériau à déposer, sur un substrat porté à une température appropriée. La solution arrive sur le substrat sous forme de petite gouttelettes puis se décompose pour former une couche, la figure (II .2) donne une représentation schématique de cette technique :

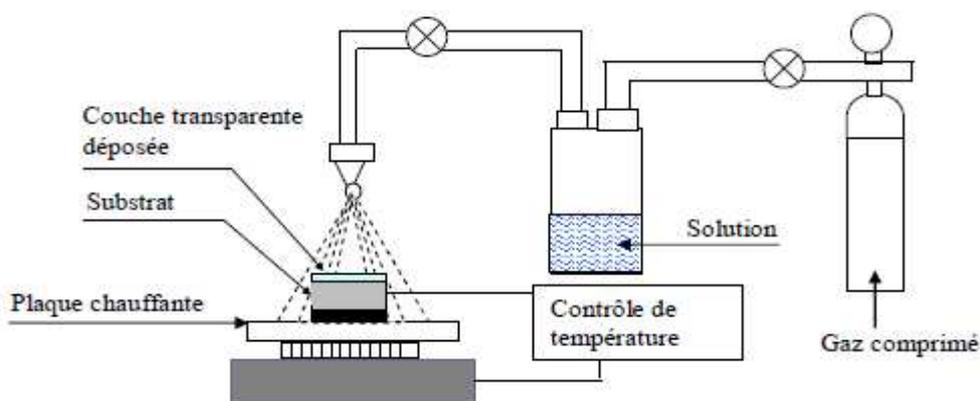


Figure II .2 : Représentation schématique de la technique spray pyrolyse.

II.1.3. La technique sol-gel :

Le procédé sol-gel est connu depuis longtemps. Il offre de nombreux atouts pour produire des matériaux de plus grande homogénéité et pureté, à des températures inférieures à celles des méthodes conventionnelles. Ce procédé utilise une solution contenant des précurseurs réactifs tels que les alcoxydes ou les sels métalliques.

C'est à partir de la solution et par le biais de réactions chimiques qu'on obtient à la fin un gel, le terme sol-gel correspond à l'abréviation « solution-gélification ».

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour le dépôt de couches minces sur un substrat donné: le "spin-coating", le "drain-coating", et "le dip-coating", chacune a ces caractéristiques propres, le choix de la méthode de dépôt dépend des caractéristiques du substrat tel que sa géométrie ou sa taille. Les deux méthodes présentées ci-dessous sont les plus souvent utilisées :

➤ Trempage-tirage ou dip-coating :

Cette méthode consiste à immerger le substrat dans la solution et à le retirer dans des conditions très contrôlées et stables pour obtenir un film d'épaisseur régulière. Lors de la

remontée, le liquide va s'écouler sur le substrat. A la fin de l'écoulement, le substrat est recouvert d'un film uniforme et très poreux [41].

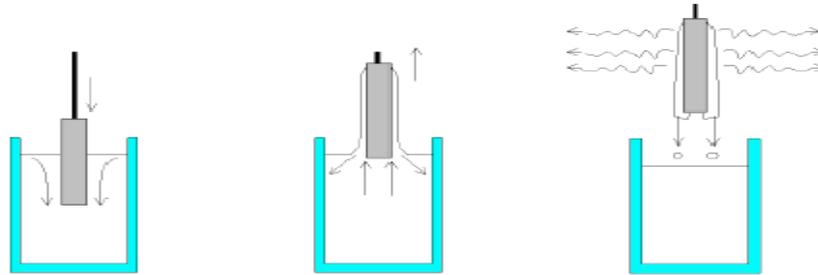


Figure II.3 : Dépôt de couches minces par trempage-tirage.

➤ Centrifugation ou spin-coating :

Cette méthode consiste à déposer par centrifugation une solution déposée en excès sur un substrat. Elle donne d'excellents résultats sur les substrats plans dont les dimensions sont de l'ordre du cm^2 .

II.2. Dépôt physique en phase vapeur (PVD) :

II.2.1. Le dépôt par ablation laser réactive :

La technique de dépôt en couches minces par ablation laser réactive consiste à vaporiser une cible d'un matériau donné, en présence d'un gaz réactif avec un faisceau laser à impulsion de forte intensité. Le plasma laser qui se forme au dessus de la cible est susceptible de réagir directement avec le milieu ambiant pour former des molécules et des espèces que l'on peut collecter sur un substrat adéquat. Le dépôt obtenu aura une composition différente de celle de la cible d'origine, qui dépendra principalement de la nature du gaz réactif susceptible de réagir avec les espèces ablatées.

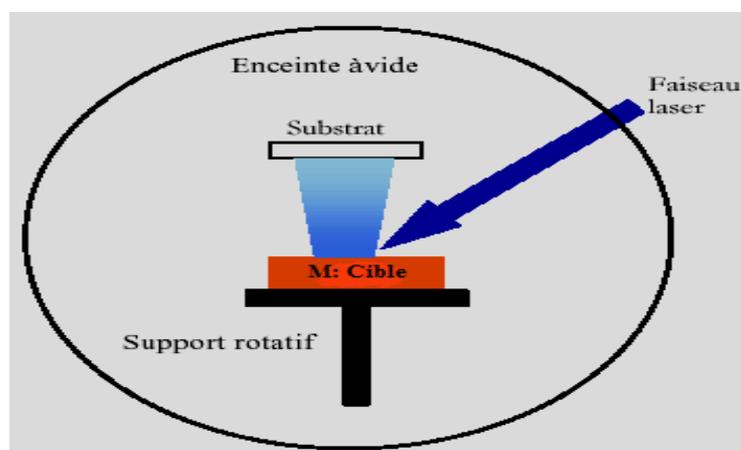


Figure II.4 : Schéma conventionnel d'un système d'ablation laser.

II.3. Techniques de caractérisations structurale, optique et morphologique:

Dans le but de connaître les propriétés physiques et électriques des couches minces des TCOs déposées, plusieurs techniques de caractérisations sont utilisées.

II.3. 1. Méthode des quatre pointes :

Pour connaître la résistivité des couches minces que nous avons déposés, nous avons utilisé un bâti de mesure quatre pointes. Les pointes sont alignées et équidistantes figure (II.7). La source de courant fournit un courant électrique constant I qui circule entre les deux bornes externes. La tension V est mesurée entre les bornes de deux pointes intérieures.

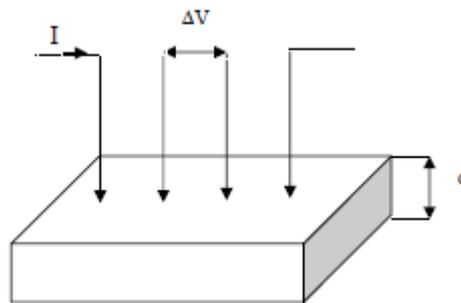


Figure II.5: Schéma de principe de la méthode des quatre pointes.

La valeur de la résistivité est liée à la mesure du rapport $\frac{\Delta V}{I}$.

La résistivité se mesure par cette relation :

$$\rho = 4,53.d. \frac{\Delta V}{I} \quad 2.1$$

La résistance surfacique ou carré s s'exprime par le rapport entre la résistivité ρ et l'épaisseur d de la couche d'oxyde:

$$R_s = \rho / d = 4,53. \frac{\Delta V}{I} \quad 2.2$$

II.3.2. Les mesures mécaniques avec le profilomètre :

Cet appareil sert à mesurer les profils des épaisseurs des films minces. Pour avoir cette information, il faut déplacer une pointe appelée stylet sur la surface de l'échantillon dont on mesure l'épaisseur. Ce profil est tracé par les déplacements verticaux de la pointe qui sont enregistrés en fonction de sa position sur l'échantillon. Avec cette technique, il est essentiel de révéler une marche sur l'échantillon afin d'avoir la bonne épaisseur.

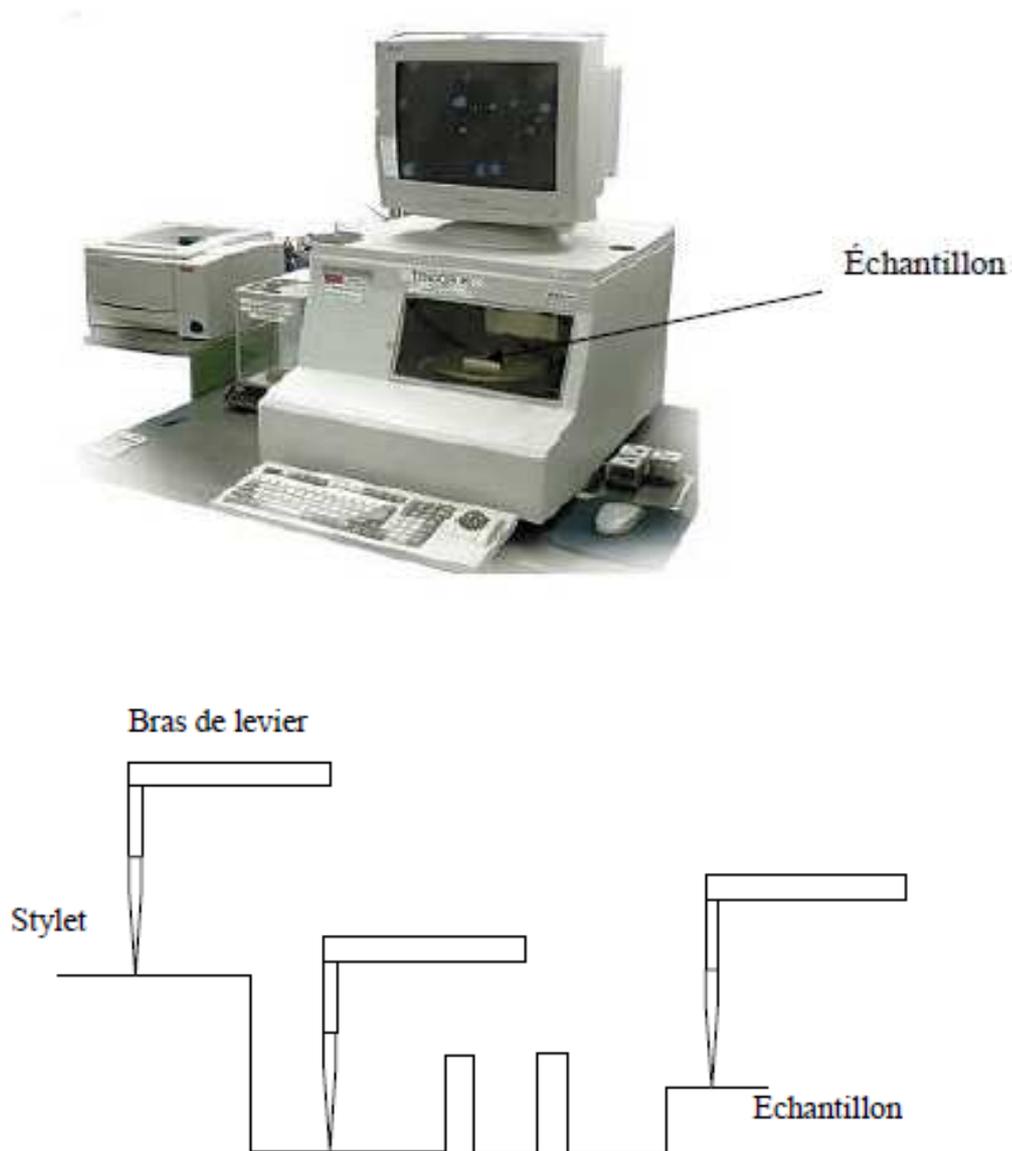


Figure II.6 : Principe de mesure de l'épaisseur par le profilomètre TENCOR P11.

II.3.3 La diffraction des rayons X (DRX) :

La diffraction des rayons X est une méthode de caractérisation structurale incontournable dans le domaine des matériaux. Cette méthode de caractérisation ne s'applique qu'aux matériaux cristallisés (mono ou polycristallins). Elle permet notamment de déterminer la structure des matériaux étudiés, d'en différencier les phases, mais aussi de déterminer les contraintes résiduelles, la forme et la taille des grains.

Son principe repose sur la diffraction des rayons X monochromatiques par les plans atomiques des cristaux du matériau étudié. La diffraction a lieu lorsque la relation de Bragg est vérifiée :

$$2.d_{hkl} .\sin \theta = n. \lambda \quad 2.3$$

d (hkl): distance interréticulaire, c'est-à-dire distance séparant les plans d'indice (hkl).

θ : angle d'incidence des rayons X sur la surface du matériau étudié (angle de Bragg).

n : ordre de la réflexion.

λ : longueur d'onde du faisceau de rayons X.

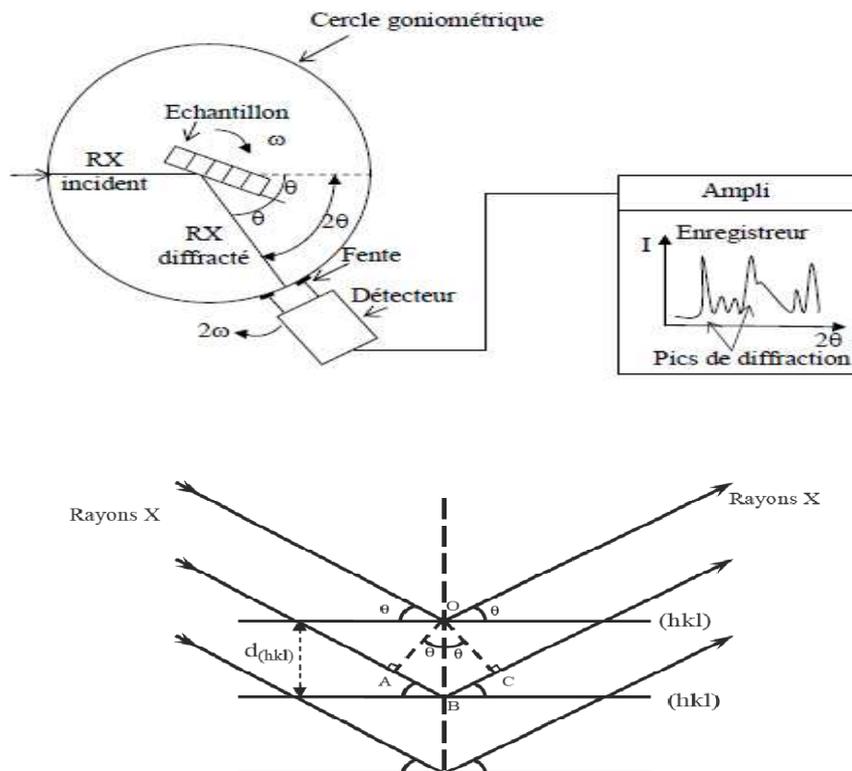


Figure II.7 : Schéma représentant le principe de la diffraction des rayons X par les plans réticulaires d'indices h, k et l.

II.3.4 La microscopie électronique à balayage :

La microscopie électronique à balayage est une technique d'analyse qui permet de visualiser la morphologie de la surface des couches minces. Son principe est basé sur le balayage de la surface de l'échantillon par un faisceau très fin d'électrons suivi de la détection des électrons secondaires émis par l'échantillon. Cet effet est transformé en un signal électrique qui permet l'obtention de l'image de la surface. La synchronisation entre le balayage de la surface par le faisceau des électrons incidents et la détection des électrons secondaires permet de transmettre l'image de l'échantillon point par point et ligne par ligne. Cette image devient complète après une période de balayage entière.

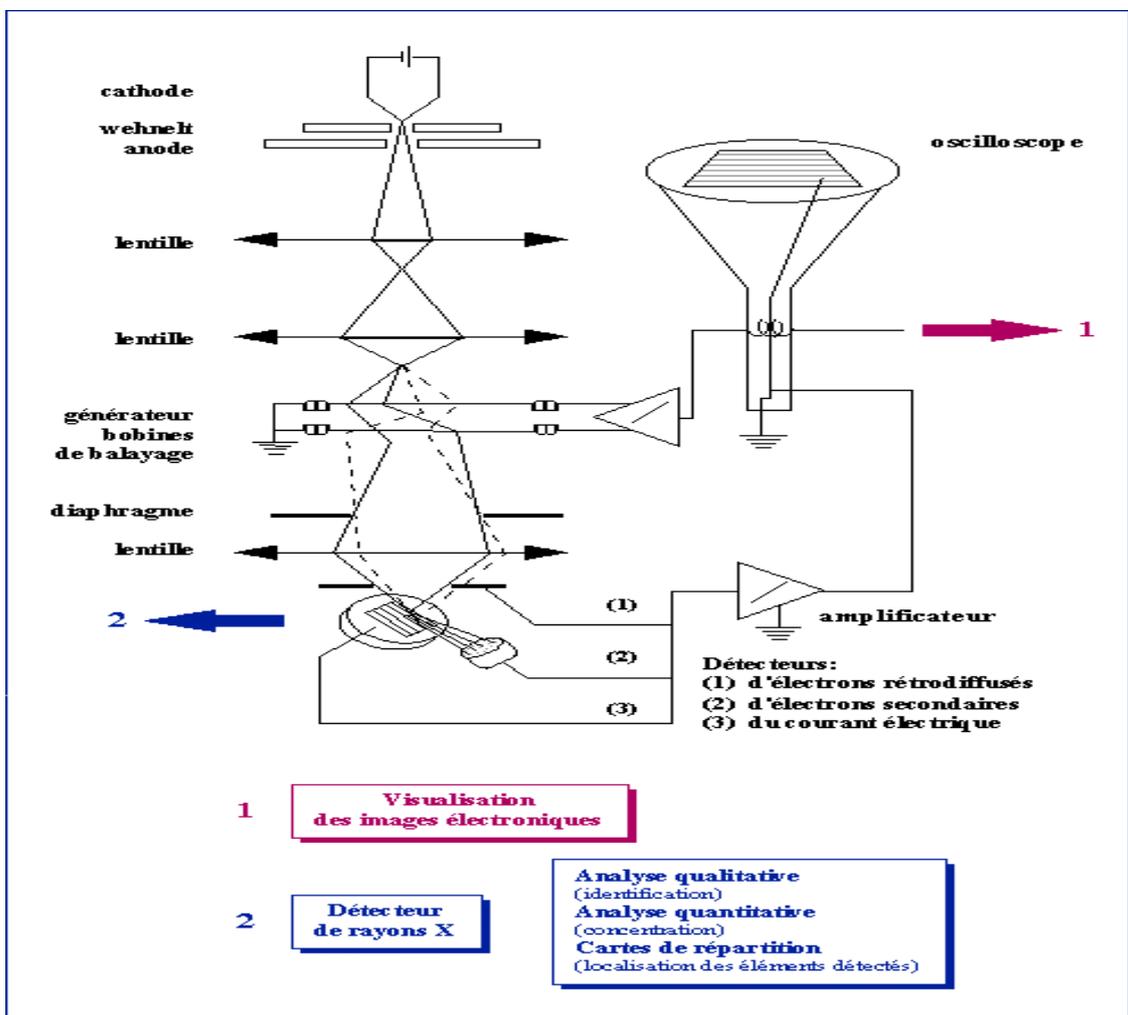


Figure II.8 : Dispositif Microscope Electronique à Balayage.

II.3.5 Spectroscopie UV-Visible :

Les domaines de la spectroscopie sont généralement distingués selon l'intervalle de longueurs d'ondes dans lequel les mesures sont réalisées. On peut distinguer les domaines suivants : ultraviolet-visible, infrarouge et micro-onde. La figure (II.11) montre le principe de fonctionnement d'un spectrophotomètre enregistreur à doubles faisceaux, par lequel on aura les tracer des courbes représentant la variation de la transmittance, en fonction de la longueur d'onde dans le domaine de l'UV-Visible et proche de l'infrarouge (200-800nm). En exploitant ces courbes, il est possible d'estimer l'épaisseur du film et de déterminer ses caractéristiques optiques; le seuil d'absorption optique, le coefficient d'absorption, la largeur de la bande interdite, l'énergie d'Urbach et l'indice de réfraction [42].

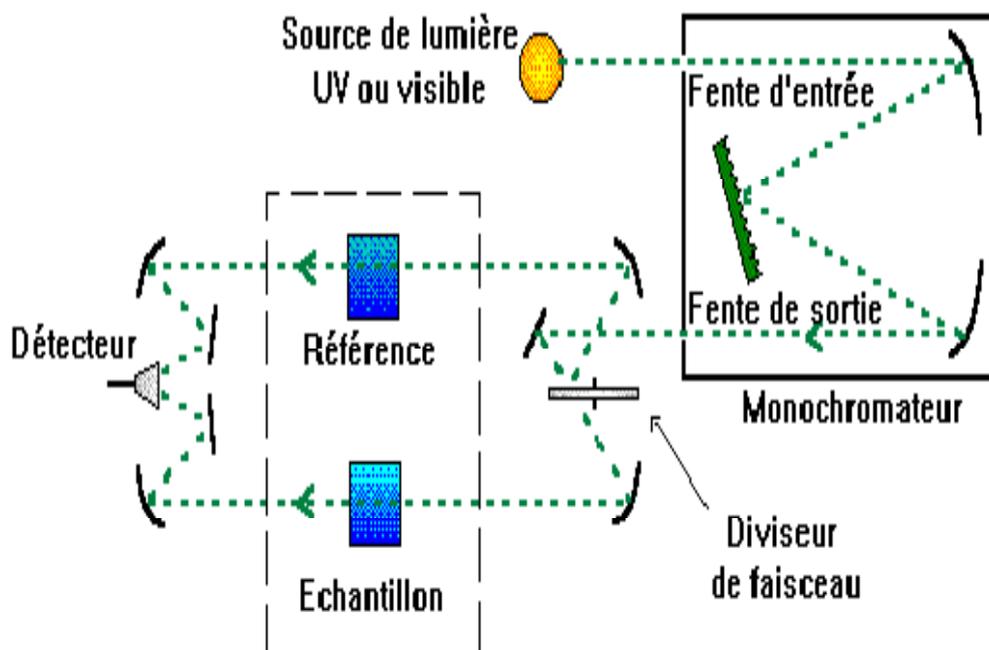


Figure II.9 : Représentation schématique du la Spectroscopie UV-Visible.

Chapitre III
La cellule solaire
photovoltaïque

Dans ce chapitre nous présentons des notions sur le rayonnement solaire, structure et principe de fonctionnement d'une cellule solaire conventionnelle ainsi que ces paramètres selon la modélisation à exponentielle simple, (c'est-à-dire. à une simple diode).

III. Définition d'une cellule solaire photovoltaïque :

Une cellule solaire photovoltaïque est un dispositif électronique, appelé diode p-n, soit homojonction ou hétérojonction, l'utilisation de celle-ci nous permet de convertir l'énergie véhiculée par le rayonnement solaire incident en un courant électrique continu. Cette conversion est basée sur l'effet photovoltaïque engendré par l'absorption de photons. Une partie des photons absorbés génère des paires électron-trou dans lesquelles un champ électrique créé dans la zone de charge d'espace d'une jonction p-n.

III.1. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire :

La surface du Soleil peut être vue comme un corps noir d'une température d'environ 5800K, conduisant à un pic d'émission autour de la longueur d'onde de 500 nm. Le rayonnement moyen hors atmosphère terrestre est d'environ 1.36 kW/m² [42]. La traversée de celle-ci engendre une diminution de l'intensité solaire à cause notamment des conditions climatiques, de la latitude, de la saison et de l'absorption par les molécules présentes dans les différentes couches de l'atmosphère (ozone, dioxyde de carbone, vapeur d'eau). Ces différentes couches de l'atmosphère absorbent les photons d'énergie proche de leur énergie de liaison, conduisant à des « trous » dans le spectre solaire visible au sol figure (III-1). Les poussières et les aérosols présents dans l'atmosphère induisent une baisse globale de la puissance incidente sur toute la gamme spectrale. Afin de définir une référence indépendante de la localisation sur Terre, la notion d'Air Masse (AM) est introduite : c'est la distance parcourue par la lumière à travers l'atmosphère normalisé par la plus petite distance possible (i.e. quand le soleil est au Zénith). Le nombre d'air Masse donne la réduction de puissance due à la traversé de l'atmosphère.

Le spectre standard est AM1.5, correspondant à un rayonnement d'environ 1 kW/ m² (G pour global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses). La partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la Terre concerne le domaine visible (390 -780 nm) et le domaine proche infrarouge.

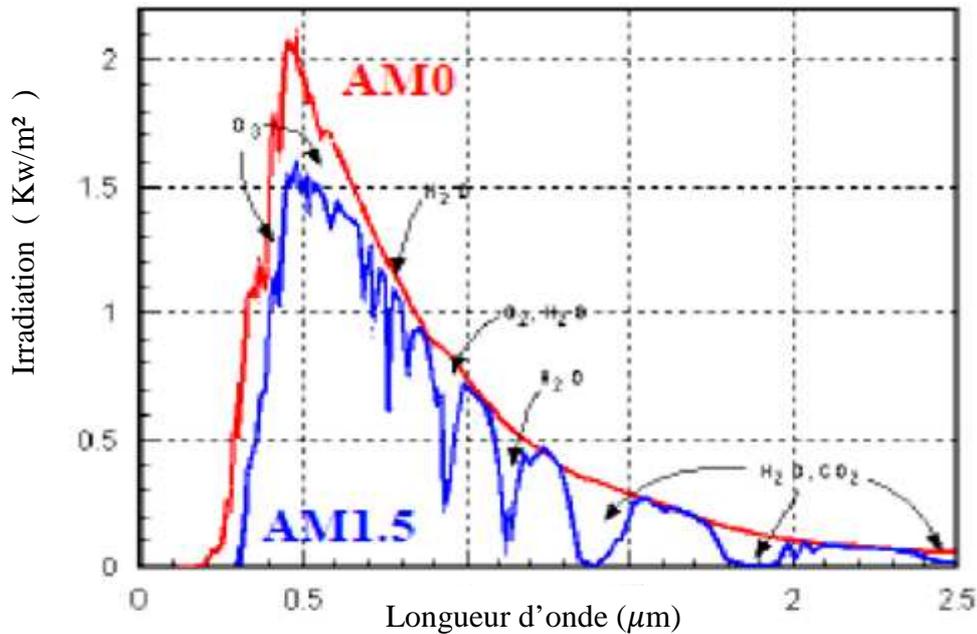


Figure III.1 : Représentation de l'irradiation du rayonnement solaire

III.2. Principe de fonctionnement de la cellule solaire :

Considérons une jonction p-n recevant un rayonnement monochromatique de fréquence ν , telle que $h\nu \geq E_g$. Si les photons incidents interagissent avec les électrons de la bande de valence en leur communiquant leur énergie, ceux-ci passent dans la bande de conduction laissant des trous dans la bande de valence. Le rayonnement incident excite des paires électron-trou. Les électrons créés dans la région P et les trous engendrés dans la région N diffusent, seuls atteignent la zone de charge d'espace et les porteurs libérés de part et d'autres de la jonction à une distance inférieure à leur longueur de diffusion L ; pris et accélérés par le champ électrique \vec{E} ils traversent la zone de transition. La région N reçoit des électrons et se charge négativement ; la région P accepte des trous et devient positive.

Le rayonnement incident a pour effet de polariser la jonction en direct.

La conversion photovoltaïque dans une cellule solaire repose sur :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif,
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur,
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

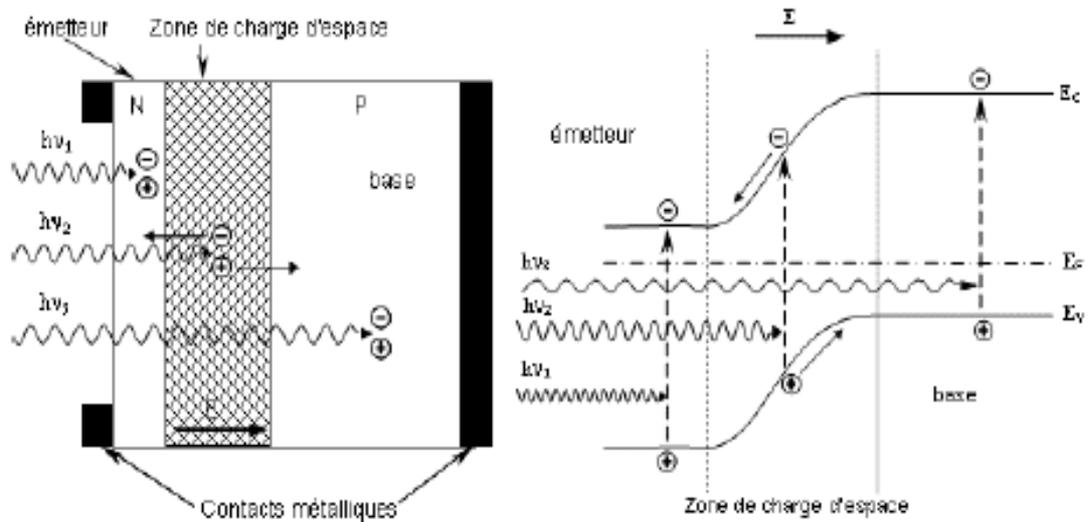


Figure III.2 : Structure et diagramme de bandes d'une cellule solaire sous éclairage.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photocourant de diffusion.
- dans la zone de charge d'espace, les paires électrons / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photocourant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse. [43]

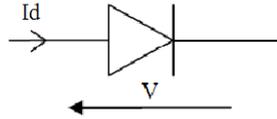
III.3. La modélisation d'une cellule solaire :

On rencontre dans la recherche bibliographique plusieurs modèles du générateurs photovoltaïques qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant du générateur photovoltaïque.

a- Cas idéal :

Une cellule photovoltaïque dans l'obscurité est une diode. Dans le cas idéal, le courant circulant dans une cellule donné par la relation :

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V \cdot q}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (\text{III.1})$$



Lorsque la cellule est éclairée, le courant circulant dans celle-ci devient :

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V \cdot q}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (\text{III.2})$$

Avec :

I_{ph} : photo-courant

I_d : courant traversant la diode

q : charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C)

k : la constante de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23}$ m² kg / s² K)

I_s : courant de saturation

V : tension à la borne de la diode

T : température absolue en (K).

Le circuit électrique équivalent correspondant à une cellule solaire est :

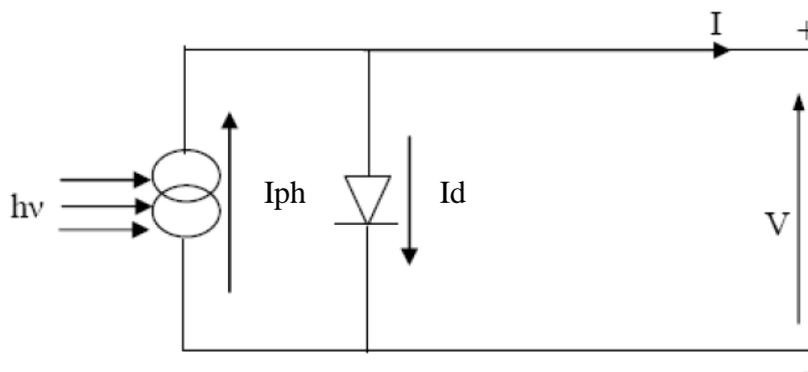


Figure III.3 : Schéma électrique d'une cellule solaire idéal.

I, V : Courant et tension fournis par la cellule.

I_d : Courant de diode donné par la relation (3.1)

b- Cas réel :

La performance d'une cellule solaire est limitée par l'influence de deux phénomènes physiques assimilables à deux résistances (R_s et R_p).

R_s : Résistance série, due essentiellement aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semiconducteurs, ainsi qu'aux mauvais contacts (Semi conducteur, électrodes).

R_p : Résistance parallèle, dite, Shunt, provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'à la non idéalité de la jonction.

R_s et R_p modifient le courant de court-circuit de la cellule en photo- courant I_{ph} .

On aura donc le montage électrique équivalent suivant :

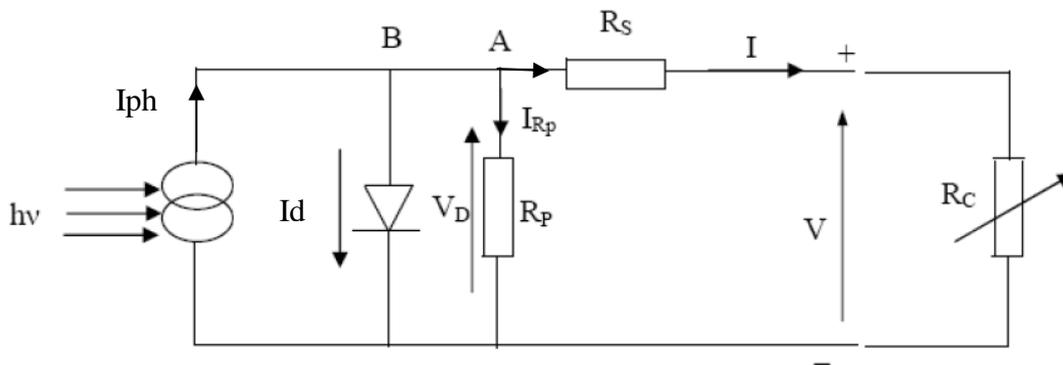


Figure III.4 : circuit équivalent d'une cellule solaire réelle

Appliquons la loi de Kirchoff aux noeuds A, B :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad (III.3)$$

Le courant I débité par la cellule est la somme algébrique de trois courant :

I_{ph} : photo courant indépendant de V (ou de R_s), il est proportionnel au flux incident (taux de génération- recombinaison) et aux longueurs de diffusion des porteurs.

I_{Rp} : Courant traversant R_p , si R_p est très grande, il devient très faible est indépendant de la tension:

$$I_{Rp} = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (III.4)$$

$$V_D = R_p \cdot I_{Rp} = V + R_s I \quad (III.5)$$

On remplace dans l'équation caractéristique on trouvera:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{K.T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (III.6)$$

III.4. Différents paramètres de la cellule photovoltaïque :

La base de la cellule solaire est une diode. Lorsqu'elle est illuminée il apparaît dans cette diode un photo-courant qui dépend de la quantité de la lumière incidente [44].

On présente sur la figure (III.5) les deux caractéristiques courant-tension de la cellule solaire dans l'obscurité en pointillés, et sous illumination en trait plein.

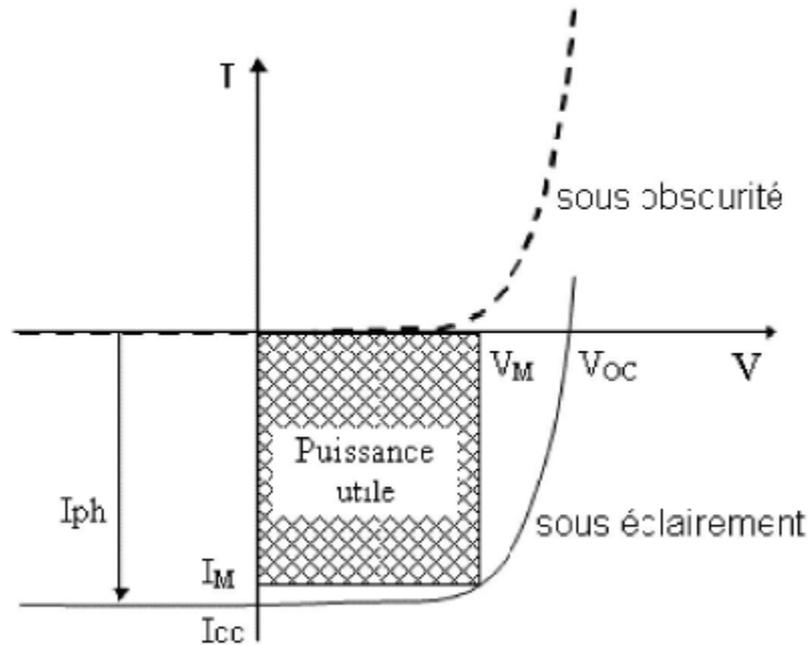


Figure III.5 : Caractéristiques I-V sous obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque.

A partir de la caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propre à la cellule qu'on va décrire dans les paragraphes suivants :

III.4.1. Courant de court-circuit I_{cc} :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule éclairé, I_{cc} (obtenue pour $V=0$). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charge et de la température.

$$I_{cc} = q \int_0^{\infty} F(\lambda) [1 - R(\lambda)] r_s \cdot d\lambda \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$F(\lambda)$: Flux des photons incidents

$R(\lambda)$: Coefficient de réflexion

r_s : Réponse spectrale ou sensibilité spectrale

III.4.2. Tension à circuit ouvert V_{co} :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie, et décroît avec la température. Elle varie peu avec l'intensité lumineuse.

$I=0$ on a $I_{ph} - I_d = 0$

Donc : $I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V \cdot q}{kT}\right) - 1 \right] = 0$

D'où:

$$V_{CO} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (III.8)$$

III.4.3. Facteur de forme ff :

Le facteur de remplissage ou facteur de forme, correspond à la puissance maximale délivrée par la cellule, divisée par le produit ($V_{co} \cdot I_{cc}$), correspondant à la puissance maximale idéale. Il détermine la qualité électrique de la cellule et il dépend directement de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Le nom "facteur de forme" dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (III.9)$$

III.4.4. Rendement de conversion :

Le rendement η de la cellule solaire exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{inc} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{inc}} \quad (III.10)$$

III.5 Pertes fondamentales et technologiques dans les cellules photovoltaïques :

Le rendement de conversion de la cellule solaire est diminué par différents pertes. Par conséquent toute l'énergie lumineuse incidente n'est pas convertie en électricité. Les pertes fondamentales sont résumées comme suit :

III.5.1 Pertes physiques :

a) Pertes par les photons de grande longueur d'onde :

Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ($\lambda > \lambda_g$) ne peuvent générer de paire électron/trou, donc sont perdus. Les mécanismes d'absorption assistée par phonons permettent néanmoins de repousser la limite inférieure de l'énergie correspondant au gap du matériau 1.052 eV au lieu de 1.124 eV dans le cas d'une absorption assistée par un phonon dans le silicium [13(50)]. Sous un éclairage de AM 1.5, ces pertes sont évaluées à 23.5 % dans le cas du silicium [45].

b) Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons :

Un photon absorbe génère seulement une paire électron/trou. L'excès d'énergie, supérieur à la largeur de la bande interdite, est principalement dissipé sous forme de chaleur. Sous un éclairage d'AM 1.5, ces pertes sont évaluées à 33 % de la puissance totale dans le cas du silicium [46].

c) Facteur de tension :

C'est le rapport de la tension maximale développée par la cellule (V_{co}) par la tension de gap E_g/q . La tension aux bornes d'une cellule n'est qu'une fraction de la tension de gap à cause notamment de la chute de potentiel au niveau des contacts et de la jonction. Les meilleures valeurs de V_{co} obtenues sont de l'ordre de 0.7 V, pour les cellules à haut rendement.

d) Facteur de forme FF :

La courbe $I(V)$ ne peut donc avoir une forme rectangulaire même dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme ne peut dépasser 0.84 [47].

Ce terme dépend également et fortement des paramètres technologiques modélisés par les résistances série et parallèle.

III.5.2 Pertes technologiques :

a) Réflectivité

Une partie de l'énergie incidente est réfléchiée par la surface de la cellule. Le coefficient de réflexion R peut être optimisé par la mise en œuvre des traitements de surface adéquats et de couche antireflet.

b) Taux d'ombrage

Les contacts métalliques (de surface $=e.l$) présents sur la face avant afin de collecter les porteurs entraînent des pertes de puissance puisqu'ils couvrent une partie de la surface S de la cellule. Le taux d'ombrage est un compromis entre les pertes dues à la couverture partielle de l'émetteur par les contacts.

c) Rendement d'absorption

A cause de l'épaisseur limitée de la cellule, une part non négligeable de photons, ayant néanmoins l'énergie requise, traverse l'épaisseur de la structure sans être absorbés.

Des techniques de piégeage par réflexion sur la face arrière peuvent augmenter de manière significative l'absorption, particulièrement dans le cas des cellules minces.

d) Rendement de collecte

C'est le rapport entre le nombre de porteurs effectivement collectés et le nombre total de porteurs photogénérés. En effet, certains porteurs se recombinent dans le volume ou à la surface de la cellule. Ce phénomène dépend directement de la durée de vie τ des porteurs minoritaires et de taux de longueur de diffusion.

Actuellement, les facteurs technologiques tels que la réflectivité et le rendement de collecte prennent alors une part importante dans l'objectif d'améliorer le rendement de la cellule solaire.

Chapitre IV

**Simulation de l'effet de
la couche antireflet sur
les paramètres d'une
cellule solaire**

IV. Simulation de l'effet de la couche antireflet sur les paramètres d'une cellule solaire :

Pour vérifier l'effet des couches anti reflet sur les paramètres des cellule solaire, à savoir, le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le rendement ($\eta\%$) et le facteur de forme (FF), on utilise le logiciel PC1D (Personnel Computer One Dimensionnel), pour simuler des cellules solaire à homo-jonction de 1 cm^2 , une avec SnO_2 et l'autre avec ZnO comme couches antireflet, en utilisant des paramètres théoriques, pour ensuite faire une comparaison des effets de SnO_2 ainsi que de ZnO sur les propriétés de la cellule

IV.1 Présentation du logiciel :

Le logiciel de simulation numérique PC1D (Personnel Computer One Dimensionnel) est très utilisé dans la simulation des cellules solaires à homo-jonction. Ce logiciel a été développé en Australie à l'université South Wales de Sydney. Il permet de simuler le comportement des structures photovoltaïques à base de semi-conducteurs en respectant une structure à une dimension.

Le PC1D contient des fichiers bibliothèques avec les paramètres des semi-conducteurs cristallins utilisés dans la technologie photovoltaïque comme le GaAs, a-Si, AlGaAs, Si, InP et Ge. Les fichiers du spectre solaires sont aussi disponibles dans ce logiciel, essentiellement les spectres (AM_0 , $\text{AM}_{1.5}$).

Dans la fenêtre du logiciel PC1D figure (IV-1), il faut introduire les données en relation avec : le dispositif, les régions de la cellule solaire et de l'excitation. La dernière partie de la fenêtre est consacrée aux résultats.

Les régions qui constituent la cellule photovoltaïque à simuler doivent être constituées de matériaux pris en charge par le logiciel.

Les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, donc c'est un gain de temps et d'argent.

File : D:\TCO\PC1D\SnO₂-Si(N⁺⁺)-Si(P).PRM
 Cellule solaire homo-jonction SnO₂-Si(N⁺⁺)-Si(P)

DEVICE

Device area : 1 cm²

No surface texturing

Front surface neutral

Rear surface neutral

Exterior front reflectance: 10%

No exterior rear reflectance

No internal rear reflectance

Emitter contact enabled

Base contact enabled

No internal shunt elements

***REGION 1**

Thickness: 0.3 um

Materiel modified from program defaults

Carrier mobilities from internal model

Dielectric constant:

Band gap: 3.8 eV

Intrinsic conc. at 300K: 1.000e-014 cm-3

Refractive index: 1.9

Absorption coeff. from SnO₂.abs

No free carrier absorption

N-type background doping: 1x10²⁰ cm-3

No front diffusion

No rear diffusion

Bulk recombination: tau n= tau p= 1x10⁻⁶ us

No front-surface recombination

No rear-surface recombination

***REGION 2**

Thickness: 350um

Materiel from Si.mat

Carrier mobilities from internal model

Dielectric constant: 11.9

Band gap: 1.124 eV

Intrinsic conc. at 300K: 1x10¹⁰ cm-3

Refractive index: 3.58

Absorption coeff. from Si.abs

Free carrier absorption enabled

P-type background doping: 1x10¹⁴ cm-3

1st front diffusion: N-type, 1.85x10²⁰ cm-3 peak

No 2nd front diffusion

No rear diffusion

Bulk recombination: tau n= tau p= 1000 us

Front-surface recombination: S model, S_n=S_p=100cm/s

Rear-surface recombination: S model, S_n=S_p=100 cm/s

EXITATION

Excitation from one-sun.exe

Excitation mode: Transient, 16 timesteps

Temperature: 25⁰C

Base circuit: Sweep from -0.8 to 0.8 V

Collector circuit: Zero

Primary light source enabled

Constant intensity: 0.1 W cm-2

Spectrum from am15g.spc

Secondary light source disabled

RESULTS

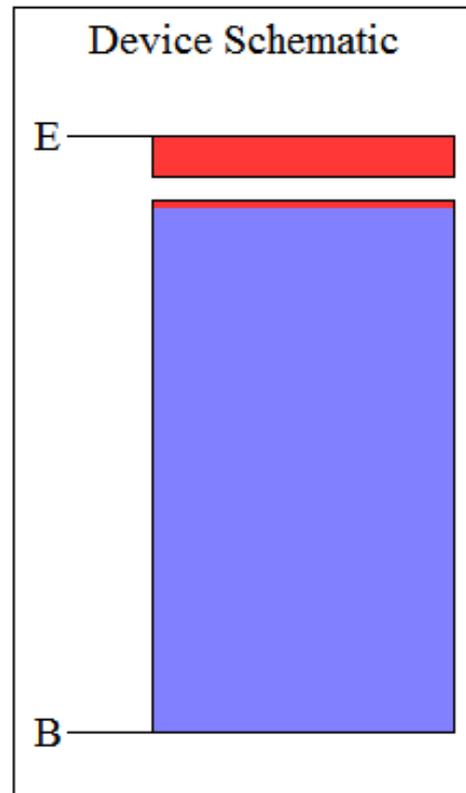


Figure IV.1 : Fenêtre du logiciel de simulation PC1D.

Sous le logiciel PC1D, on va simuler des structures de type, [Si(N⁺⁺)-Si(P)], [SnO₂-Si(N⁺⁺)-Si(P)] et [ZnO-Si(N⁺⁺)-Si(P)], dans le but de faire une comparaison sur la variation des paramètres de ces structures en utilisant les TCOs (SnO₂, ZnO) comme couche antireflet.

Pour cela, nous ferons varier l'ensemble des paramètres de la couche antireflet, à savoir la réflexion, l'épaisseur et le dopage de la couche antireflet (région1),

IV.2 Simulation de la structure à homojonction [Si(N⁺⁺)-Si(P)] :

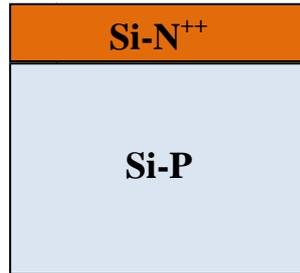


Figure IV.2 : Structure à homojonction [Si(N⁺⁺)-Si(P)] sous PC1D.

IV.2.1 La caractéristique I(V) de la structure [Si(N⁺⁺)-Si(P)] :

Avec la structure à jonction [Si(N⁺⁺)-Si(P)] choisit, on introduit les différents paramètres tels que : $N_D=1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ [49] un éclairement de AM_{1,5} (1000W/m²) et une réflexion surfacique de 32 %, après l'exécution, on aura la caractéristique I(V) suivante :

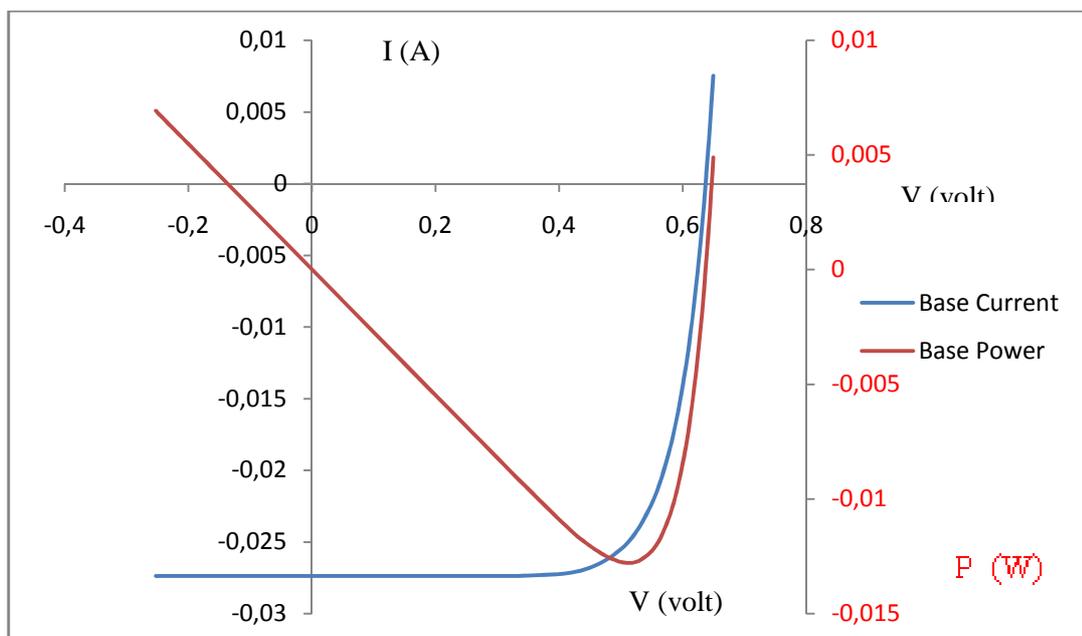


Figure IV.3 : La caractéristique I(V) et Pmax de la structure [Si(N⁺⁺)-Si(P)] sous PC1D.

La caractéristique $I(V)$ de la structure $[\text{Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$ avec un dopage de la partie N par $N_D=1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ atomes dopants [49], sous un éclairement de $\text{AM}_{1.5}$ ($1000\text{W}/\text{m}^2$) nous donne un courant de court-circuit de $I_{cc} = 0.0274 \text{ A}$, une tension de circuit ouvert $V_{co}=0.6372 \text{ V}$ et $P_{max} = 0.0128 \text{ W}$ ce qui induit un facteur de forme $\text{FF}= 0.7331$ et un rendement photovoltaïque $\eta= 12.8 \%$.

IV.3 Simulation de la structure à homojonction avec couche antireflet $[\text{SnO}_2\text{-Si}(\text{N}^{++})\text{- Si}(\text{P})]$:

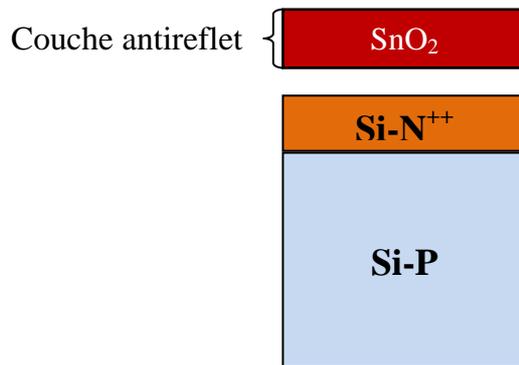


Figure IV.4 :La structure à homojonction avec couche antireflet $[\text{SnO}_2\text{-Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$ sous PC1D.

IV.3.1 Paramètres de la structure $[\text{SnO}_2\text{-Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$ simulées :

Sachant que le contact entre la couche antireflet de SnO_2 avec le substrat (silicium de type n) peut être un contact redresseur ou un contact ohmique.

Dans notre cas, on a besoin d'un contact ohmique, la raison laquelle on doit bien définir les paramètres des composants de la cellule solaire.

Pour obtenir un contact ohmique entre le silicium de type n et l'oxyde d'étain, on a choisit le dopage $N_D=1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ [49].

a. Région 1 (SnO_2):

La région 1 est celle de la couche antireflet (SnO_2), cette étape consiste à introduire les données relatives à la couche.

D'après la recherche bibliographique [49]., pour avoir des bons résultats, on choisie les paramètres suivants :

- Epaisseur : $0,3\mu\text{m}$;
- Indice de réfraction : 1,8 ;
- Gap : 3,8 eV ;
- Dopage type n : $9.10^{21} \text{ cm}^{-3}$;
- Constante diélectrique : 9 ;
- Mobilité des électrons : $15 \text{ cm}^2/\text{Vs}$;
- Recombinaison : $\tau_n = \tau_p = 1000\mu\text{s}$;

- Absorption de la couche dans le visible et proche infrarouge, les données sont représentées dans la figure (IV.5) :

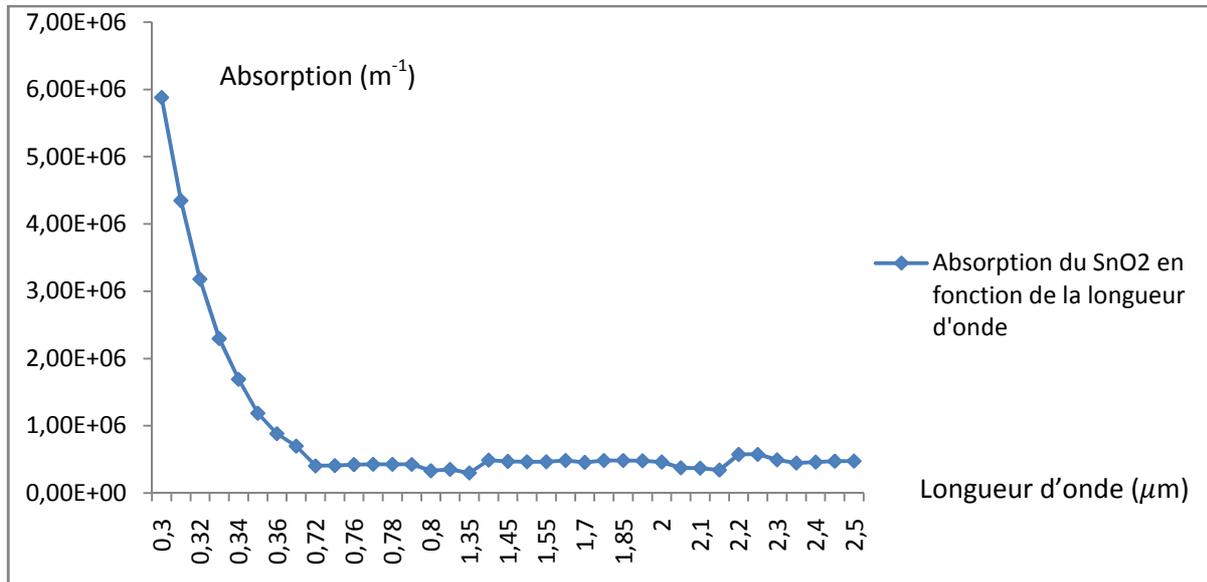


Figure IV.5: Absorption de SnO₂ en fonction de la longueur d'onde.[49]

b. Région 2 (Si) :

La région 2 est celle de la couche active, il s'agit d'une homojonction [N⁺⁺ - P] à base de silicium. Les données relatives à ce matériau sont insérées dans cette région.

IV.3.2 La caractéristique I(V) de la structure [SnO₂-Si(N⁺⁺)-Si(P)] :

Après l'insertion des différents paramètres sous PC1D, la caractéristique I(V) de la structure [SnO₂-Si(N⁺⁺)-Si(P)] de 1cm² simulée est donnée par la figure (IV.6) :

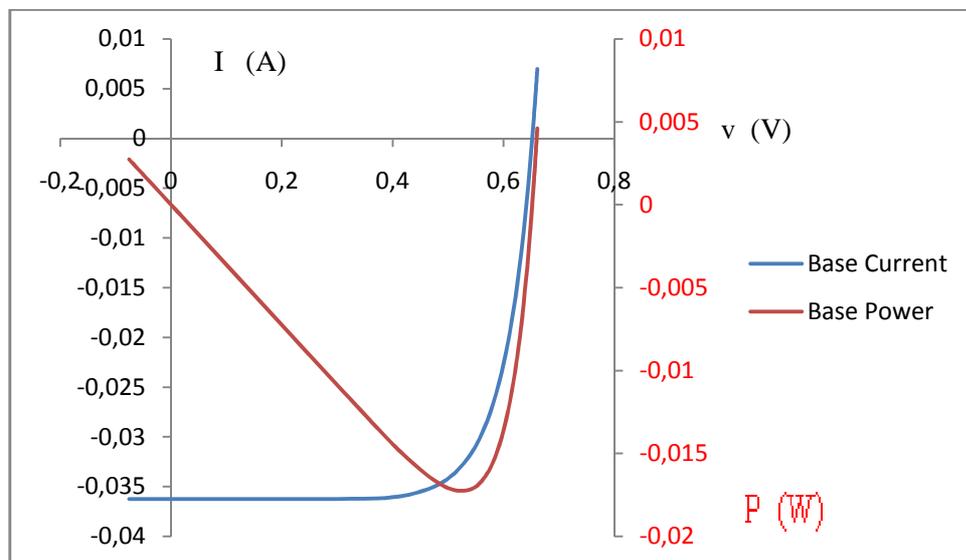


Figure IV.6 : La caractéristique I(V) et Pmax de [SnO₂-Si(N⁺⁺)-Si(P)] sous PC1D.

La caractéristique avec une réflexion de 10%, un dopage $N_D=9.10^{21} \text{ cm}^{-3}$, une épaisseur de la couche antireflet de $0.3 \mu\text{m}$ sous un éclairement de $AM_{1.5} (1000 \text{ W/m}^2)$ nous donne un courant de court-circuit de 0.0362 A, une tension de circuit ouvert $V_{co}=0.6516 \text{ V}$ et $P_{max} = 0.0172 \text{ W}$ ce qui induit un facteur de forme $FF = 0.7291$ et un rendement photovoltaïque $\eta = 17.2 \%$. Cette amélioration est due au rôle de la couche antireflet de SnO_2 qui réduit les réflexions.

IV.3.3 Les paramètres qui influent sur le rendement de la structure $[\text{SnO}_2\text{-Si(N}^{++})\text{-Si(P)}]$:

a. Influence de la réflexion du SnO_2 :

La réflexion du flux lumineux au niveau de la face avant de la cellule a une grande influence sur les propriétés de la structure. Afin de limiter l'influence de cette réflexion on doit faire appel à des couches antireflets. Le tableau IV.1 montre une comparaison de l'effet de la réflexion de SnO_2 sur les propriétés de la structure $[\text{SnO}_2\text{-Si(N}^{++})\text{-Si(P)}]$, on a choisie des valeurs théoriques ($R = 2\%$) dans le but de comprendre l'aspect physique :

Réflexion Paramètres	R=2 %	R=10%	R=20%	R=30 %
I _{cc} (A)	0.0395	0.0362	0.0322	0.0282
V _{co} (V)	0.6559	0.6516	0.6458	0.6391
P _{max} (W)	0.0189	0.0172	0.0152	0.0132
FF	0.7295	0.7291	0.7309	0.7324
$\eta\%$	18.9	17.2	15.2	13.2

Tableau IV.1 : Effet de la réflexion sur les propriétés de la structure $[\text{SnO}_2\text{-Si(N}^{++})\text{-Si(P)}]$.

Ces résultats montrent qu'en diminuant de plus en plus le facteur de réflexion on aura un bon rendement de la cellule.

b. Influence du dopage de SnO_2 :

Sous PC1D, on varie le dopage (valeurs théoriques) de la couche antireflet pour la même structure $[\text{SnO}_2\text{-Si(N}^{++})\text{-Si(P)}]$, pour comprendre l'aspect physique, on remarque qu'avec l'augmentation du dopage de la couche SnO_2 la puissance de sortie de la structure augmente aussi, cela est dû à l'augmentation de la conductivité de la couche antireflet. Le tableau (IV.3) montre l'effet de l'augmentation du dopage de la couche antireflet SnO_2 , ($N_D=9.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $9.10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $9.10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $9.10^{21} \text{ cm}^{-3}$) sur le rendement de la structure $[\text{SnO}_2\text{-Si(N}^+)\text{-Si(P)}]$.

dopage Paramètres	$9.10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$9.10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$9.10^{20} \text{ cm}^{-3}$	$9.10^{21} \text{ cm}^{-3}$
Icc (A)	0.0362	0.0362	0.0362	0.0362
Vco (V)	0.6517	0.6517	0.6517	0.6516
Pmax (W)	0.0162	0.0162	0.0167	0.0172
FF	0.6866	0.6866	0.7078	0.7291
$\eta\%$	16.2	16.2	16.7	17.2

Tableau IV.2: Influence du dopage de la couche SnO_2 sur les paramètres de la structure $[\text{SnO}_2\text{-Si(N}^{++})\text{-Si(P)}]$.

IV.4 Simulation de la structure à homojonction avec couche antireflet $[\text{ZnO-Si(N}^{++})\text{-Si(P)}]$:

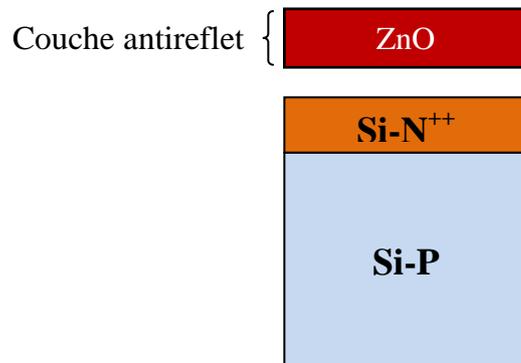


Figure IV.7 : Structure à homojonction avec couche antireflet $[\text{ZnO-Si(N}^{++})\text{-Si(P)}]$ sous PC1D.

IV.4.1 Paramètres de la structure $[\text{ZnO-Si(N}^{++})\text{-Si(P)}]$ simulées :

Dans ce type de cellules, on aura deux types de contacts, à savoir le contact ohmique entre la couche antireflet et la couche active N et le contact redresseur dans la jonction NP.

a. Région 1 (ZnO):

La région 1 est celle de la couche antireflet (ZnO), cette étape consiste à introduire les données relatives à la couche:

D'après la recherche bibliographique [49] , pour avoir des bons résultats, on choisie les paramètres suivants :

- Epaisseur : $0,3\mu\text{m}$;
- Indice de réfraction : 1,9 ;
- Gap : 3,3 eV ;
- Dopage type n : 9.10^{21} cm^{-3} ;
- Constante diélectrique : 8.75 ;
- Mobilité des électrons : $100\text{ cm}^2/\text{Vs}$;
- Mobilité des trous : $2500\text{ cm}^2/\text{Vs}$;
- Recombinaison : $\tau_n=10^{-3}\mu\text{s}$; $\tau_p=10^{-6}\mu\text{s}$;
- Absorption de la couche dans le visible et proche infrarouge, les données sont représentées à la figure (IV.8) :

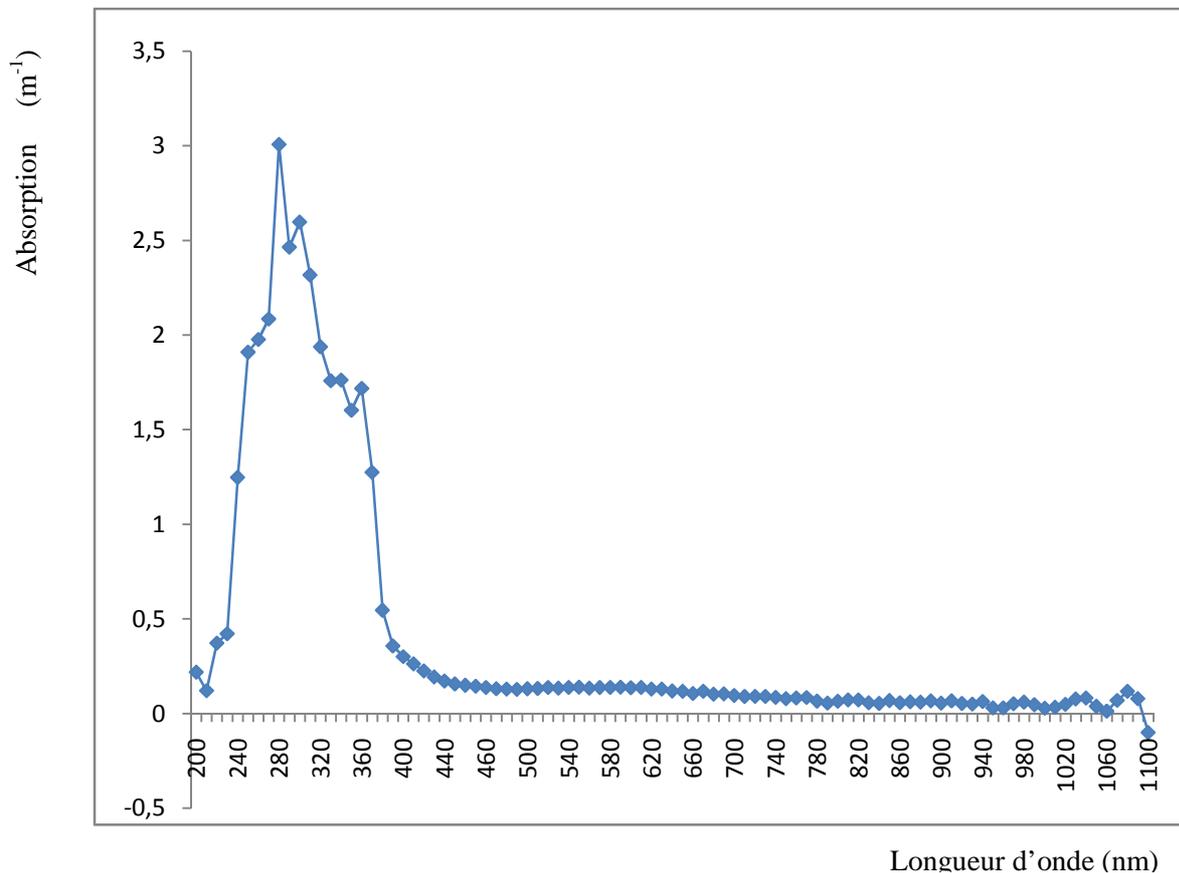


Figure IV.8 : Absorption de ZnO en fonction de la longueur d'onde [49].

a. Région 2 (Si) :

La région 2 est celle de la couche active, il s'agit d'une homojonction NP au silicium. Les données relatives à ce matériau sont insérées dans cette région.

IV.4.2 La caractéristique I(V) de la structure [ZnO-Si(N⁺⁺)-Si(P)] :

Après l'insertion des différents paramètres sous PC1D. La caractéristique I(V) de la structure [ZnO-Si(N⁺⁺)-Si(P)] de 1cm² simulée est donnée par la figure (IV.9) :

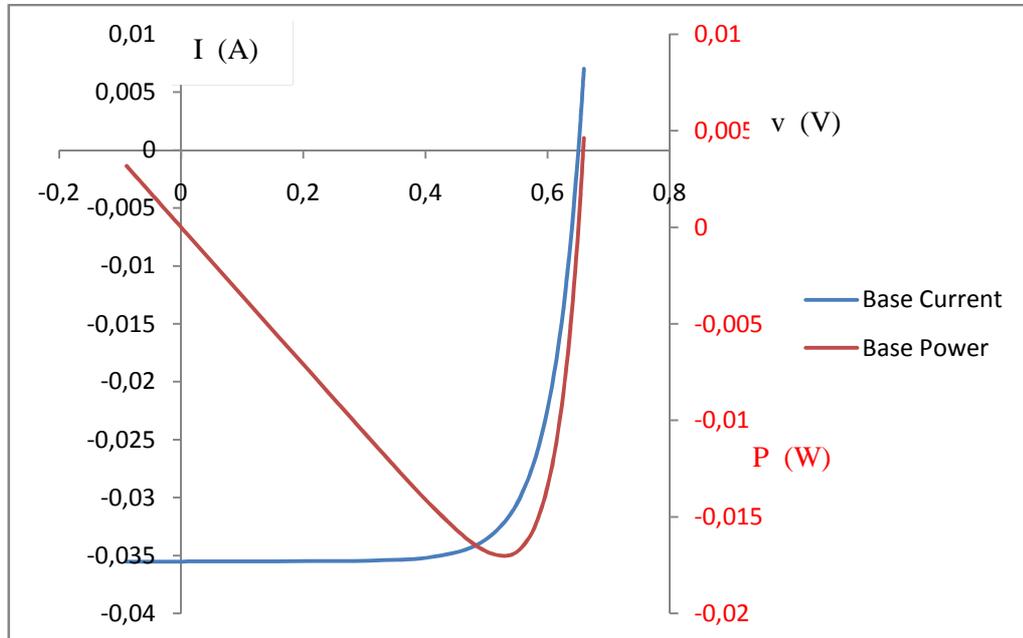


Figure IV.9 : La caractéristique I(V) de la structure [ZnO-Si(N⁺⁺)-Si(P)].

Les résultats de simulation de la caractéristique I(V) de la structure [ZnO-Si(N⁺⁺)-Si(P)], nous donne un courant de court-circuit de 0.0362 A, une tension de circuit ouvert de 0.6513 V et une puissance max = 0.0173 W de sortie ce qui induit à un rendement PV de 17.3 % et un facteur de forme FF=0.7337.

Cette amélioration de 17.2 % à 17.3 % due aux propriétés optique de ZnO.

IV.4.3 Les paramètres qui influe sur le rendement de la structure [ZnO- Si(N⁺⁺) -Si(P)]:

a. Influence de la réflexion du ZnO:

La réflexion du flux lumineux au niveau de la face avant de la cellule à une grande influence sur ces propriétés. Afin de limiter l'influence de cette réflexion on doit faire appel à des couches antireflets. Le tableau (IV.4) montre l'effet de la réflexion sur les propriétés de la structure [ZnO - Si(N⁺)-Si(P)] :

La valeur de la réflexion $R = 2\%$ est théorique dans le but de comprendre l'aspect physique.

Réflexion Paramètres	R=2 %	R=10%	R=20%	R=30%
I _{cc} (A)	0.0395	0.0362	0.0322	0.0282
V _{co} (V)	0.6555	0.6513	0.6454	0.6388
P _{max} Out (W)	0.0190	0.0173	0.0153	0.0132
FF	0.7338	0.7337	0.7362	0.7327
η%	19	17.3	15.3	13.2

Tableau IV.3 : Effet de la réflexion sur les propriétés de la structure [ZnO-Si(N⁺⁺)-Si(P)].

Le tableau IV.4 interprète les résultats de simulation de la structure [ZnO-Si(N⁺⁺)-Si(P)] avec des réflexions de la couche antireflet 2%, 10%, 20% et 30%, .On remarque qu'en augmentant la réflexion, le rendement diminue cela est expliqué par le flux réfléchi, ce qu'est traduit par des pertes pour la cellule.

b. Influence du dopage de ZnO:

Sous PC1D, pour comprendre l'aspect physique, on varie le dopage (valeurs théoriques) de la couche antireflet pour la même structure [ZnO-Si(N⁺)-Si(P)], on aura ces résultats :

dopage Paramètres	9.10 ¹⁴ cm ⁻³	3.10 ¹⁵ cm ⁻³	9.10 ²⁰ cm ⁻³	9.10 ²¹ cm ⁻³
I _{cc} (Amprs)	0.0362	0.0362	0.0362	0.0362
V _{co} (Volts)	0.6484	0.6485	0.6510	0.6513
P _{max} Out (Watts)	0.0172	0.0173	0.0173	0.0173
FF	0.7327	0.7350	0.7341	0.7337
η%	17.2	17.3	17.3	17.3

Tableau IV.4: Influence du dopage de la couche ZnO sur les paramètres de la structure [ZnO-Si(N⁺⁺)-Si(P)].

Le tableau (IV.6) montre l'augmentation de la tension du circuit ouvert de la structure [ZnO-Si(N⁺⁺)-Si(P)], en augmentant le dopage de ZnO. $N_D=9.10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $1.10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $1.10^{21} \text{ cm}^{-3}$ pour $d=0.3 \mu\text{m}$, ce que implique l'augmentation du rendement.

Les résultats de simulations de l'effet du dopage de la couche ZnO sur les propriétés de la structure [ZnO-Si(N⁺)-Si(P)] montre que le dopage influe positivement sur le rendement de cette dernière, avec un dopage de $9.10^{14} \text{ cm}^{-3}$ le rendement de la cellule est de 17.2 % tandis que avec un dopage de $9.10^{21} \text{ cm}^{-3}$ le rendement est de 17.3%, cela est due par le fait qu'en augmentant le dopage la conductivité de ZnO devient importante.

IV. 5. Comparaisons des résultats obtenus :

Le tableau (IV.7) représente un récapitulatif des différents résultats obtenus lors de la simulation de cellules solaires à homo-jonction PN au silicium sans couche antireflet, avec couche antireflet SnO₂ et ZnO . Étant la réflexion des TCOs est de 10%, l'épaisseur $d=0.3\mu\text{m}$ et le dopage des TCOs ; $N_D=9.10^{21}\text{cm}^{-3}$:

Paramètres structures	I _{cc} (A)	V _{co} (V)	P _{max} (W)	FF%	$\eta\%$
Jonction PN sans couche antireflet	0.0274	0.6372	0.0128	0.7331	12.8
[SnO ₂ -Si(N ⁺⁺)-Si(P)]	0.0362	0.6516	0.0172	0.7291	17.2
[ZnO-Si(N ⁺⁺)-Si(P)]	0.0362	0.6485	0.0173	0.7337	17.3

Tableau IV.5 : Propriétés de la structure solaire simulée dans les différents cas.

Les résultats de la simulation des deux cellules [SnO₂ – Si(N⁺⁺)-Si(P)] et [ZnO-Si(N⁺⁺)-Si(P)] de 1 cm² sous PC1D montrent que l'utilisation de la couche antireflet à la surface de la cellule solaire à homojonction [Si(N⁺⁺)-Si(P)] apporte une amélioration des paramètres de cette dernière à savoir le courant de court circuit (I_{cc}) qui augmente de 0.0088 A et l'augmentation du rendement de 4.4 % pour la couche antireflet SnO₂, et de 4.5 % pour la couche antireflet ZnO.

Ces résultats expliquent le rôle que joue la couche antireflet sur le rendement de la structure en minimisant de plus en plus la réflexion du flux incident afin de laisser passer la totalité de ce flux vers la couche active.

Ces résultats montrent que la structure [ZnO-Si(N⁺⁺)-Si(P)] de (17.3 %) à un bon rendement que la structure [SnO₂-Si(N⁺⁺)-Si(P)] (17.2 %) cela est dû aux caractéristiques de ces TCOs.

Conclusion

CONCLUSION

Au cours de ce travail, nous avons étudié l'utilisation des TCOs (Oxyde Transparents Conducteur), (le dioxyde d'étain SnO_2 et l'oxyde de zinc ZnO) comme couche antireflet pour une cellule solaire à base de silicium.

Le dioxyde d'étain SnO_2 et l'oxyde de zinc ZnO ont été utilisés comme électrode transparente dans la cellule solaire pour leur bonne conductivité électrique combinée à une transparence élevée sur toute l'étendue du spectre visible et du proche infrarouge, d'autre part l'indice de réfraction de ces couches compris entre 1.8 et 2.0, ce qui permet leur utilisation comme couche antireflet.

Nous avons utilisé une simulation numérique à une dimension PC1D, afin d'optimiser l'influence de la couche antireflet soit de SnO_2 ou de ZnO sur les paramètres de la cellule $[\text{Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$, nous avons aussi analysé l'influence de la réflexion, de l'épaisseur et de dopage de la couche de (SnO_2 , ZnO) sur la même structure.

En effet les résultats de la simulation montrent que ces paramètres jouent un rôle primordial dans les performances de la cellule, et afin d'optimiser l'influence de ces couches sur les paramètres de la cellule solaire dans le but de mettre en évidence l'importance de dépôt d'une couche antireflet de SnO_2 ou de ZnO sur la cellule solaire à base de silicium, une comparaison entre les trois cellules $[\text{Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$, $[\text{SnO}_2\text{-Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$, $[\text{ZnO}\text{-Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$ à été faite dans ce travail.

Les résultats de la simulation sous logiciel PC1D des cellules $[\text{Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$, $[\text{SnO}_2\text{-Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$, $[\text{ZnO}\text{-Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$, montrent que l'utilisation de couche antireflet à la surface de la cellule homojonction apporte une amélioration importante sur ces paramètres à savoir le courant de court circuit (I_{cc}) qui augmente de 0.0088 A et l'augmentation du rendement de 4.4 % pour la couche antireflet SnO_2 , et de 4.5 % pour la couche antireflet ZnO .

Ces résultats montrent aussi que la cellule $[\text{ZnO}\text{-Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$ de (17.3 %) a un bon rendement que la cellule $[\text{SnO}_2\text{-Si}(\text{N}^{++})\text{-Si}(\text{P})]$ (17.2 %).

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] :Baromètre du Solaire Photovoltaïque, Système Solaire, Avril 2004,N 160, pp.69-83.
- [2]: D. Lambe et al/ Thin solid films 518 (2009) 1222-1224
- [3]: G. Gordon/ MRS Bulletin/ 25(2000) 52-57
- [4] : Y. Saadeddin/ thèse université Bordeaux I, 2009
- [5] : O. Boussoum, « Etude de l'effet d'une couche mince de TiO₂ sur les paramètres d'une cellule solaire au Silicium». Thèse de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2011).
- [6]: B.J. Baliga, « Power Semiconductor Device Figure of Merit for High-Frequency Applications ». Rev.IEEE Electron Device Letters, Vol.10, 455-457, (1989).
- [7]: B.S. Jeong et al, «Conductivity in transparent anatase TiO₂ films epitaxially grown by reactive sputtering deposition», Solid-State Electronics 47, pp. 2275-2278, 2003.
- [8] : J. Garnier, « Elaboration de couches minces d'oxydes transparents et conducteurs par spray cvd assisté par radiation infrarouge pour applications photovoltaïques», Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2009.
- [9]: J. Loney et al/ Electrocomponent Science and Technology, 2 (1976) 223-231
- [10]: T.K. Subramanyam et al/ Crystal Reserch Technology, 35 (2000) 1193-1202
- [11]: A.I. Inamdar, Solar Energy Materials & Solar Cells, 91(2007) 864-870
- [12]: E. Fortunato, Solar Energy & Solar cells, 92 (2008) 1605-1610
- [13]: R. Parra et al/ Materials Research Bulletin, 43(2008) 3202-3211
- [14]: E.N. Dattoli et al/ Nano Letters, 7(2007) 2463-2469
- [15]: X.L. Wang et al/ Journal of Physical : Condensed Matter, 20(2008) 045214
- [16]: J. Joseph et al/ Chinese Journal of Physics, 45 (2007) 84-97
- [17]: M-M. Bagheri-Mohaghighi et al/ Solid State Sciences, 11(2009) 233-239
- [18]: K. Jain et al/ Sensors and Actuators B, 113(2006) 823-829
- [19]: E. Elangovan et al/ Journal of Crystal Growth, 276 (2005) 215-221
- [20]: J. Wienke et al/ Solar Energy Materials & Soalr Cells, 92 (2008) 884-890
- [21]: K.S. Shamala et al/ Bulltin of Material Science, 27 (2004) 295- 301
- [22]: J. Zhao et al/ Acta Materialia, 58 (2010) 6243- 6248

- [23]: O. Maksimov, *Revue of Advanced Materials Science*, 24 (2010) 26-34
- [24]: J. Wang et al/ *Thin Solid Films*, 515 (2007) 8785-8788
- [25]: B. Thangarajou, *Thin solid films* 402 (2002) 71-78
- [26]: E. Elongovan et al/ *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 5(2003) 45-54
- [27]: M. Gaidi, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (1999).
- [28]: E. Elangovan et al/ *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 6(2004) 197-203
- [29]: P. Nunes et al/ *Vaccum*, 64 (2002) 281-285
- [30]: Z. Fan et al/ *Université de Californie*, 2005
- [31]: R.G.W. Wyckoff, *Crystal Structures* (Interscience, New York, 1963).
- [32]: Z. Fan et al/ *Université de Californie*, 2005
- [33]: S.E. Park et al/ *Journal of the Korean Physical Society*, 54 (2009) 1283-1287
- [34]: S. Ilican et al/ *Journal of optoelectronics and advanced Materials*, 10 (2008) 2592-2598
- [35]: S. Franz et al/ *Journal of Electronic Materials*, 6 (1977) 107-123
- [36]: O. Malik et al/ *Journal of non Crystalline solids*, 354(2008) 2472-2477
- [37] : W. Gopel, J. Pollmann, I. Ivanov, B. Reihl, *Phys. Rev. B: Condens. Matter* 26 (1982) 3144-50
- [38] : S. Suh et al/ *Journal of Materials Science Letters*, 20(2001) 115-118
- [39] : Benelmadjat Hannane, "élaboration et caractérisation des composites dopés par des agrégats nanométriques de semi-conducteurs", thèse magister, Constantine (2007).
- [40] : M. Maâche « Dépôt et Caractérisation de Couches Minces de ZnO par Spray Pyrolyse », Université de Biskra, (2005).
- [41] : G. Huertas « Etude de Nouveaux Matériaux D'électrode Positive et d'électrolyte Solide Vitreux Sous Forme de Couches minces pour des Couches Minces Microbatteries au Lithium », Thèse de doctorat, université de Bordeaux, (2006).
- [42] : Y.Sayad, "Interaction Laser-Semiconducteur : Contribution à l'étude de la technique
- [43] : GREEN M.A. *Silicon Solar Cells :Advanced Principles and Practice*. Sydney,Australia: centre for photovoltaic devices and systems,UNSW? 1995, 366p.
- [44] : RICAUD A. *Photopiles solaire*. Lausanne, Suisse : Presse polytechnique et universitaire romandes, 1997, 332p.

- [45] : SZLUFCHIK J. ET AL. Low-cost industrial technology of silicon solar cells. Proc. Of the IEEE, vol. 85, No. 5, 1997, pp. 711-729.
- [46]: Site web : google.fr / Puissance focalisés de haute logement faisceau de la lampe à arc 50W-1600W mercure-xénon).
- [47]: Y.Sayad, “Interaction Laser-Semiconducteur : Contribution à l’étude de la technique
- [48]: K. LAGHA-MENOUER, «Etude et réalisation d’une cellule solaire multicouches du type Si-SiO₂-SnO₂-ZnO par APCVD». Thèses de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2011).