

Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou
Faculté du génie électrique et d'informatique
Le département d'électronique



*Etude de structure à multicouches
d'oxydes transparents conducteurs
pour application photovoltaïque*

Mémoire Élaboré en Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

En électronique

Option : matériaux et dispositifs électroniques et photovoltaïques

Présenté par :

HAYAT MECHICHE

Sous la direction de :

Mme NEMMAR FARIDA

M^{elle} ZIANI NORA

Année universitaire : 2016/2017

Remerciement

Tous d'abord, je tiens à remercier tous particulièrement ma promotrice Madame NEMMAR pour m'avoir confié ce travail et pour la confiance qu'elle a placée en moi, pour ses précieux conseils, son encouragement et son soutien durant la préparation de ce présent travail.

Un grand merci au Mademoiselle ZIANI NORA pour toutes ses orientations et ses précieux conseils, qui m'ont permis d'accomplir ce travail, à qui j'exprime ma profonde gratitude et reconnaissance.

Comme je tiens à exprimer mes vifs remerciements aux membres de jury qui m'ont fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail malgré leurs lourdes responsabilités.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, m'ont encouragé, à quelque titre ou degré que ce soit, à achever ce mémoire.

Hayat MECHICHE

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mon trésor : Les meilleurs parents qui puissent existés.

*A mes adorables sœurs Zakia, Fetta, Souhila, Samira, Meriem, Sabiha,
Julie*

A mes chers frère Karim, Mourou, Mustapha1, Mustapha2, et Rachid.

A mes anges Nadine, Slimane, Amel, Amina

A mes amis

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

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : semi-conducteurs et cellules solaires	
I.1.Les semi-conducteurs.....	3
I.1.1.Définition d'un semi-conducteur	3
I.1.2. Les deux types de semi-conducteurs : intrinsèque et extrinsèque.....	4
I.1.2.1. Semi-conducteur intrinsèque	4
I.1.2.2.Semi-conducteur extrinsèque	4
a) Semi-conducteur extrinsèques type N.....	4
b) Semi-conducteur extrinsèque type P.....	5
I.2. La jonction PN	6
I.2.1. Définition de la jonction PN	6
I.2.2. La jonction PN a l'état initial	6
I.2.3. La jonction PN à l'état d'équilibre	6
I.2.4. Les courants dans la jonction PN	7
I.3. Jonction PN polarisée	8
I.3.1 Polarisation directe	8
I.3.2. Polarisation en inverse	8
I.4. Cellules photovoltaïques.....	9
I.4.1. Définition d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.4.2. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	9
I.4.3.Les différents types de cellule photovoltaïque	11
I.4.3.1.Cellule en silicium monocristalline	11
I.4.3.2.Cellule en silicium poly cristalline	12
I.4.3.3.Cellule en silicium amorphes en couche mince	13

Sommaire

I.4.3.4. Cellule sans silicium en couche mince CIS	13
I.4.3.5. Cellule multi-jonction.....	14
I.4.3.6. Cellules photovoltaïques organiques.....	15
I.5. Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire.....	15
I.6. Paramètres photovoltaïques	17
I.6.1. Courant de court-circuit (J_{sc})	18
I.6.2. Tension de circuit ouvert (V_{oc})	18
I.6.3. Facteur de forme (FF)	19
I.6.4. Le rendement (η).....	19
Chapitre II : les oxydes transparents conducteurs (TCO)	
Introduction	20
II.1 Définition d'un matériau TCO	20
II.2. Les propriétés des TCO	20
II.2.1. Les propriétés optiques	20
II.2.2. Les propriétés électriques	22
A) La conductivité	22
B) La mobilité	22
II.3. Différents types de TCO.....	23
II.4. Différents types de défauts dans les TCO.....	23
II.5. Applications des TCOs dans les cellules photovoltaïques	23
II.6. Oxyde de zinc (ZnO)	24
II.6.1. La structure cristalline	24
II.6.2. Les propriétés générales du ZnO	25
II.6.3. Les propriétés optiques du ZnO	25

Sommaire

II.6.4. Les propriétés électriques du ZnO	26
II.7. L'oxyde d'étain SnO ₂	27
II.7.1. Structure cristalline.....	27
II.7.2. Le gap de SnO ₂	28
II.7.3. Propriétés électriques	28
II.7.4. Propriétés optiques.....	29
II.8. Techniques de dépôt des oxydes transparents conducteurs	29
II.8.1. Propriétés de ZnO élaboré avec différentes méthodes.....	29
II.8.2. Propriétés de SnO ₂ élaboré avec différentes méthodes	30
II.9. Le contact métal semi-conducteur	31
II.9.1. Contact ohmique	31
II.9.2. Contact redresseur (schottky).....	32
II.10. Les cellules solaires à hétérojonction	33
Chapitre III : Simulation de la cellule solaire à multicouches SnO₂/ZnO/Si	
Introduction.....	35
III.1. Structure de la cellule solaire à simuler.....	35
III.2. Les paramètres de simulation	36
III.3. Présentation de logiciel de simulation AFORS-HET	37
III.3.1. Première zone : Program control.....	38
III.3.2. Deuxième zone : Externalparameters.....	38
III.3.3. Troisième zone : Measurements.....	38
III.4. Etape de simulation	39
Chapitre IV : résultats et interprétations	
Introduction	42

Sommaire

IV.1. Influence de la température sur la caractéristique I(V) de la cellule à multicouches SnO ₂ /ZnO/Si	42
IV.2. Influence de l'épaisseur de l'émetteur (ZnO) sur la cellule à multicouches SnO ₂ /ZnO/Si	42
IV.3. Influence de dopage de l'émetteur (ZnO) sur la cellule à multicouches SnO ₂ /ZnO/Si	44
IV.4. Influence de l'épaisseur de silicium sur la cellule à multicouches SnO ₂ /ZnO/Si	46
IV.5. Influence de dopage de silicium sur la cellule à multicouches SnO ₂ /ZnO/Si.....	48
Conclusion générale	51

Bibliographie

Introduction générale

Actuellement, les énergies fossiles sont consommées bien plus rapidement qu'elles ne se forment dans la nature. Il est estimé que les réserves mondiales en pétrole et gaz seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas planifiée, et au mieux vers 2100 si des mesures ne sont pas prises pour essayer de développer de nouvelles énergies [1]. La recherche de sources d'énergie renouvelables et non polluantes constitue un des enjeux technologiques majeurs du 19^{ème} siècle. Les énergies renouvelables sous leurs multiples formes : éolienne, solaire thermique, photovoltaïque, hydroélectrique, biomasse et géothermique. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergies proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment.

Parmi ces différents moyens de génération de l'électricité, l'énergie solaire photovoltaïque c'est-à-dire la génération d'électricité à partir de la lumière est la plus récente, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Elle se produit d'un dispositif de conversion appelé « cellule solaire » basé sur un effet dit "l'effet photovoltaïque".

Les matériaux de base utilisés pour fabriquer les cellules solaires photovoltaïques sont les semi-conducteurs qui possèdent un gap suffisamment faible pour absorber le maximum du spectre solaire. De tous les semi-conducteurs qui possèdent tel gap, le silicium est le plus prometteur car il est non-toxique et très abondant sur la terre. De plus, ce matériau étant déjà à la base de toute la technologie de l'électronique.

Pour augmenter le rendement de la conversion et diminuer le prix de revient des cellules solaires, la recherche de nouvelles structures et de nouveaux matériaux dans la conception des cellules solaires demandant un faible budget de fabrication est l'une des voies principales. Les nouvelles connaissances acquises dans le domaine des matériaux et des nouvelles structures permettent d'exploiter l'apport de chacun de ces deux paramètres à l'augmentation du rendement photovoltaïque tout en diminuant le prix de revient des nouvelles cellules solaires. C'est dans cette thématique que rentre ce travail de mémoire. Notre attention s'est portée sur l'utilisation des oxydes transparents conducteurs pour réaliser des cellules solaires à hétérojonction à partir d'un substrat de silicium. Ce type de cellules photovoltaïques est une issue pour réduire le prix de l'électricité solaire à grande échelle. Elles présentent un cout de fabrication faible par rapport aux cellules solaires conventionnelles à homo jonction PN vu le

cout relativement bas et la facilité de mise en œuvre des techniques utilisées pour leur fabrication. Elles présentent aussi l'avantage d'avoir un rendement photovoltaïque appréciable.

L'objectif principal de ce mémoire est de faire une étude théorique sur les cellules solaires à multicouches à base d'oxydes transparents conducteurs (oxyde de zinc ZnO et dioxyde d'étain SnO₂) déposé sur le silicium, et de simuler ces structures à l'aide du logiciel (AFORS-HET) ainsi que l'étude de l'effet des différents paramètres de la couche d'oxyde transparent conducteur sur les performances de ces cellules solaires.

Notre travail est rapporté dans ce mémoire selon quatre chapitres

Dans le premier chapitre, nous décrivons les notions essentielles sur les semi-conducteurs et la jonction PN, ainsi que les cellules solaires et leurs caractéristiques photovoltaïques.

Le deuxième chapitre est consacré aux cellules solaires photovoltaïques à base d'hétérojonction, et les oxydes transparents conducteurs avec leurs propriétés optiques et électriques.

Dans le troisième chapitre, nous présentons notre contribution consistant en une simulation numérique des différents paramètres de la cellule solaire à multicouches en utilisant le logiciel AFORS-HET.

L'interprétation des résultats obtenus par la simulation sont présentés dans le quatrième chapitre.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale.

Introduction :

Dans ce chapitre on fait appel à quelques bases indispensables dans le domaine photovoltaïque. Nous décrirons les semi-conducteurs, la jonction PN et les cellules solaires avec leur caractéristiques photovoltaïques.

I.1.Les semi-conducteurs :**I.1.1.Définition d'un semi-conducteur :**

Un semi-conducteur est un matériau qui peut être soit un conducteur ou un isolant électrique selon la température et selon la tension d'excitation. Les dispositifs électroniques comme la diode, le transistor ont été fabriqués à base de semi-conducteurs, parmi les matériaux les plus utilisés dans la fabrication de ces dispositifs il y a le silicium(Si), le germanium(Ge). [1]

Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses bornes, un faible courant électrique apparaît, provoqué à la fois par le déplacement des électrons et par celui des « trous » qu'ils laissent dans la bande de valence.

La conductivité électrique des semi-conducteurs peut être contrôlée par dopage, en introduisant une petite quantité d'impuretés dans le matériau afin de produire un excès d'électrons ou un déficit. Des semi-conducteurs dopés différemment peuvent être mis en contact afin de créer des jonctions, permettant de contrôler la direction et la quantité de courant qui traverse l'ensemble. Cette propriété est à la base du fonctionnement des composants de l'électronique moderne : diodes, transistors, etc.

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, et de son abondance naturelle même s'il existe également des dizaines d'autres semi-conducteurs utilisés, comme le germanium, l'arséniure de gallium ou le carbure de silicium.[2]

I.1.2. Les deux types de semi-conducteurs : intrinsèque et extrinsèque

I.1.2.1. Semi-conducteur intrinsèque :

Est un solide cristallisé sans défaut de structure. Dans le cas du Silicium (Si:4 électrons de valence), chaque atome de Silicium met en commun avec les 4 atomes voisins une liaison. A la température ambiante le nombre de porteurs de charges est très faible ce qui donne une mauvaise conduction, c'est pour cette raison que le Semi Conducteurs Intrinsèques n'intervient pas dans la fabrication des dispositifs à Semi Conducteurs. Une présentation schématique donnée sur la figure (I.1).

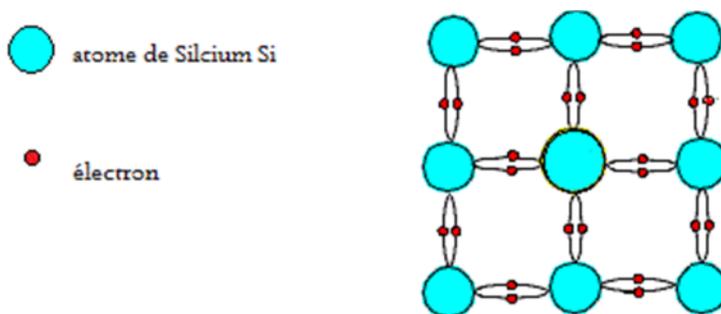


Figure (I.1) : semi-conducteur intrinsèque

I.1.2.2. Semi-conducteur extrinsèque :

Semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque au quel on a introduit des impuretés (des atomes étrangères) ; C'est le **dopage**.

Il y'a deux types de dopages qui donnent deux types de semi-conducteurs extrinsèques : négatif et positif, selon l'impureté introduite. Si on prend notamment le cas de Si (4 électrons).

a) Semi-conducteur extrinsèques type N :

L'impureté introduite contient Cinq électrons de valence ; exemple le phosphore (P : 5 électrons de valences). Chaque atome de P va mettre en liaison si 4 électrons de valence avec les 4 atomes de Si voisins et un électron seul (électron célibataire), cet électron qui va se manifester comme un porteur de charge (-) et le Phosphore devient un ion positif (+). Une présentation schématique est donnée sur la figure (I.2).

Le semi conducteur extrinsèque de type N est caractérisé par le nombre important de porteur de charges (-) électrons libres.

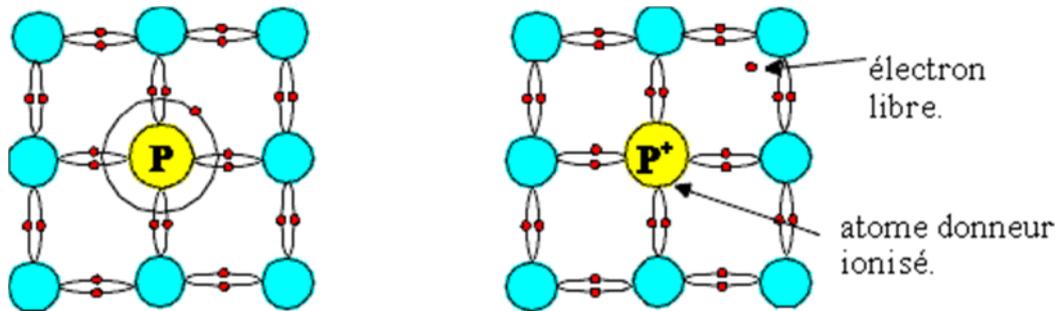


Figure (I.2) : semi-conducteur type N

b) Semi-conducteur extrinsèque type P :

L'impureté introduite est trivalente exemple le Bore (Br ; 3électrons de valences) le Bore va mettre trois liaisons avec les trois atomes de Si voisins, et fixe un électron de 4ème atome Si est devient un ion négatif, l'électron perdu par le 4ème de Si produit un défaut qui joue le rôle d'un porteur positif de charge (trou). Une présentation schématique est donnée sur la figure (I.3).

Dans le semi-conducteur extrinsèque de type P, il y'a un nombre important de porteurs de charges (+) (des trous).

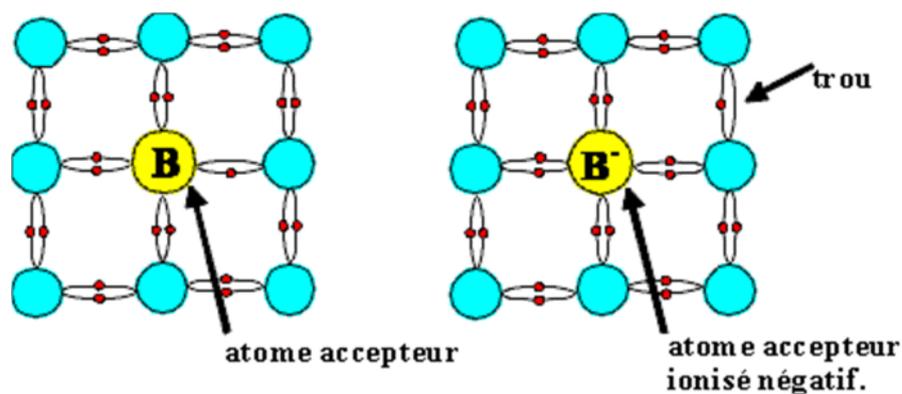


Figure (I.3) : semi-conducteur type P

Donc on peut dire que le semi-conducteur extrinsèque porte un nombre important de porteurs de charges (+ positive ou - négative), ce qui donne une conduction importante.

I.2. La jonction PN :

I.2.1. Définition de la jonction PN :

Une **jonction PN** est la mise en contact de deux barreaux de semi-conducteurs extrinsèques de type opposé (P avec N), la surface de séparation entre les deux régions est appelée jonction PN.

I.2.2. La jonction PN à l'état initial :

Pour le semi-conducteur type N, les électrons sont des majoritaires (plus nombreux) et les trous qui sont minoritaires. Voir la figure (I.4)

Pour le semi-conducteur type P, les trous sont majoritaires (plus nombreux) et les électrons qui sont minoritaires. Voir la figure (I.4).

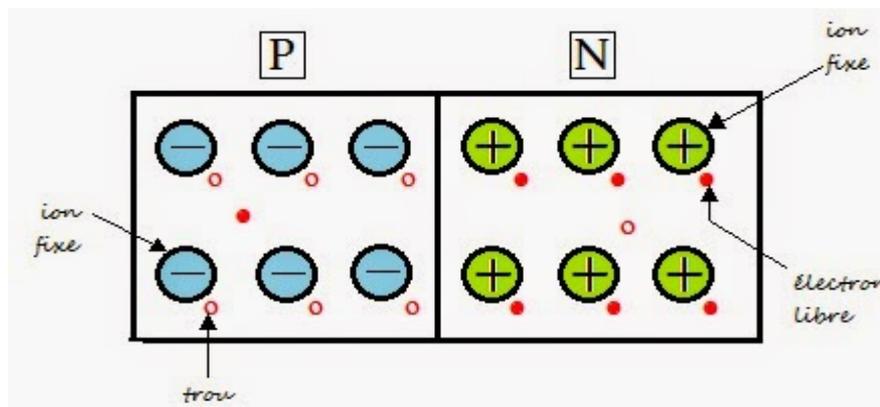


Figure (I.4) : jonction PN à l'état initial

I.2.3. La jonction PN à l'état d'équilibre :

Autour de la jonction PN, les électrons qui ont une concentration très élevée dans la région N diffusent vers la région P pour se combiner avec ses trous et de donner une zone qui ne contient pas des porteurs de charges mobiles appelée **zone de transition (ou de déplétion)**, qui contient que les ions fixes de chaque charge. Ces ions créent un champ électrique appelé champ de diffusion dirigé de la région N vers la région P qui entraîne l'existence d'un potentiel électrique V_d (**potentiel de diffusion**) en absence d'un générateur externe (pour le Si par exemple, $V_d = 0,7$ volt). Une présentation schématique donnée sur la figure (I.5).

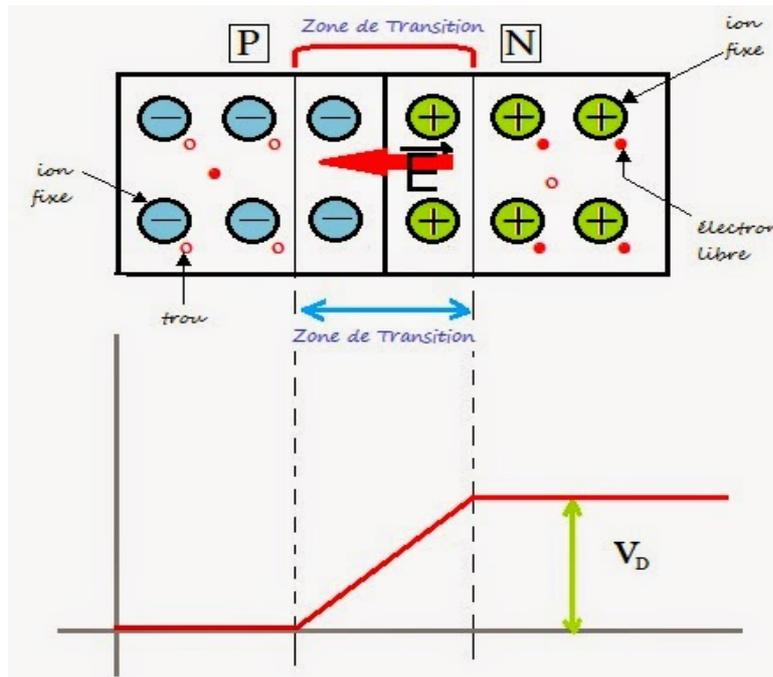


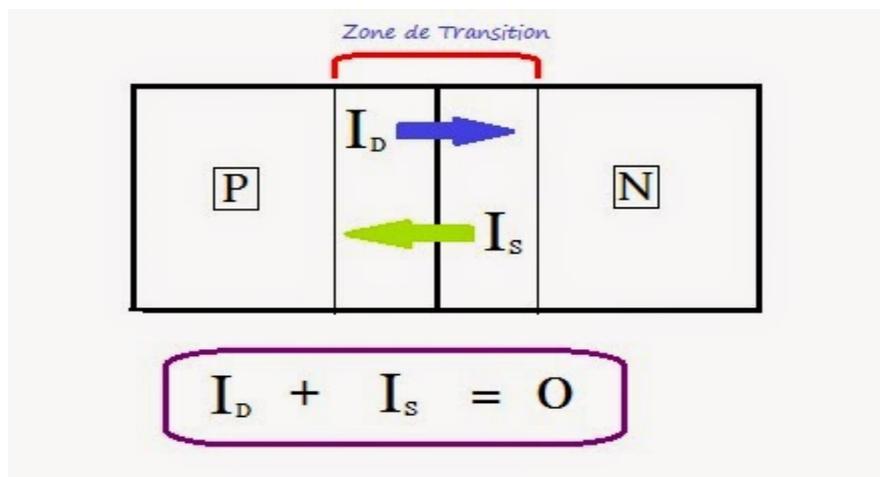
Figure (I.5) : Jonction PN a l'état d'équilibre

I.2.4. Les courants dans la jonction PN :

Certain électrons majoritaires de la région N qui abordent la zone de transition peuvent la traverser vers l'autre région sous effet de la température ambiante d'où l'apparition du courant I_D (courant de diffusion).

Les porteurs minoritaires de la région P qui aborde la zone de transition sont accélérés par le champ E_D vers l'autre région. Il en résulte le courant de saturation I_S .

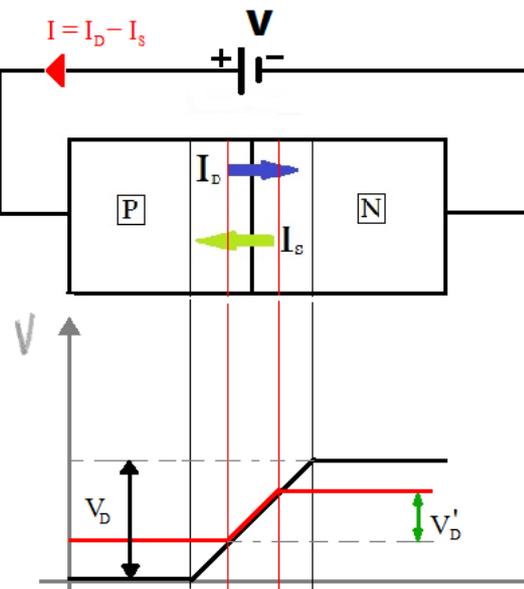
Le courant à l'extérieur du semi-conducteur est nul ; $I_D + I_S = 0$



I.3. Jonction PN polarisée :

I.3.1 Polarisation directe :

Si on excite la jonction PN par un générateur de tension V . de façon a ce que la borne (+) est reliée a la région P, et la borne (-) est reliée la région N.



La barrière de potentiel plus faible et sa valeur devient :

$$V'_D = V_D - V$$

La zone de transition diminue, et la probabilité de diffusion des porteurs majoritaires augmente.

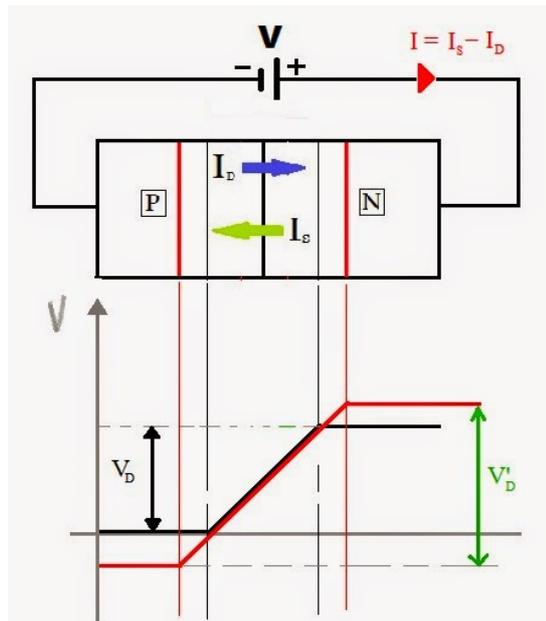
La courant de diffusion augmente et devient plus grand devant le courant de saturation, ce qui donne un courant total important qui augmente avec V tel que

$$I = I_D - I_S \approx I_D$$

Donc la jonction PN conduit en sens direct

I.6.2. Polarisation en inverse :

Si on excite la jonction PN par un générateur de tension V . de façon a ce que la borne (-) est reliée a la région P. et la borne (+) est reliée la région N.



La barrière de potentiel devient plus importante et sa valeur devient

$$V'_D = V_D + V$$

La zone de transition devient plus grande, les porteurs sont incapables de franchir la zone.

Le courant de diffusion devient plus faible (presque nul) donc le courant total devient très faible (presque nul) par ce que I_s est de quelques μA (courant très faible).

$$I = I_s - I_D \approx I_s$$

$$I \approx 0$$

Donc la jonction ne conduit pas en sens inverse, on dit qu'elle est bloquée

I.4. Cellules photovoltaïques :

I.4.1. Définition d'une cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique.

I.4.2. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Dans une cellule photovoltaïque, lorsqu'un photon (particule de lumière) est absorbé par le semi-conducteur, il donne naissance à un électron et un trou.

En effet, ce photon va transmettre son énergie à un électron (particule négative) qui va alors se libérer de l'attraction de son noyau et donc laisse un trou (chargé positivement) derrière lui.

Pour obtenir un courant électrique, les charges positives (trous) et négatives (électrons) doivent être séparées puis attirées vers l'extérieur. C'est à ce moment qu'intervient le champ électrique interne créé par la jonction PN : c'est lui qui va repousser les électrons dans la zone N et donc séparer les charges.

Les porteurs de charge sont, ensuite, collectés par l'intermédiaire d'une grille, qui fait office d'anode, à l'avant et un contact, qui fait office de cathode, à l'arrière. On obtient alors un courant électrique continu d'environ 0,5 V entre ces électrodes.

Donc, tant que la cellule est exposée à la lumière, elle absorbe des photons qui assurent le découlement continu de l'opération.

Une présentation schématique donnée sur la figure (I.6).

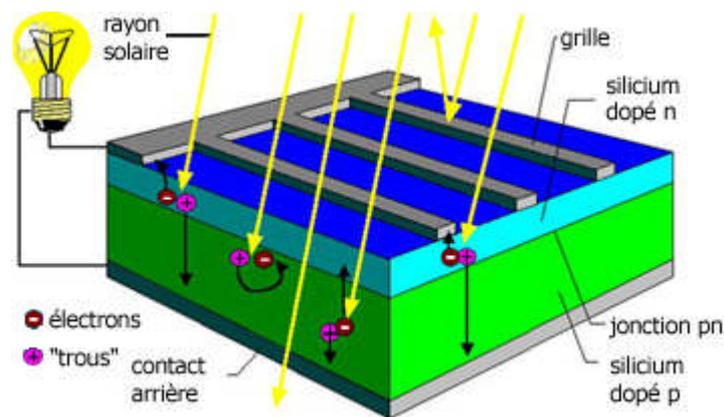


Figure (I.6) : fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.4.3. Les différents types de cellule photovoltaïque :

I.4.3.1. Cellule en silicium monocristalline :



Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. [3]

Avantage :

Très bon rendement (environ 150 W/cm²)

Durée de vie importante (+/- 30 ans)

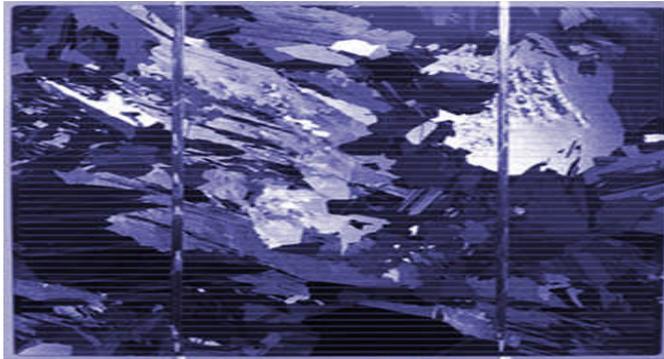
Inconvénients :

Coût élevé

Rendement faible sous un faible éclaircissement

Rendement module commercial : 12 à 20%

Rendement record en laboratoire : environ 25%

I.4.3.2. Cellule en silicium poly cristalline :

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

[4]

Avantage :

Bon rendement (environ 100 W/cm²).

Durée de vie importante (+/- 30 ans).

Meilleur marché que le monocristalline

Inconvénients :

Rendement faible sous un faible éclaircissement.

Rendement record en laboratoire : environ 20%

Ce type de cellules ont pour l'instant le meilleur rapport qualité / prix

I.4.3.3. Cellule en silicium amorphes en couche mince :

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires". [4]

Avantage:

Fonctionnent avec un éclairage faible.

Bon marché par rapport aux autres types de cellules.

Moins sensible aux températures élevées.

Inconvénients :

Rendement faible en plein soleil (environ 60 W/cm^2), les cellules en couche mince nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses.

Durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps.

Rendement record en laboratoire : environ 13,4%

I.4.3.4. Cellule sans silicium en couche mince CIS :

Les cellules CIS représentent la nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type cuivre-indium-sélénium (CIS). Les matières premières nécessaires à la fabrication des cellules CIS sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques. De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince.[4]

Avantage :

Permet d'obtenir les meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince.

Permet de s'affranchir du silicium.

Les matériaux utilisés ne causent pas de problème de toxicité.

La cellule peut être construite sur un substrat flexible.

Inconvénients :

Les cellules en couche mince nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses.

Rendement record en laboratoire : environ 19,3%

I.4.3.5. Cellule multi-jonction :

Les cellules multi-jonction sont composées d'un grand nombre de semi-conducteurs (GaAs, Ge, GaInP2...) possédant chacun un spectre limité. En choisissant des matériaux dont les longueurs d'onde limites sont les plus proches possibles les unes des autres, l'ensemble des cellules absorbe un spectre le plus complet. [4]

Avantage :

Rendement inégalé

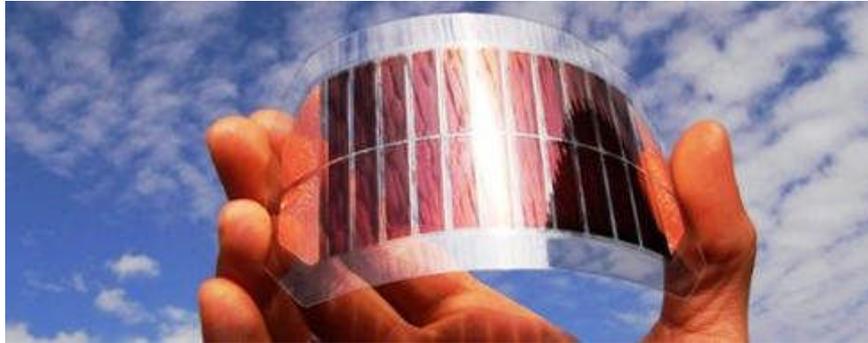
Inconvénient :

Pas d'application commerciale.

Rendement record en laboratoire : environ 40% (sous une concentration de 240 soleils).

Développé pour les applications spatiales, ce type de cellule n'est pas encore commercialisable.

I.4.3.6. Cellules photovoltaïques organiques :



Les cellules solaires organiques (CSO) ouvrent de vastes possibilités d'extension des applications de la conversion photovoltaïque en tirant parti de la plasticité et de la légèreté des matériaux organiques. Cependant, l'intérêt potentiel majeur des CSO réside dans une réduction drastique du coût de l'électricité PV par rapport aux cellules à base de silicium. Une CSO repose sur la création d'une hétérojonction à l'interface de deux matériaux respectivement donneur et accepteur d'électrons. Un atout majeur des matériaux actifs organiques réside dans leur possible mise en œuvre par voie humide, ce qui permet de réduire fortement l'empreinte carbone de la fabrication par rapport à la filière silicium. [4]

I.5. Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire :

Le circuit équivalent d'un système est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, ...).

L'expérience montre qu'à l'obscurité ; une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s . Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité, la caractéristique I-V peut être représenté par la relation suivante :

$$I_{obs} = I_s \left(\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right)$$

Ou :

I_s : le courant de saturation en Ampère (A).

n : le facteur de qualité de la diode, sans dimension.

V_{th} : le potentiel thermique en Volt (V). Il est donné par :

$$V_{th} = KT/q$$

Ou :

K : la constante de Boltzmann ($1.38066 \cdot 10^{-23} \text{J/K} = 8.61400 \cdot 10^{-5} \text{eV/K}$).

T : la température absolue en Kelvin(K).

q : la charge absolue d'un électron en coulomb ($1.60281 \cdot 10^{-19} \text{C}$).

Sous éclairage, un terme I_{ph} , tenant compte du photo-courant généré est rajouté,

On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairage qui est représenté par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V}{nV_{th}} \right) - 1 \right)$$

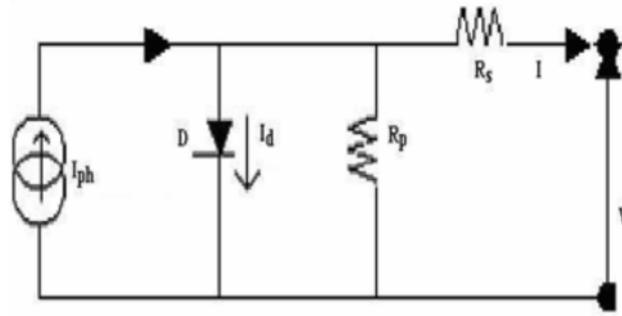
Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs et des fuites vers les bords ; qu'ils doivent être pris en considération et l'équation de la caractéristique I-V devient alors :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(V + \frac{IR_s}{nV_{th}} \right) - 1 \right) - V + IR_s / R_{sh}$$

Certains auteurs utilisent la conductance shunt ($G_{sh} = 1/R_{sh}$) pour écrire l'équation sous la forme :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(V + \frac{IR_s}{nV_{th}} \right) - 1 \right) - G_{sh}(V + IR_s)$$

Et par conséquence le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle est représenté sur la figure (I.7) par un générateur de courant (I_{ph}), une diode et deux résistances parasites (R_s) et (R_{sh}).



Figure(I.7) :circuit électrique équivalent d'une cellule solaire à jonction PN

- ❖ Le générateur du courant (I_{ph}) : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photogénéré.
- ❖ La diode (D) : modélise la jonction PN.
- ❖ La résistance série R_s : modélise les pertes résistives au sein de la photopile (les modélisations). Elle est liée à l'impédance des électrodes et du matériau ; il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension V_j aux bornes de la jonction PN. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- ❖ La résistance parallèle R_p (résistance shunt R_{sh}) : correspond à une résistance de fuite entre les deux zones N et P de la jonction ; il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera délivré par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible.

I.6. Paramètres photovoltaïque :

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule photovoltaïque. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $J(V)$.

La figure (I.8) représente une caractéristique courant-tension $J(V)$. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court circuit (J_{sc}), La tension à circuit ouvert (V_{oc}) et le facteur de forme (FF) du composant.

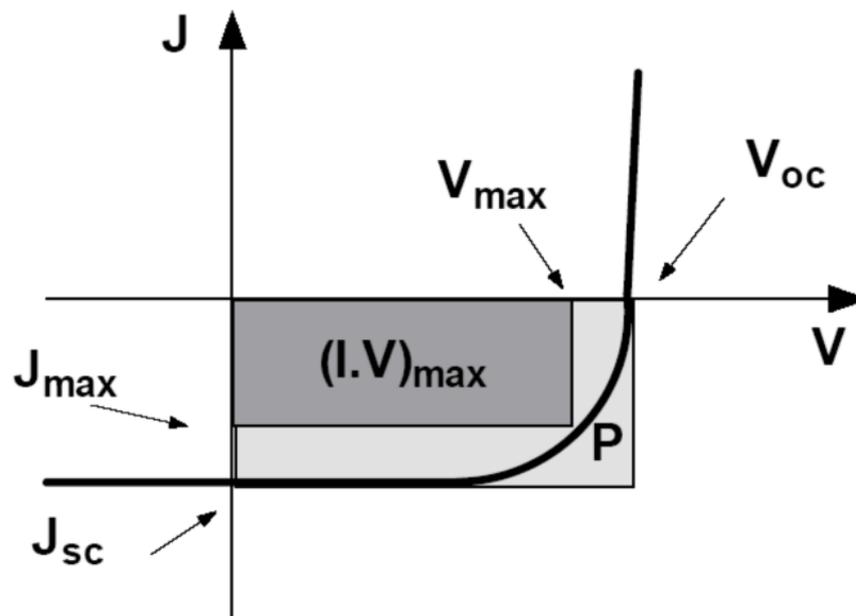


Figure (I.8) : Caractéristique $J(V)$ d'une cellule solaire définissant les paramètres photovoltaïques.

I.6.1. Courant de court-circuit (J_{sc}) :

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule solaire est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

I.6.2. Tension de circuit ouvert (V_{oc}) :

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky),

Des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule.

$$V_{oc} = K T c / q \log \left(\frac{J_{ph}}{J_s} + 1 \right)$$

Avec :

$K T c / q$: représentant la potentielle thermodynamique

T_c : est la température absolue

q : la constante de charge d'électron, $1.602 \cdot 10^{-23} \text{C}$

K : la constante de boltzmann, $1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$

J_{ph} : le courant photonique

J_s : le courant de saturation

I.6.3. Facteur de forme (FF) :

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $J(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $J_{sc} \cdot V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également.

$$FF = P_{max} / V_{oc} \cdot J_{sc}$$

I.6.4. Le rendement (η):

Le rendement η des cellules PV 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_{in} .

$$\eta = P_{max} / P_{in} = FF \cdot J_{sc} \cdot V_{oc} / P_{in}$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel.

En effet la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

Introduction :

Il est généralement considéré qu'une haute transparence optique et incompatible avec une conduction électrique élevée, puisque la transparence nécessite des valeurs du gap supérieur à 3 eV et qu'il est difficile de créer des porteurs de charges dans des matériaux à grand gap.

Cependant, le problème que l'on rencontre souvent avec les couches minces servant d'émetteurs pour les cellules solaires, c'est qu'elles doivent être à la fois conductrices et transparentes dans le domaine de visible.

A cet effet, il existe une famille d'oxydes qui, en plus d'être transparents, peuvent devenir conducteurs s'ils possèdent un excès d'électrons dans leur réseau. Cet excès d'électrons peut être créé soit par des défauts de structure, en introduisant un déséquilibre dans la stœchiométrie de l'oxyde, soit par un dopage approprié. On appelle ces oxydes des **oxydes conducteurs transparents (TCO)**.

II.1 Définition d'un matériau TCO :

Un excellent TCO est défini par une forte conductivité électrique combinée avec une faible absorption dans le visible. En général, ces deux caractéristiques sont liées à l'épaisseur de la couche déposée. Par exemple, elles dépendent de la taille des grains, qui, usuellement croît avec l'épaisseur du film. Les TCO les plus connus sont les oxydes d'indium, de cadmium, d'étain, de zinc et de gallium. Couramment, les oxydes sont dopés par un métal. Cependant, ce dopant métallique n'est actif que lorsqu'il se substitue au métal primaire. La bande de conduction est alors, fortement perturbée par chaque atome dopant, la diffusion des électrons de conduction est alors accrue, et la mobilité et en conséquence la conduction chute. C'est pourquoi certains oxydes sont dopés avec du fluor, qui, lorsqu'il se substitue à l'oxygène, engendre une perturbation de la bande de valence, ce qui minimise la diffusion des électrons de conduction.

II.2. Les propriétés des TCO :**II.2.1. Les propriétés optiques :**

L'existence d'une fenêtre optique couvrant tout le domaine du visible est caractéristique des TCO. La transmission optique est définie comme le rapport entre l'intensité de la lumière incidente et l'intensité de la lumière transmise à travers le matériau considéré. Un exemple de

spectre de transmission d'un TCO, ici une couche de SnO_2 , est représenté sur la figure (II.1) par une courbe noire. Ces courbes sont tirées des travaux d'Elangovan et al. [5] Le spectre d'absorption a été déduit des spectres de transmission et de réflexion se trouvant dans les travaux d'Elangovan. Cependant, les phénomènes tels que la diffusion de la lumière si l'échantillon est rugueux (au-delà de 20nm) ou des défauts présents dans matériau déposé comme des niveaux d'impureté dans le gap, ne sont pas pris en compte ici. Ce phénomène réduirait énormément la partie d'absorption du spectre dans le domaine du visible. Il y aurait néanmoins peu de changement pour le pic situé λ_p , qui est due à l'absorption des électrons libres.

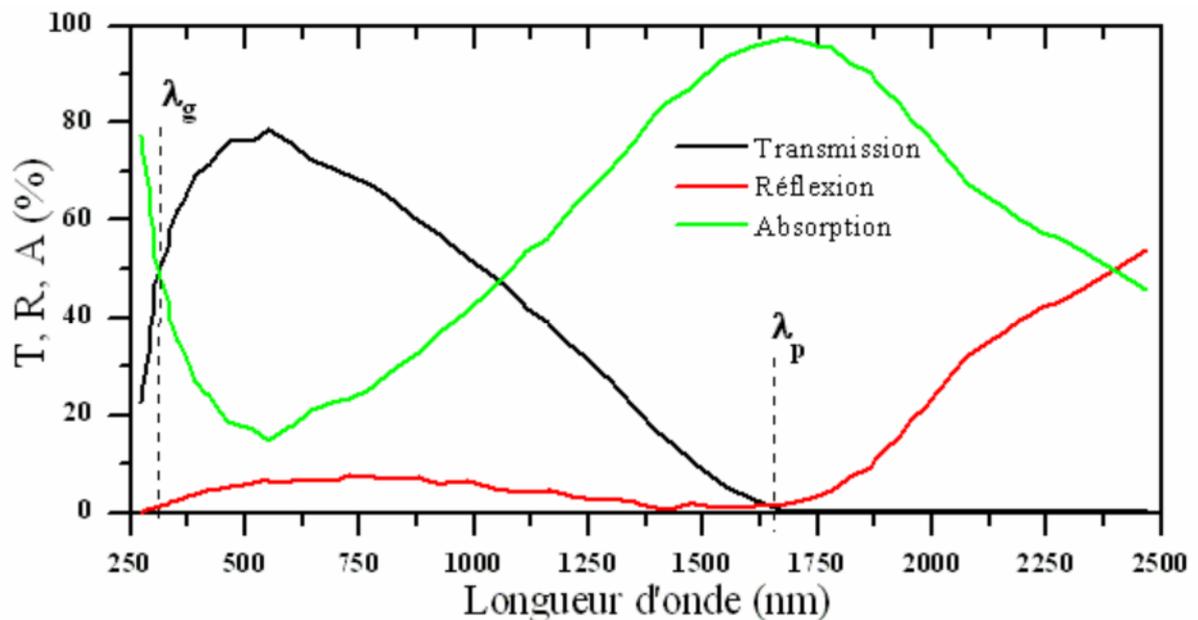


Figure (II.1) : spectre de transmission, réflexion et absorption d'un échantillon de SnO_2 de $1,14\mu\text{m}$ d'épaisseur. [5]

La fenêtre optique est centrée entre deux longueurs d'onde caractéristiques où la lumière n'est plus transmise avec pour chaque zone un phénomène différent. A faible longueur d'onde dans le domaine de l'UV proche ($\lambda < \lambda_g$), l'absorption est dominée par les transitions bande à bande. Les photons incidentes avec une énergie égale à celle du gap ou supérieure, seront absorbés par les électrons de la bande de valence ce qui leur permettront d'aller dans la bande de conduction. A haute longueur d'onde dans le domaine de l'infrarouge et proche ($\lambda > \lambda_p$), la lumière incidente est réfléchiée par le matériau. λ_p , qui est appelée longueur d'onde plasma.

II.2.2. Les propriétés électriques :**A) La conductivité :**

La physique des semi-conducteurs à grand gap décrit les propriétés électriques des TCO. La conductivité δ s'exprimant en $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ est le produit de la densité de porteurs de charges n_v en cm^{-3} , de la mobilité μ de ces charges en $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$ et de la charge électrique élémentaire de l'électron q . La résistivité ρ , définie comme l'inverse de la conductivité, s'exprime en $\Omega \cdot \text{cm}$.

$$\delta = q \cdot n_v \cdot \mu = 1/\rho$$

Une propriété électrique de surface importante dans le domaine des TCO est la résistance surfacique R_s définie comme le rapport de la résistivité par l'épaisseur de la couche suivant la relation :

$$R_s = \rho/d$$

Les propriétés intrinsèques de certains TCO en font des conducteurs de type n.

B) La mobilité :

Concernant les propriétés électriques, une autre possibilité d'augmenter la conductivité est d'accroître la mobilité. Cependant, la mobilité est dépendante intrinsèquement des mécanismes de diffusion et par conséquent, ne peut être contrôlée directement. En général, ces mécanismes limitent la mobilité quand la concentration des porteurs augmente.

La mobilité est donc un facteur important comme paramètre influençant la conductivité. Pour qu'un matériau soit conducteur, il a besoin d'une certaine densité de porteurs appelée concentration critique, notée n_c , en dessous de n_c , le matériau est considéré comme isolant et au-dessus comme conducteur. Le critère pour définir n_c , est appelé critère de Mott défini selon la relation suivante :

$$N_c^{1/3} \cdot a^* \approx 0,25 \quad [6]$$

Ou a^* est le rayon de Bohr effectif du matériau, égale à 1,35 nm.

La concentration des porteurs de charge d'un TCO est comprise entre 10^{20} et 10^{21}cm^{-3} .

II.3. Différents types de TCO:

Depuis une trentaine d'années, de nombreuses études portent sur l'utilisation de couches transparentes conductrices. De nombreux matériaux TCO sont cités en particulier : In_2O_3 , SnO_2 , ZnO , Cd_2SnO_4 , Cd_2SnO_2 , $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$ (ITO), $\text{ZnO} : \text{Al}$, $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$, $\text{SnO}_2 : \text{Cd}$, $\text{SnO}_2 : \text{F}$, $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{F}$etc.

Mais il y'a trois matériaux spécifiques sont à l'honneur : l'oxyde d'indium dopé a l'étain $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$, ou encore ITO (de l'anglais indium tin oxyde), l'oxyde de zinc ZnO et l'oxyde d'étain SnO_2 . Ces oxydes ont en commun trois caractéristiques principales :

- La largeur de la bande interdite est importante (>3 eV).
- Le composé stœchiométrique est un isolant.
- Le matériau dégénéré possède une densité de porteur élevée mais pas au point de créer une absorption dans le visible. En fait, les fréquences d'absorption se situent dans l'infrarouge, à la limite du visible, le matériau est transparent au visible.

II.4. Différents types de défauts dans les TCO :

Défauts présents dans l'TCO dépendent de la méthode de croissance et des conditions d'élaboration de ces matériaux. On pourra énumérer les défauts suivants :

- ✓ Défauts ponctuels (interstitiels, lacunes, atomes étrangers).
- ✓ Défauts linéaires (dislocations et sous joint de grains).
- ✓ Défauts plans (macles, joints de grains).

Il existe d'autres types de défauts d'ordre thermique (phonon) ou électrique (électrons, trou).

II.5. Applications des TCOs dans les cellules photovoltaïques :

En pratique, les TCOs en couches minces sont utilisés en tant qu'électrodes transparentes, ils sont polycristallins ou amorphes, ils possèdent une résistivité de l'ordre de $10^{-3} \Omega \text{ cm}$ ou inférieure et une transmission supérieure ou égale a 80% dans la gamme du visible. De plus, ces TCOs doivent avoir une concentration en électrons libres de l'ordre 10^{20} cm^{-3} avec un gap optique de 3 à 4 eV.

II.6. Oxyde de zinc (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 ces 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.

II.6.1 La structure cristalline :

L'oxyde de zinc est un oxyde transparent conducteur du groupe II-VI. Il cristallise sous différentes structures comme le sel gemme, le zinc blende et la Wurtzite (figure II.2). Les films d'oxyde de zinc sont principalement connus sous la structure Wurtzite. Cette structure peut se définir comme un empilement hexagonal d'oxygène ($a=3,250\text{\AA}$, $c=5,205\text{\AA}$). Les tétraèdres sont liés entre eux par les atomes d'oxygène et leurs centres sont occupés par un cation Zn^{2+} .

Les atomes d'oxygène et de zinc se trouvent respectivement dans les positions : $\text{O}^{2-}(1/3 ; 2/3 ; z)$, $(1/3 ; 2/3 ; 0)$ avec $z=0,38$.

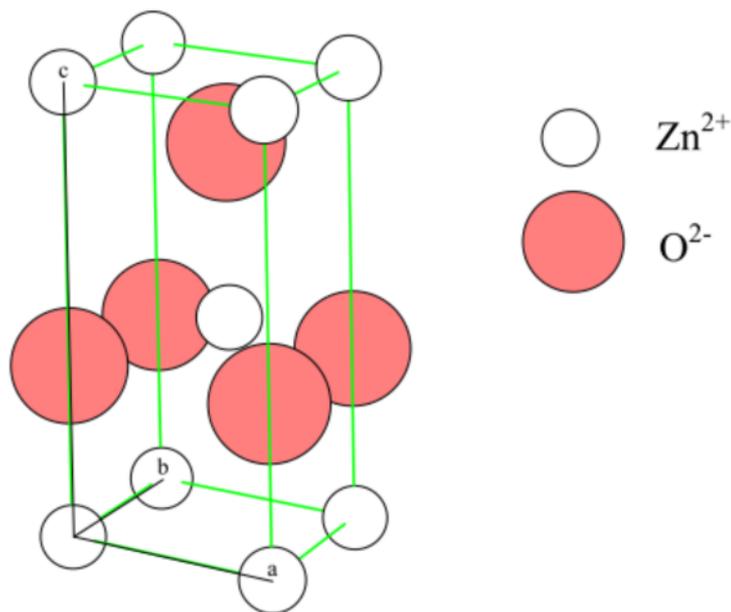


Figure (II.2) : structure Wurtzite de l'oxyde de zinc

II.6.2. Les propriétés générales du ZnO :

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 polycristalline possédant des caractéristiques courant-tension non linéaire). Il peut également trouver des applications en optoélectronique, cathode luminescence, photoluminescence, électroluminescence, comme capteur de produit chimique dans les couches minces.

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-onde ou encore comme matériel piézoélectrique.

II.6.3. Les propriétés optiques du ZnO :

L'oxyde de zinc ZnO est un matériau transparent, son indice de réfraction varie entre 1,9 et 2,2. Il présente une absorption aux environs de 360 nm, longueur d'onde dans l'ultraviolet, ce qui explique la valeur du gap des films minces de ce matériau. Par contre, il est transparent dans le spectre visible et proche infrarouge comme l'indique la figure (II.3).

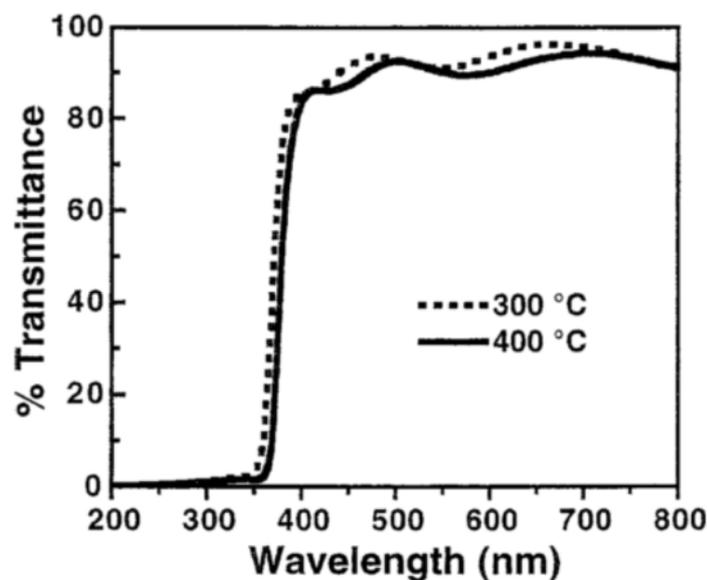


Figure (II.3) : Transmission d'un film d'oxyde de zinc recuit pour différentes températures. [8]

En plus de propriétés de transparence de l'oxyde de zinc, ce matériau présente aussi la propriété de luminescence. Sous l'effet d'un faisceau lumineux d'énergie supérieure au gap du ZnO, l'oxyde de zinc émet des photons. Ces photons ont généralement une longueur d'onde de l'ordre de 550 nm correspond à la lumière verte.

II.6.4. Les propriétés électriques du ZnO :

L'oxyde de zinc présente un gap direct (figure II.4) ; 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 k (k étant le vecteur d'onde dans la zone Brillouin).

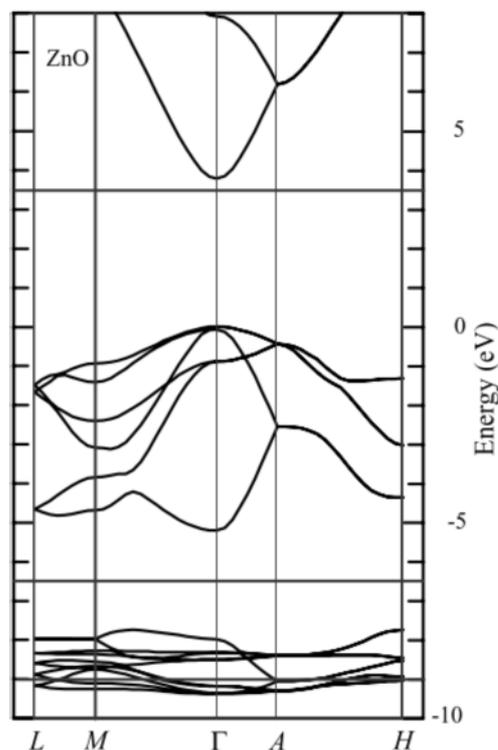


Figure (II.4) : Présentation du gap de l'oxyde de zinc

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. les éléments chimiques qui permettent un dopage type n du ZnO sont l'aluminium, le gallium et l'indium.

Ces dernières années, des travaux de recherches se sont orientés vers l'étude et la synthèse de l'oxyde de zinc dopé p. 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 [7] 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 $2 \text{ cm}^2/\text{V.s}$.

II.7. L'oxyde d'étain SnO₂ :

L'oxyde d'étain est un oxyde transparent conducteur de type n. Il a été le premier TCO à être commercialisé. Le SnO₂ est un matériau chimiquement inerte et dur mécaniquement ; il résiste aux hautes températures et est stable vis-à-vis de l'atmosphère.

II.7.1. Structure cristalline :

L'oxyde d'étain SnO₂ cristallise dans le système tétragonal rutile figure (II.5) représenté avec les paramètres suivants : $a=b=4,737 \text{ \AA}$ et $c=3,186 \text{ \AA}$.

La maille contient six atomes, quatre atomes d'oxygène et deux atomes d'étain. Dans ce système chaque atome d'oxygène est entouré de trois atomes d'étain et tout atome d'étain est entouré de six atomes d'oxygène.

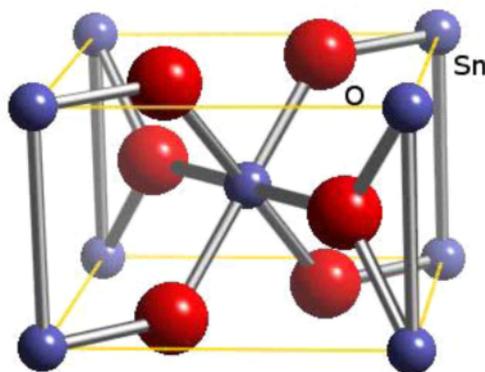


Figure (II.5) : maille élémentaire du SnO₂ (structure rutile) .

II.7.2. Le gap de SnO₂ :

Le gap de l'oxyde d'étain en couches minces varie entre 3,6 et 4,2 eV, ses variations sont liées aux techniques utilisées pour son élaboration. Le gap de l'oxyde 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 II.6) (\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.

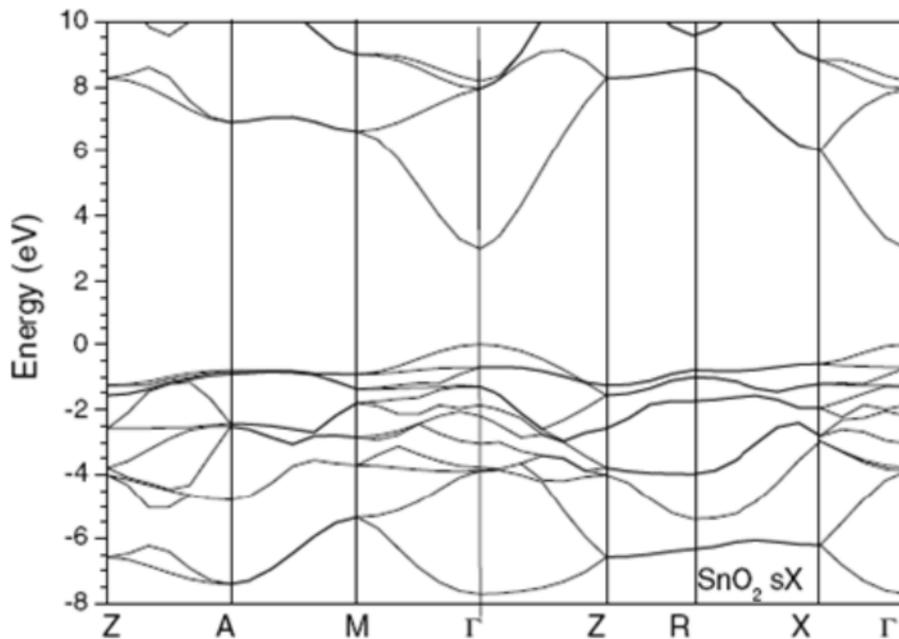


Figure (II.6) : Présentation de la bande interdite de l'oxyde d'étain

II.7.3. Propriétés électriques :

L'oxyde d'étain présente une concentration en électrons libres de l'ordre de 10^{19} à 10^{20} cm^{-3} . Celui-ci peut être dopé pour améliorer ses propriétés électriques. Le SnO₂ est dopé principalement avec l'antimoine (Sb), le fluor (F), l'arsenic (As) et le niobium (Nb).

Le fluor augmente la conductivité de l'oxyde d'étain et n'affecte pas sa transmission dans la gamme du visible. Ceci grâce aux grandeurs proches des tailles des atomes d'oxygène ($r=0,132 \text{ nm}$) et du fluor ($0,133 \text{ nm}$) ainsi que des énergies de liaison Sn-F ($466,5 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) et Sn-O ($527,6 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$).

II.7.4. Propriétés optiques :

Le SnO₂ présente une réflexion importante du rayonnement solaire dans la gamme de l'infrarouge, et une forte absorption dans le domaine ultraviolet, tandis qu'il a une transmission de l'ordre de 85% dans la gamme du visible et il devient opaque au-delà de 1200 nm. Cette diminution de la transmission optique est due à la forte augmentation de l'absorption provoquée par la présence des électrons libres. La figure (II.7) présente la transmission et la réflexion d'un film SnO₂ dopé fluor.

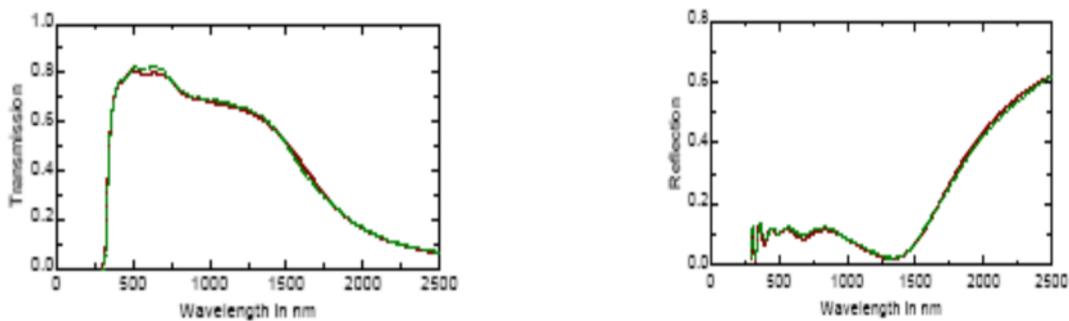


Figure (II.7) : Transmission et réflexion d'un film d'oxyde d'étain dopé fluor.[8]

II.8. Propriétés des oxydes transparents conducteurs en fonction de techniques de dépôt :

Les oxydes transparents conducteurs sont déposés sous forme de couches minces par plusieurs techniques de fabrication parmi lesquelles : la déposition chimique en phase vapeur APCVD (atmospheric pressure chemical vapour deposition), le spray pyrolyse, la pulvérisation r.f magnétron, dépôt par ablation laser, le sol gel et la technique de déposition par pulsation laser.

II.8.1. Propriétés de ZnO élaboré avec différentes méthodes :

Sur les tableaux suivants (II.1) et (II.2), nous résumons les caractéristiques de ZnO [9], et SnO₂ [10], obtenues selon différentes méthodes d'élaboration.

Procédé	Matériau	Epaisseur ou vitesse de dépôt	Transmission (%)	Résistivité ρ (Ω -cm)
Sol-gel	ZnO	250 nm	80-90	3,8
	ZnO :Al			0,27
Spray pyrolyse	ZnO	200 nm/min	~92	10^{-1}
	ZnO :F			
Ablation laser	ZnO	/	>85	$(7-9)*10^{-3}$
				$(5-8)*10^{-2}$

Tableau (II.1) : Propriétés de ZnO élaboré avec différentes méthodes. [9]

II.8.2. Propriétés de SnO₂ élaboré avec différentes méthodes :

Procédé	Matériau	Transmission (%)	Résistivité (Ω -cm)	Mobilité ($\text{cm}^2/(\text{V.S})$)
Spray	SnO ₂	97	$4,3*10^{-3}$	/
Sputtering	SnO	95	$6,1*10^{-3}$	7,7
CVD	SnO ₂ :F	80	$1,9*10^{-3}$	19

Tableau (II.2) : propriétés de SnO₂ élaboré avec différentes méthodes. [10]

II.9. Le contact métal semi-conducteur :

Le contact métal-semi conducteur constitue l'un des dispositifs de base de l'électronique moderne. On l'emploie aussi bien pour ces propriétés de redressement (diode Schottky) que pour réaliser des contacts ohmiques de bonne qualité.

Lorsqu'un métal et un semi conducteur sont en contact, il s'établit un échange de charges pour que le système trouve un équilibre thermodynamique. La structure des bandes d'énergie à l'interface du contact métal-semi conducteur est conditionnée d'une part du type du semi conducteur et d'autre part de la différence éventuelle entre le travail de sortie du métal ϕ_m et celui du semi conducteur ϕ_s , on aura alors les cas suivants :

- ❖ Lorsque : $\phi_m > \phi_s$: le contact métal /semi conducteur (n) est redresseur
Le contact métal / semi conducteur (p) est ohmique
- ❖ Lorsque : $\phi_m < \phi_s$: le contact métal /semi conducteur (n) est ohmique
Le contact métal /semi conducteur (p) est redresseur

II.9.1.Contact ohmique :

Ce contact est établi lors de la parition d'une zone d'accumulation des porteurs majoritaires coté semi conducteur. Les diagrammes des bandes d'énergies d'un tel contact sont représentés sur les figures (II.8 et II.9) .On voit bien que l'amplitude de la courbure des bandes de leur prolongement dans le semi conducteur sont très petits. Comme résultat, il y'a presque pas de barrière entre le métal et le semi conducteur. Ainsi les électrons peuvent circuler librement à travers le contact.

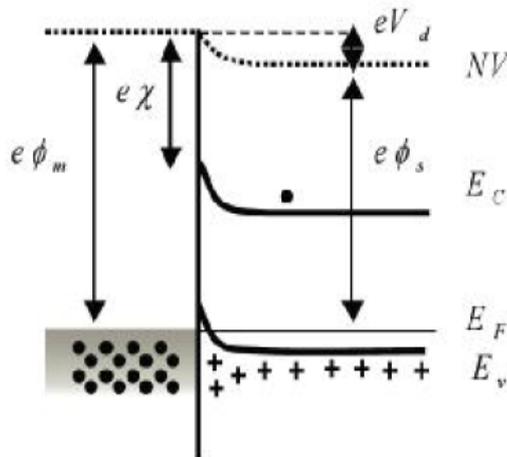
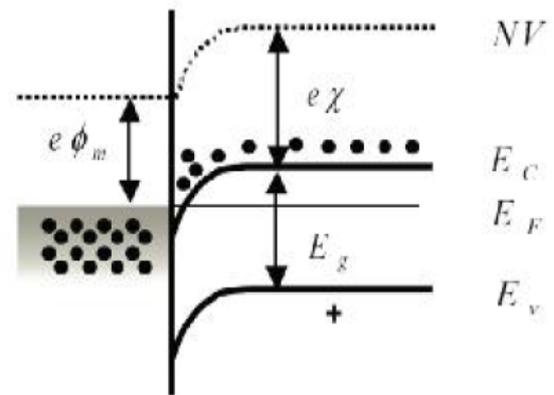


Figure (II.8) : Contact ohmique métal-Semi conducteur(p) avec $e\Phi_m > e\Phi_s$ à l'équilibre thermodynamique



Figure(II.9) : Contact ohmique métal - semi conducteur(p) avec $e\Phi_m < e\Phi_s$ à l'équilibre thermodynamique

II.9.2. Contact redresseur (Schottky) :

Ce type de contact est obtenu lorsqu'une zone désertée en porteurs majoritaires apparaît du côté semi conducteur.

A la mise en contact du métal M avec un semi conducteur, et à l'équilibre, les niveaux de Fermi s'effectuent par passage d'électrons du métal vers le semi conducteur ou vis versa, selon leurs travaux de sortie ainsi que le dopage du semi conducteur. Cette diffusion d'électrons s'arrête lorsque le champ interne généré par la charge d'espace équilibre le courant de diffusion. La barrière de potentiel formée à l'interface est appelée barrière de schottky Φ_B , dont la hauteur est donnée par la différence entre le travail de sortie du métal et l'affinité électronique du semi conducteur selon la relation suivante :

$$\Phi_B = (\Phi_M - \chi_s)$$

Φ_M : travail de sortie du métal.

χ_s : affinité électronique du semi conducteur.

La tension de diffusion V_d (pour un semi conducteur de type N) s'écrit :

$$V_d = \Phi_M - \Phi_S = \Phi_M - \chi - (E_C - E_{F,n})/q$$

E_C = niveau d'énergie de la bande de conduction.

$E_{F,n}$ = niveau d'énergie de Fermi du semi conducteur.

Les diagrammes énergétiques de ce type de contact sont illustrés sur les figures (II.10 et II.11) :

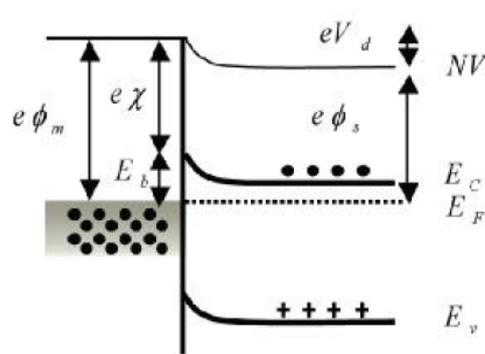
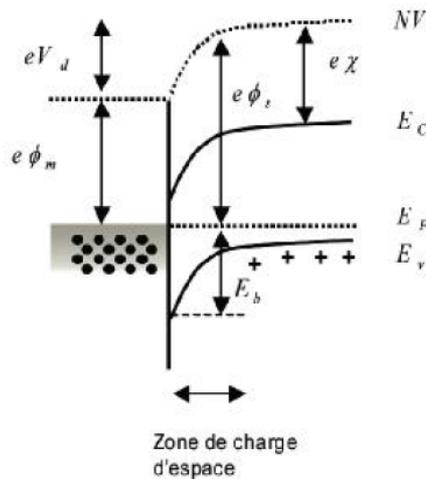


Figure (II.10): Contact schottky

métal-semiconducteur (n)

avec $e\Phi_M > e\Phi_S$ a

l'équilibre thermodynamique

Figure (II.11): Contact schottky

métal-semi conducteur (n) avec

$e\Phi_M < e\Phi_S$ a l'équilibre

thermodynamique

II.10. Les cellules solaires à hétérojonction :

Lorsque deux matériaux, métal-semi conducteur, semi conducteur-semi conducteur ou métal-insulant-semi conducteur, sont en contact, il s'établit un échange de charges pour que le système trouve un équilibre thermodynamique.

Dans les cellules solaires conventionnelles à homo jonction PN, l'émetteur est constitué par la zone fortement dopé, alors que dans les cellules solaire à hétérojonction cet émetteur est

remplacé par le matériau à large gap. Cependant, le problème de recombinaison en surface rencontré dans la cellule photovoltaïque à homo jonction est remplacé par le problème des recombinaisons au niveau de l'interface. Il est à signaler que le taux de recombinaison au niveau de l'interface est considérablement inférieur au taux de recombinaison au niveau de la surface. Cette comparaison est valable dans le cas où, le matériau à large gap est passif, c'est-à-dire, présente une faible absorption et une recombinaison nulle.

Les modèles qui traitent des hétérojonctions sont :

Le modèle d'Anderson, dans ce cas on ne tient pas compte des états d'interfaces.

Des modèles tenant compte des états d'interfaces et des pertes qui influent sur le profil des bandes engendrant les recombinaisons.

Des modèles qui prennent en considération les états d'interfaces et le transport de charge par effet tunnel.

Avantage des cellules solaires à hétérojonction :

- Faible cout de fabrication.
- Base température de fabrication
- Adaptation a l'utilisation des couches minces

Introduction :

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la simulation de la cellule solaire à multicouches SnO₂(n)-ZnO(n)-Si(p), afin d'optimiser les paramètres physiques et géométriques en vue d'obtenir un rendement maximal. Pour cela nous avons utilisé le logiciel de simulation AFORS-HET (AutomatFOR Simulation of HET erostructures).

Nous définissons dans un premier lieu la structure à simuler ainsi que les paramètres utilisés dans la simulation. Par la suite, nous présentons un descriptif de logiciels de simulation AFORS-HET et sa mise en œuvre dans le cadre de notre travail.

III.1. Structure de la cellule solaire à simuler :

La figure (III.1) représente la structure de la cellule solaire utilisée pendant la simulation. La structure a été étudiée sous spectre AM1.5 avec $P=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=300\text{K}$.

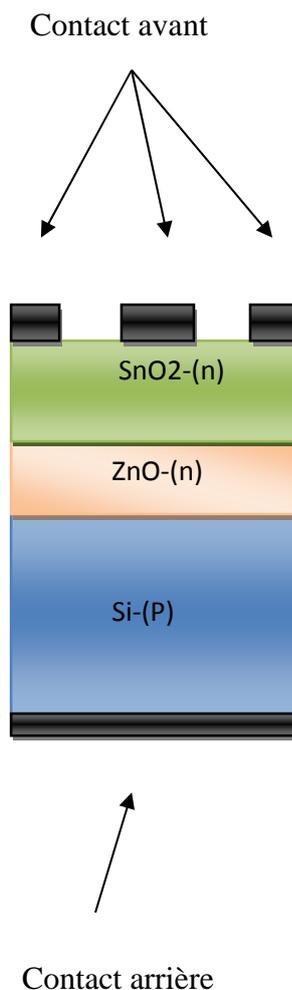


Figure (III.1) : structure de la cellule photovoltaïque à simuler

III.2. Les paramètres de simulation :

Les paramètres de simulation de la cellule à multicouches SnO₂/ZnO/Si son donnés dans le tableau (III.1).

Paramètres	SnO ₂	ZnO	Si
Constant diélectrique (dk)	9	8,75	11,9
Affinité électronique χ [eV]	5,02	4,5	4,01
Energie de gap E_g [eV]	4,8	3,3	1,12
Energie du phono optique E_{gopt} [eV]	4,8	3,3	1,12
Densité d'état effective dans la bande de conduction N_c [cm ⁻³]	2,86 ^{E19}	2,86 ^{E19}	2,86 ^{E19}
Densité d'état effective dans la bande de valence N_v [cm ⁻³]	3,1 ^{E19}	3,1 ^{E19}	3,1 ^{E19}
Mobilité des électrons μ_n [cm ² /V.s]	15	100	1400
Mobilité des trous μ_p [cm ² /V.s]	2500	2500	380
Concentration des atomes accepteurs N_A [cm ⁻³]	0	0	1 ^{E16}
Concentration des atomes donneurs N_D [cm ⁻³]	9 ^{E19}	1 ^{E19}	0
vitesse des électrons V_n [cm/s]	10000000	10000000	10000000

Vitesse des trous V _h [cm/s]	10000000	10000000	10000000
Densité [g/cm ⁻³]	5,606	5,606	2,328
Coefficient de recombinaison Auger pour les électrons (rae) [cm ⁶ /s]	0	0	0
Coefficient de recombinaison Auger pour les trous (rah) [cm ⁶ /s]	0	0	0
Coefficient de recombinaison direct de bande a bande (rbb) [cm ³ /s]	0	0	0
Epaisseur [cm]	2 ^E -5	3 ^E -6	0,035

Tableau (III.1) : Paramètres de la cellule solaires à simuler

III.3. Présentation de logiciel de simulation AFORS-HET :

Le logiciel AFORS-HET (Automate **FOR** Simulation of **HET** erostructures) est un outil de simulation numérique a une dimension (1D), développée en Allemagne par le laboratoire Helmhlotz-Zentrum (HZB). Ce logiciel est particulièrement adapté aux simulations des cellules solaires à hétérojonction à base de silicium.

AFORS-HET possède une interface graphique intuitive qui permet de définir aisément des structures (assemblage de couches) dont en peut contrôler la plupart des paramètres physiques (affinité électronique, énergie de gap, mobilité, dopage, etc.). Cette interface est divisée principalement en trois zones, figure (III.1).

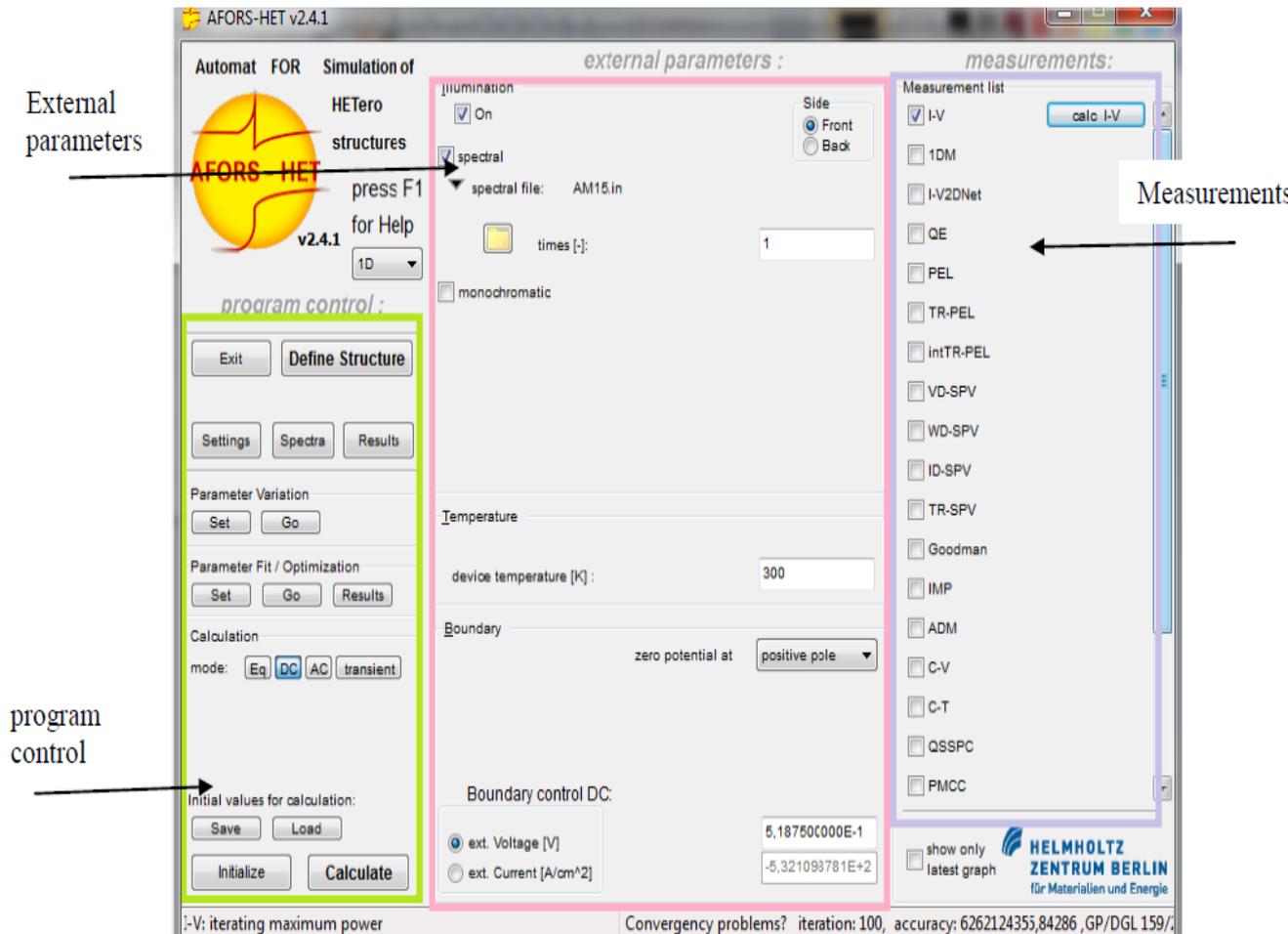


Figure (III.1) : Interface graphique du logiciel de simulation 1D AFORS-HET

III.3.1. Première zone : Program control

C'est la zone où on peut définir la structure à simuler, ainsi que les paramètres de chaque matériau utilisé. Dans une structure on peut trouver : un contact avant, contact arrière et un certain nombre de couches entre lesquelles existent des interfaces.

III.3.2. Deuxième zone : External parameters

Les paramètres externes sont divisés en trois groupes : la température externe, le spectre d'illumination et les conditions aux limites.

III.3.3. Troisième zone : Measurements

C'est là où on peut choisir la mesure à effectuer.

III.4. Etape de simulation

La structure initiale définie dans AFORS-HET est donc constituée des couches suivantes (classées de l'avant à l'arrière de la cellule), figure (III.2)

1. Contact avant ;
2. La couche de SnO₂ ;
3. La couche de ZnO ;
4. Interface ZnO-Si (MS-Schottky-Contact) ;
5. La couche de Si [P] ;
6. Contact arrière ;

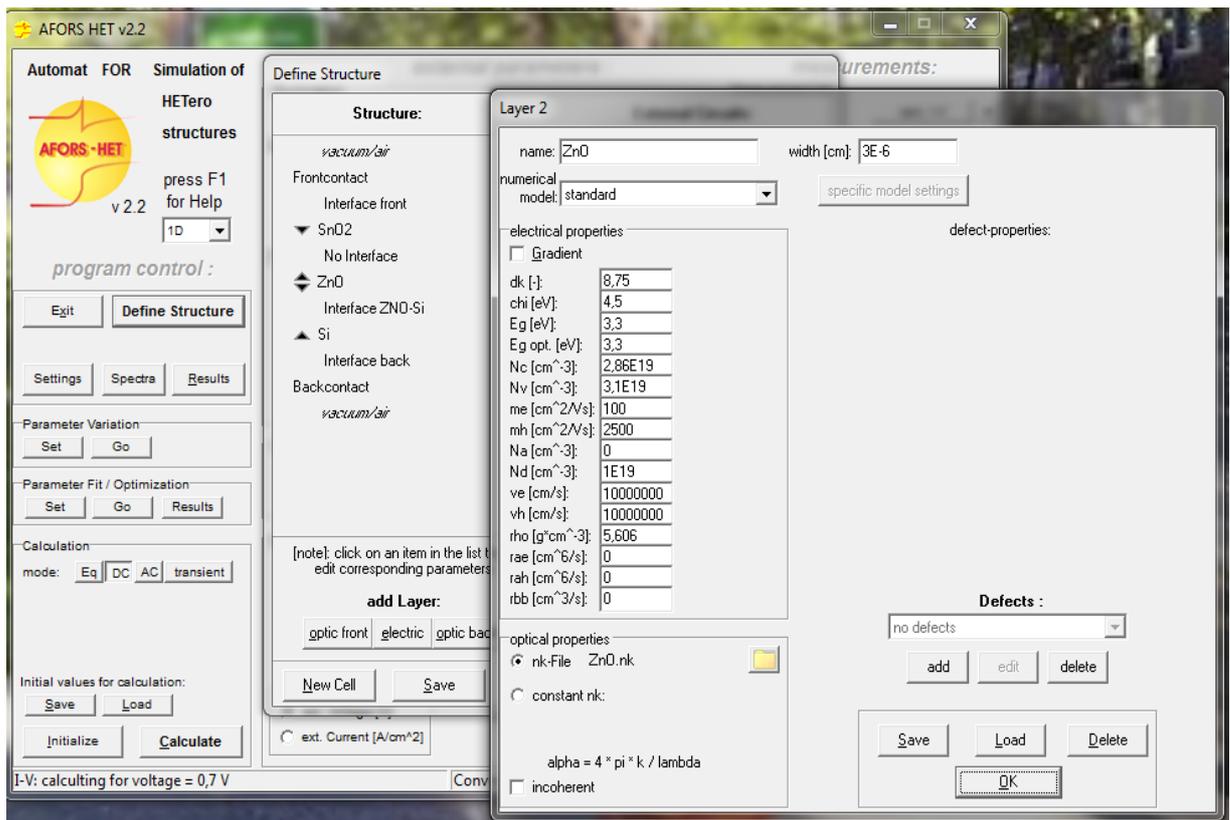


Figure (III.2) : Définition de la structure et introduction des paramètres

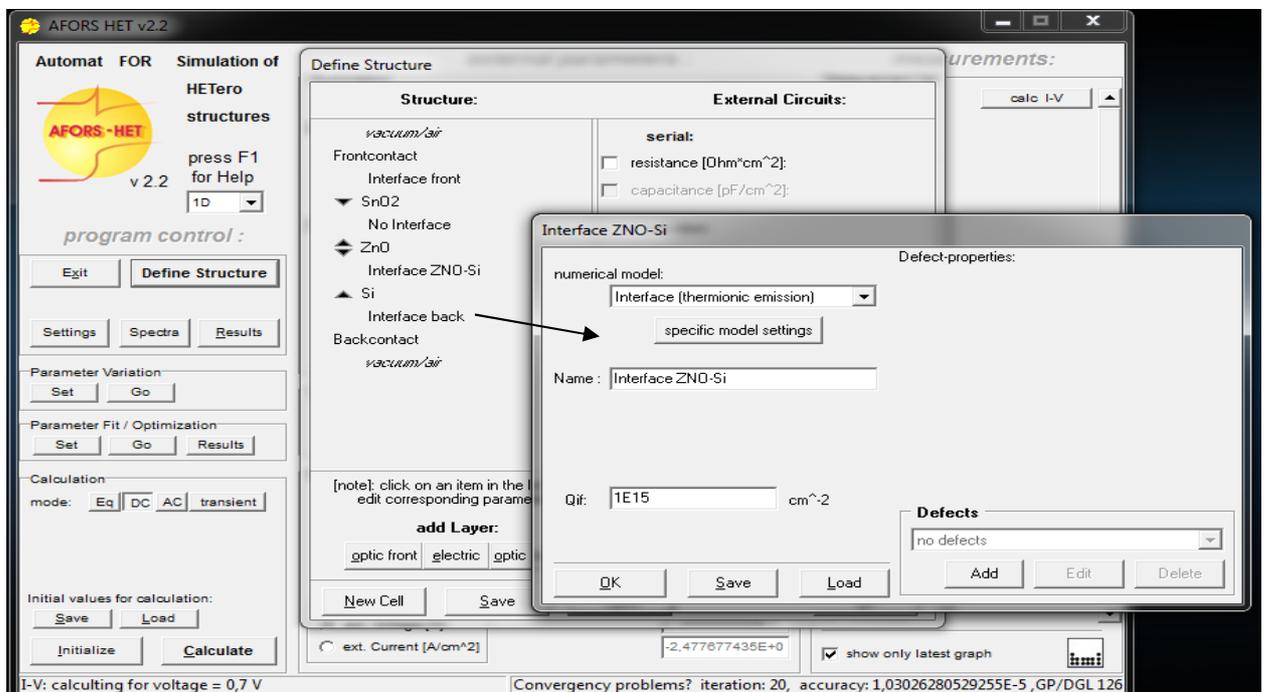


Figure (III.3) : Choix de l'interface entre deux couches

Lorsque la structure est enregistrée, le calcul des conditions d'équilibre thermodynamique est effectué. Il est ensuite possible d'ajouter une excitation via une polarisation (DC ou AC) et/ou de la lumière (monochromatique ou polychromatique), figure (III.4). On pourra donc reproduire de nombreuses techniques de caractérisation expérimentales (I-V, réponse spectral, spectre de photoluminescence, C-V, etc.).

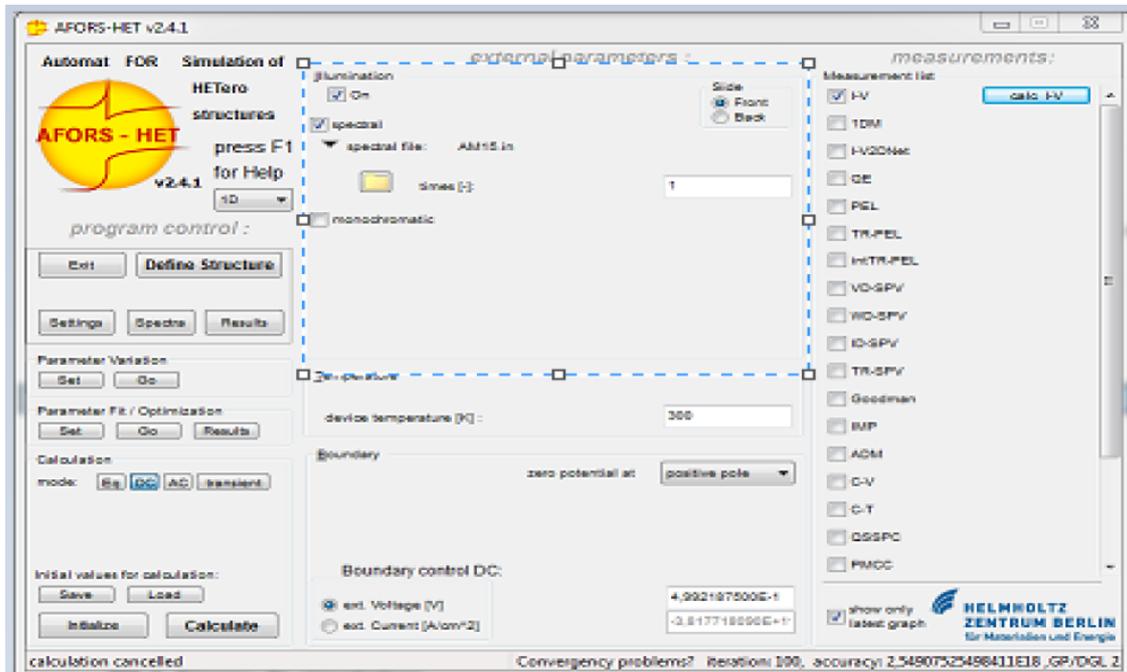


Figure (III.4) : Calcul des conditions d'équilibre thermodynamique et d'illumination de la cellule.

Introduction :

Dans ce présent chapitre nous allons présenter les résultats obtenus par la simulation de la cellule solaire à multicouches SnO₂/ZnO/Si .décrite dans le chapitre précédent.

IV.1.Influence de la température sur la caractéristique I(V) de la cellule à multicouches SnO₂/ZnO/Si :

Température	Voc (mV)	Icc (mA/cm ²)	Rendement η(%)
278	647,7	38,16	20,69
283	638,3	38,16	18,78
300	608,6	38,16	18,6
313	585,2	38,16	18,19
323	566,4	38,16	17,47

Le tableau (IV.1) montre l'effet de la température sur les caractéristique Voc, Icc, et le rendement de la cellule solaire à multicouches SnO₂/ZnO/Si, les meilleures performances de la cellule sont obtenues à la température ambiante Au- delà de cette valeur, nous observons une décroissance de la tension de circuit ouvert et de rendement avec l'augmentation de la température de la cellule. Ceci peut être expliqué par la diminution de la mobilité des porteurs.

IV.2.Influence de l'épaisseur de l'émetteur (ZnO) sur la cellule à multicouches SnO₂/ZnO/Si :

Le tableau (IV.2) montre l'effet de l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur sur les caractéristiques de la cellule à multicouches SnO₂/ZnO/Si :

Epaisseur de ZnO(nm)	Voc(mV)	Icc(mA)	Rendement η(%)
10	608,6	38,23	18,64
20	608,6	38,2	18,62
30	608,6	38,16	18,6
40	608,6	38,12	18,59
50	608,6	38,09	18,57

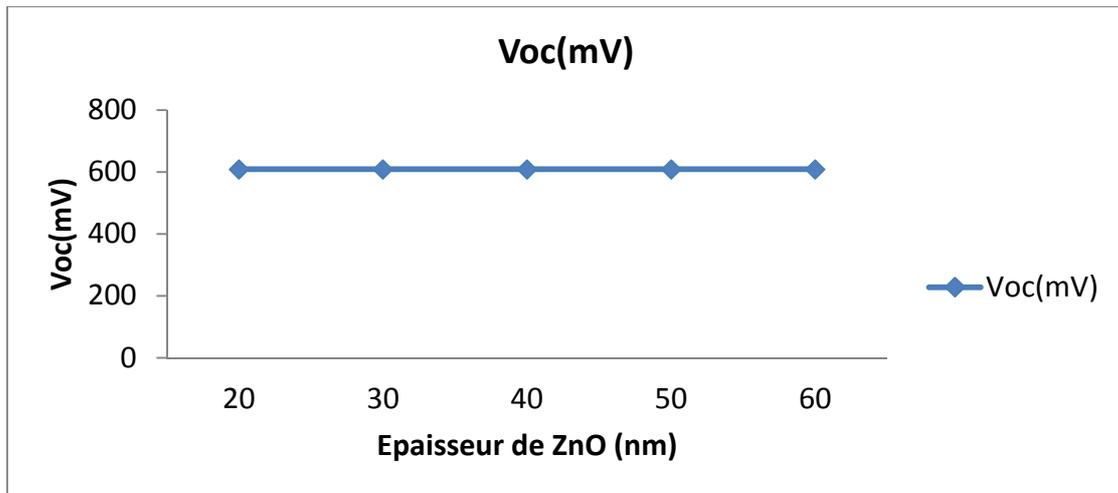


Figure (IV.1) : Variation de la tension de circuit ouvert de la cellule SnO₂/ZnO/Si en fonction de l'épaisseur de l'émetteur (ZnO)

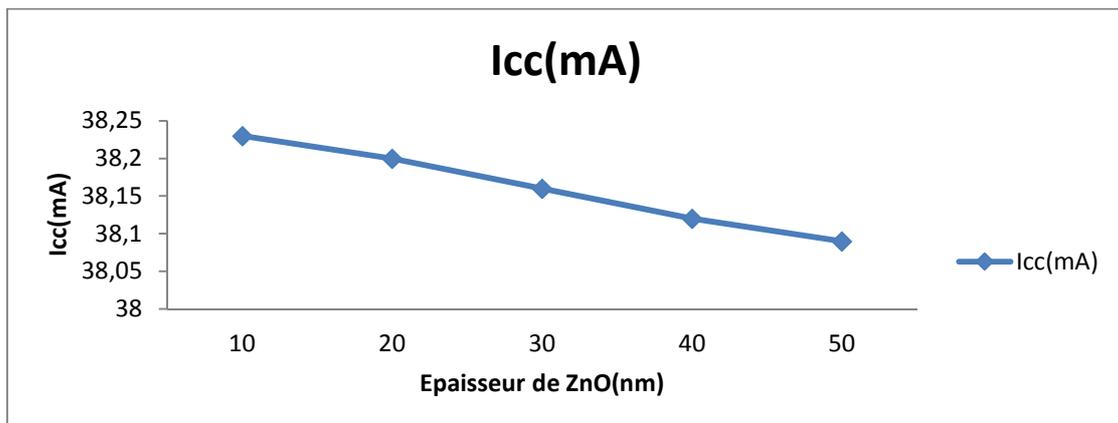


Figure (IV.2) : Variation de courant de court-circuit de la cellule SnO₂/ZnO/Si en fonction de l'épaisseur de l'émetteur (ZnO)

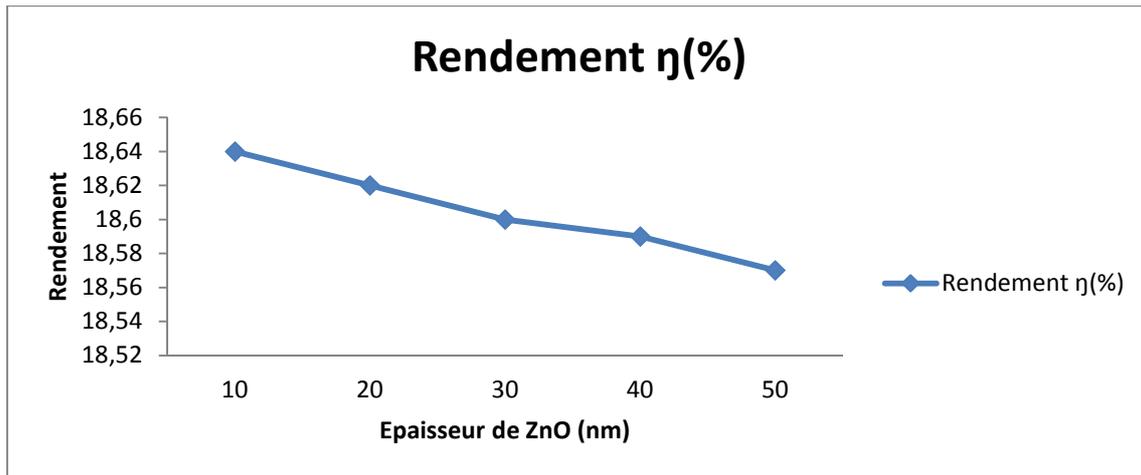


Figure (IV.3) : Variation de rendement de la cellule SnO₂/ZnO/Si en fonction de l'épaisseur de l'émetteur (ZnO)

Comme on peut le voir sur les figures (IV.1), (IV.2), (IV.3), l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur entraîne la décroissance de courant de court-circuit et par suite le rendement. L'explication de ce résultat est que la couche d'émetteur doit faire passer toute l'intensité de la lumière qu'elle reçoit à la base ce qui empêche ce passage lorsqu'elle sera épaisse.

IV.3. Influence de dopage de l'émetteur (ZnO) sur la cellule à multicouches SnO₂/ZnO/Si :

Le tableau (IV.3) montre l'effet de l'augmentation de dopage de l'émetteur sur les caractéristiques de la cellule à multicouches SnO₂/ZnO/Si :

Dopage cm ⁻³	Voc(mV)	Icc(mA)	Rendement η (%)
1 ^E 15	608,6	39,14	19,08
1 ^E 16	608,6	38,5	18,77
1 ^E 17	608,6	38,28	18,66
1 ^E 18	608,6	38,2	18,63
1 ^E 19	608,6	38,16	18,6

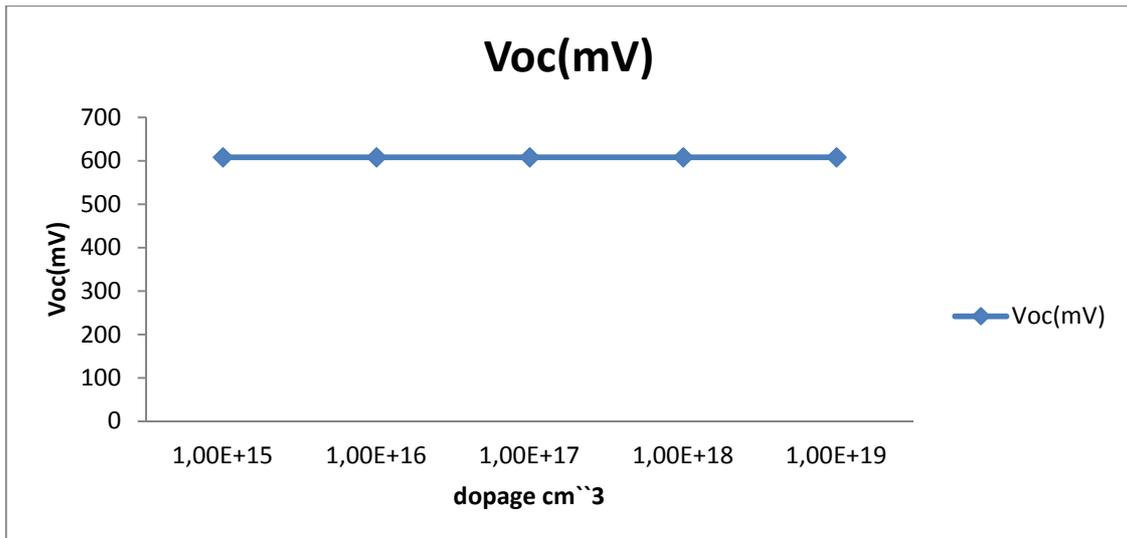


Figure (IV.4) : Variation de la tension de circuit ouvert de la cellule $\text{SnO}_2/\text{ZnO}/\text{Si}$ en fonction de dopage de l'émetteur (ZnO)

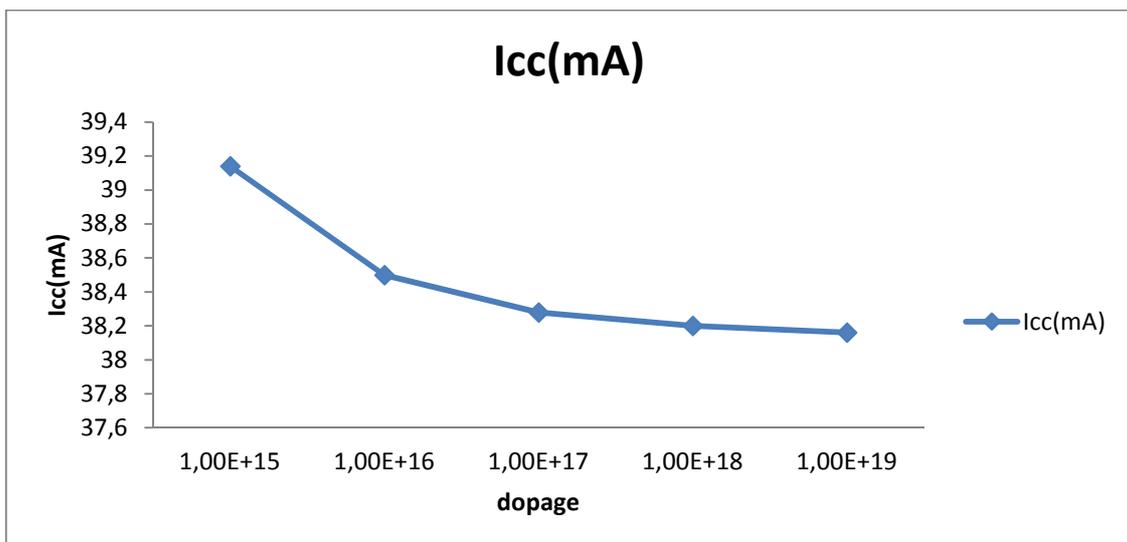


Figure (IV.5) : Variation de courant de court-circuit de la cellule $\text{SnO}_2/\text{ZnO}/\text{Si}$ en fonction de dopage de l'émetteur (ZnO)

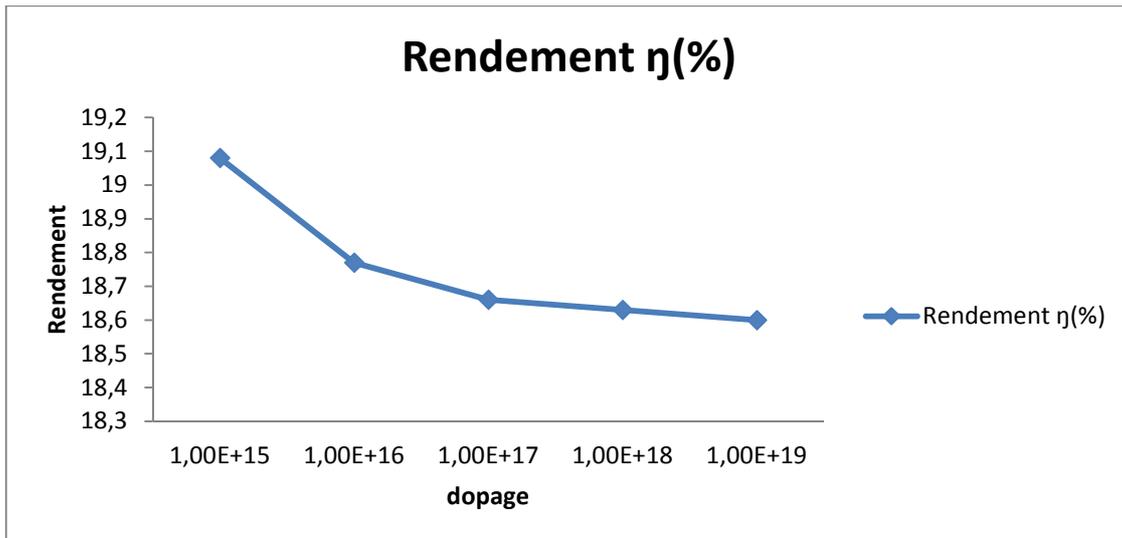


Figure (IV.6) : Variation rendement de la cellule SnO₂/ZnO/Si en fonction de dopage de l'émetteur(ZnO)

D'après les figures (IV.4), (IV.5), (IV.6), l'élévation du dopage de l'émetteur entraîne une diminution du courant de court-circuit et par conséquent du rendement alors que la tension de circuit-ouvert reste stable à cause de la décroissance de la barrière de potentiel et faisant diminuer la zone de charge d'espace ce qui entraîne la décroissance du champ séparateur.

IV.4. Influence de l'épaisseur de silicium sur la cellule à multicouches SnO₂/ZnO/Si :

Le tableau (IV.4) montre l'effet de l'augmentation de l'épaisseur de silicium sur les caractéristiques de la cellule à multicouches SnO₂/ZnO/Si :

Epaisseur de Si (μm)	Voc(mV)	Icc(mA)	Rendement η(%)
100	574,2	34,49	16,23
200	593	36,69	17,71
300	603,9	37,78	18,38
350	608,6	38,16	18,6
400	611,7	38,48	18,79

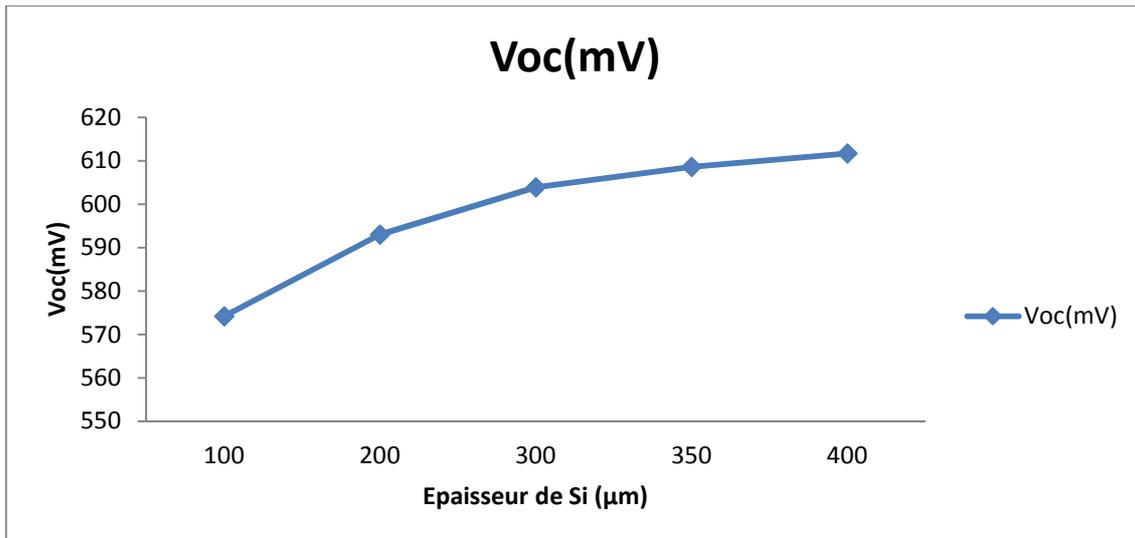


Figure (IV.7) : Variation de la tension de circuit ouvert de la cellule SnO₂/ZnO/Si en fonction de l'épaisseur de silicium (Si).

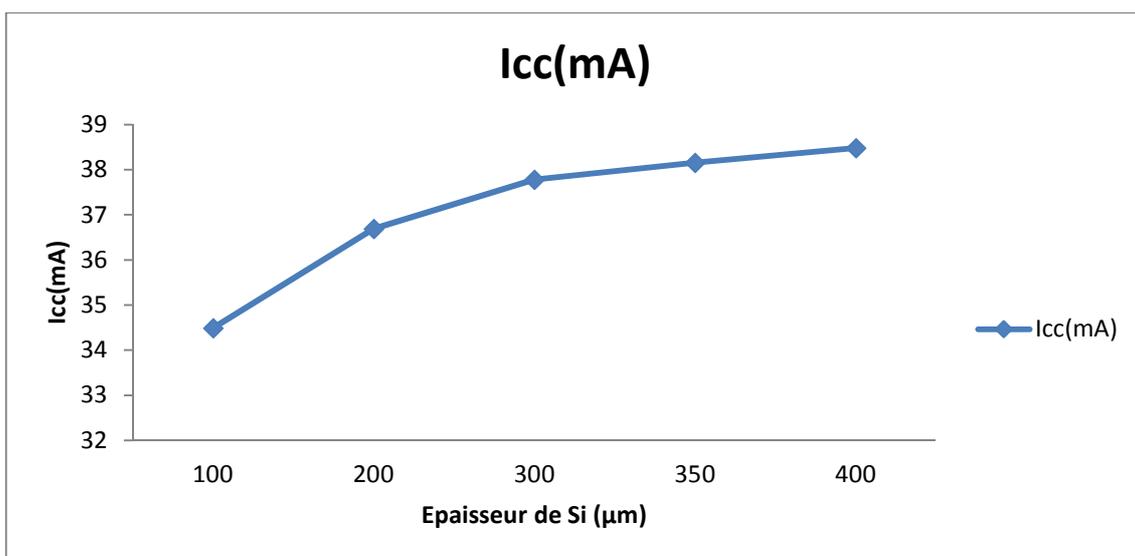


Figure (IV.8) : Variation de courant de court-circuit de la cellule SnO₂/ZnO/Si en fonction de l'épaisseur de silicium (Si)

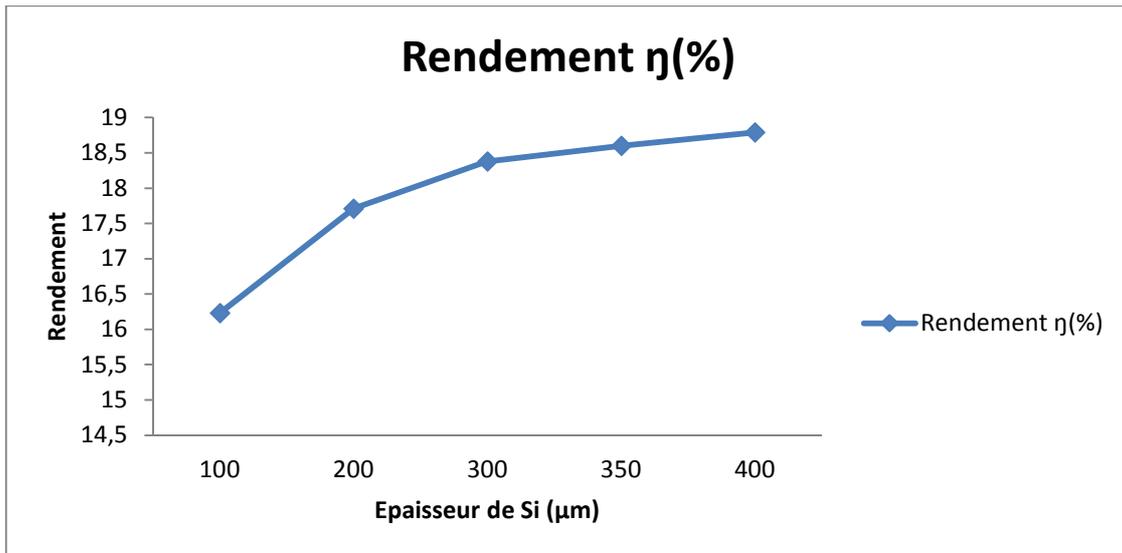


Figure (IV.9) : Variation de rendement de la cellule SnO₂/ZnO/Si en fonction de l'épaisseur de silicium (Si).

Les figures (IV.7), (IV.8), (IV.9), confirment l'augmentation de courant de court circuit avec l'augmentation de l'épaisseur de silicium. Cette augmentation liée à l'augmentation du nombre de paires électrons-trous en fonction de l'épaisseur de silicium, influençant ainsi positivement sur l'intensité du courant du court-circuit, et l'augmentation de la tension de circuit-ouvert et le rendement est dû à l'augmentation de courant de court-circuit.

IV.5. Influence de dopage de silicium sur la cellule à multicouches SnO₂/ZnO/Si

Le tableau (IV.5) montre l'effet de l'augmentation de dopage de silicium sur les caractéristiques de la cellule à multicouches SnO₂/ZnO/Si :

Dopage cm ⁻³	Voc(mV)	Icc(mA)	Rendement η (%)
1 ^E 15	543	37,48	14,7
5 ^E 15	589,8	37,67	18,11
1 ^E 16	608,6	38,16	18,6
5 ^E 16	652,3	40,27	21,87
1 ^E 17	671,1	41,62	23,44

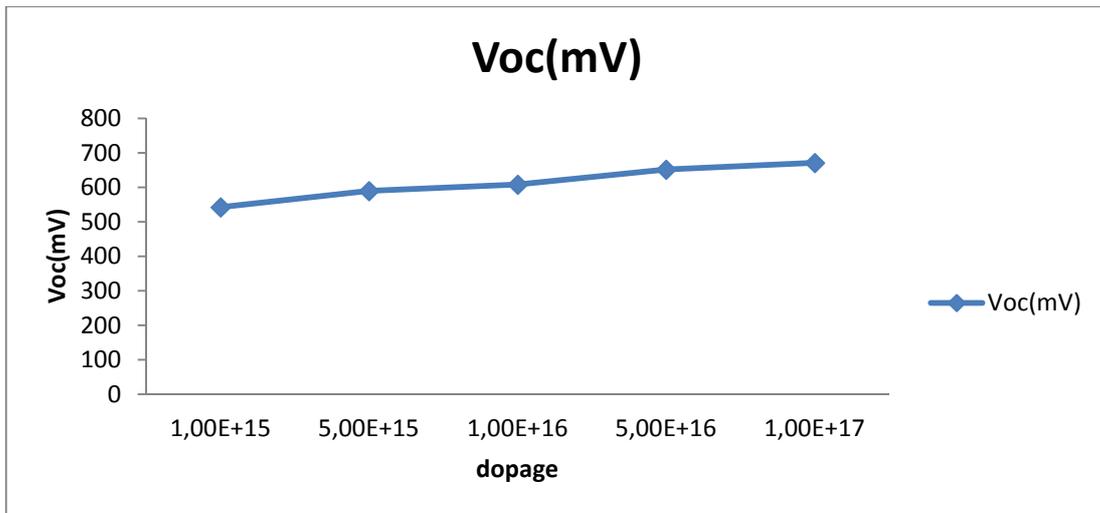


Figure (IV.10) : Variation de la tension de circuit ouvert de la cellule SnO₂/ZnO/Si en fonction de dopage de silicium (Si).

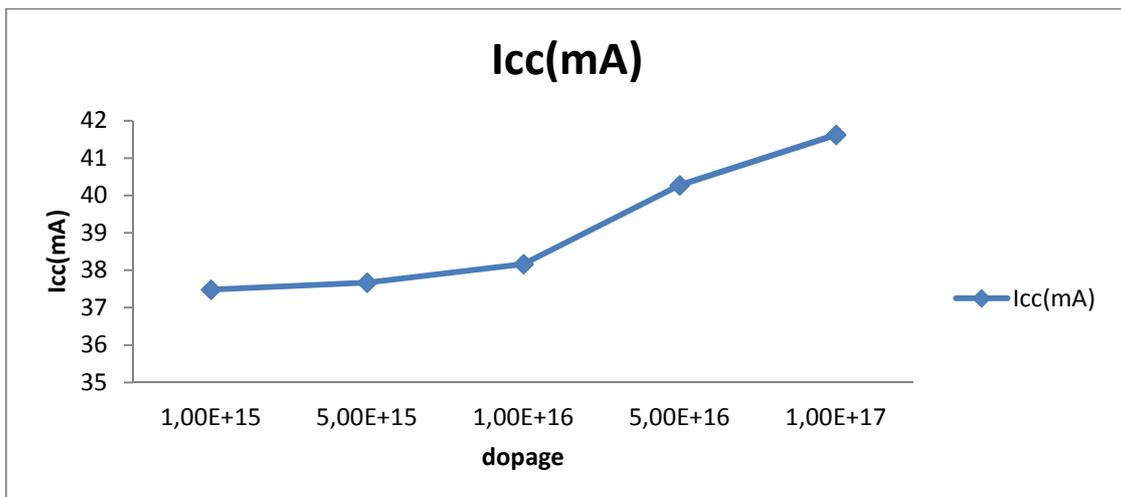


Figure (IV.11) : Variation de courant de court-circuit de la cellule SnO₂/ZnO/Si en fonction de dopage de silicium (Si).

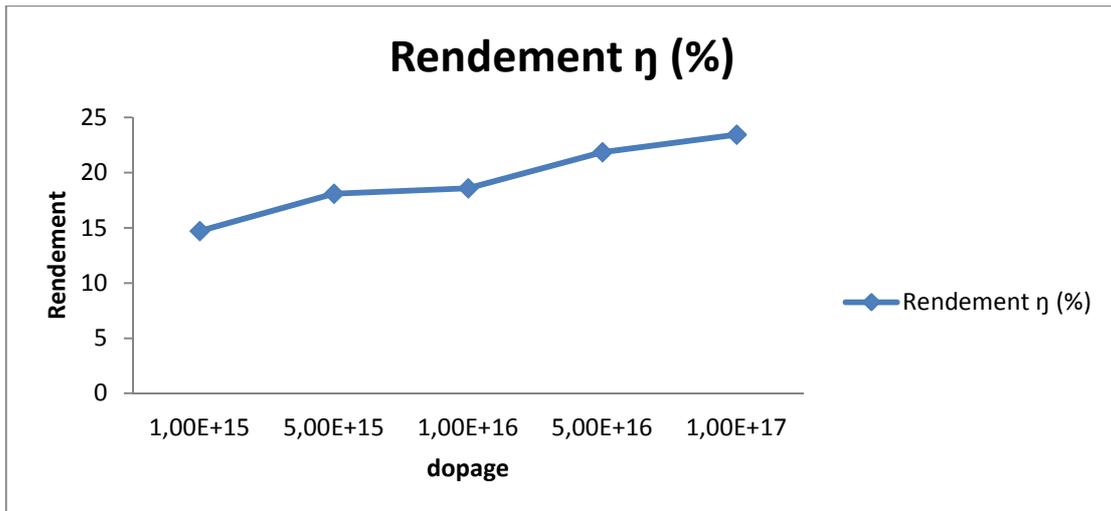


Figure (IV.12) : Variation rendement de la cellule SnO₂/ZnO/Si en fonction de dopage de silicium (Si).

D'après les figures (IV.10), (IV.11), (IV.12) lorsqu'on augmente le dopage de silicium, la tension de circuit ouvert et le courant de court circuit augmente et par conséquent le rendement croit grâce à l'accroissement de la conductivité du substrat (silicium).

Conclusion générale

Au cours de ce travail, nous avons étudié l'optimisation de la structure d'une cellule solaire de type Métal-semi conducteur (M-S) notamment l'effet de la couche d'oxyde transparent conducteur (TCO) sur l'hétérojonction.

Dans ce type de cellule les TCO (oxydes transparents conducteurs) utilisés présentent un bon compromis entre transparence optique et bonne conductivité électrique. L'oxyde d'étain SnO_2 et l'oxyde de zinc ZnO ont été utilisés comme électrodes transparentes dans les cellules solaires 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 de SnO_2 et ZnO est compris entre 1,9 et 2,0, ce qui permet leur utilisation comme couche antireflet. De plus l'oxyde d'étain et l'oxyde de zinc présentent l'avantage d'être très résistants à tous les agents chimiques utilisés dans l'industrie photovoltaïque. Toutes ces caractéristiques font de SnO_2 et du ZnO les TCO privilégiés comme contacts électriques transparents pour les cellules solaires de type M-S.

Pour optimiser le rendement de la cellule solaire, nous avons simulé une cellule à multicouches $\text{SnO}_2/\text{ZnO}/\text{Si}$ avec le logiciel AFORS-HET (1D). Les résultats obtenus ont montré que la cellule présente un bon rendement qui est de 18,60.

Bibliographie :

- [1] MOHAMMED-KRARROUBI ASMAA « *Structure Oxyde/Métal/Oxyde destinée à remplacer les oxydes transparents conducteurs classiques dans les cellules solaires par effet photovoltaïque* » présenté par MEMOIRE soutenu en 2012.
- [2] <http://scienceetudiant.blogspot.com/2015/01/les-semi-conducteurs-episode-1.html> vu le 24/05/2017.
- [3] http://scienceetudiant.blogspot.com/2015/01/les-semi-conducteur-episode-2_jonction.html vu le 25/05/2017.
- [4] SALLAHEDDINE BENSALAM « *Effet de la température sur les paramètres caractéristique des cellules solaires* » MEMOIRE soutenu le 06/01/2011.
- [5] FAYSSAL YNINEB « *contribution a l'élaboration de couches minces d'oxydes transparents conducteurs 'TCO'* » MEMOIRE soutenu le 16/05/2010.
- [6] Kahina LAGHA-MENOUER « *Etudes et réalisation d'une cellule solaire multicouche du type Si-SiO₂-SnO₂-ZnO* » thèse soutenue le 27 juin 2011.
- [7] GOUDJIL TAOUS « *Etude de l'oxyde de titane en couches minces en hétérojonction avec le silicium, application photovoltaïque* » MEMOIRE soutenu en 2013.
- [8] BOUSSOUM OUIZA « *Etude de l'effet d'une couche mince de TiO₂ sur les paramètres d'une cellule solaire au silicium* » soutenue le 26 juin 2011.
- [9] SAAD REHMANE « *Elaboration et caractérisation de couches minces par Spray pyrolyse et pulvérisation Magnetron* » THESE soutenue le 18/12/2008.
- [10] JEROME GARNIER « *Elaboration de couches minces d'oxydes transparents et conducteurs par spray CVD assiste par radiation infrarouge pour applications photovoltaïques* » présenté par THESE soutenue le 02/12/2009.

Résumé :

Dans ce travail, nous avons utilisé la simulation numérique afin d'optimiser les paramètres des cellules solaires à hétérojonction du type oxyde transparent conducteur /silicium (TCO/Si)

Nous avons analysé l'influence de l'épaisseur, de l'énergie de gap, ainsi que de la réflexion de couche du TCO sur les performances des cellules solaires à l'aide de la simulation numérique avec AFORS-HE. Les résultats acquis en simulation montrent que ce type de cellule solaire peut avoir un rendement théorique de 18,6 lorsque les paramètres du TCO sont bien choisis.

Mot clés :

TCO, Hétérojonction, Cellule solaire, Rendement, Simulation, Photovoltaïque,
