

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

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté de Génie Electrique et Informatique
Département d'Electronique



Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Matériaux et Dispositifs Electroniques et Photovoltaïques

Présenté par

Ouafa MOUSSAOUI

Amar CHERTOUH

Thème

Etude et simulation des cellules solaires à hétérojonctions de type ITO/Si.

Mémoire soutenu publiquement le 21 /07/2016 devant le jury composé de :

SOMMAIRE

Introduction générale

Chapitre I : l'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO) propriété et application

1. Introduction
2. Généralités sur les oxydes transparents conducteurs(TCO)
 - 2.1. Définition d'un matériau (TCO)
 - 2.2. Critère de choix des (TCO)
3. L'ITO en couche mince
 - 3.1. Présentation de l'ITO
 - 3.2. Les propriétés électriques
 - 3.3. Les propriétés optiques
4. Technique d'élaboration des couches minces
 - 4.1. Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)
 - 4.2. Pulvérisation cathodique
 - 4.3. Sol gel
5. Les applications photovoltaïques des couches minces ITO
 - 5.1. Couche antireflet
 - 5.2. Electrode transparente
5. conclusion

Chapitre II : la cellule solaire à conversion photovoltaïques

1. Introduction
2. Le rayonnement solaire
3. L'effet photovoltaïque
4. cellule solaire
5. Principe de fonctionnement de la cellule solaire
6. Schéma électrique équivalent

7. Caractéristique courant tension
8. Paramètre électrique d'une cellule solaire
 - 8.1. Le courant de court circuit
 - 8.2. La tension en circuit ouvert
 - 8.3. Facteur de forme
 - 8.4. Rendement
9. conclusion

Chapitre III. Etude des cellules solaires à hétérojonction

1. Introduction
 2. Affinité électronique d'un semi-conducteurs et travail de sortie d'un métal
3. Etude de la structure métal /semi-conducteur
 - 3.1. Cas ou $\phi_m = \phi_s$
 - 3.2. Cas ou $\phi_m > \phi_s$
 - 3.2.1. Semi-conducteur de type N
 - 3.2.2. Semi-conducteur de type P
 - 3.3. Cas ou $\phi_m < \phi_s$
 - 3.3.1. Semi-conducteur de type N
 - 3.3.2. Semi-conducteur de type p
4. les cellules solaire a hétérojonction de type ITO/ p-Si
 - 4.1. Diagramme des bandes d'énergie
 - 4.2. Principe de fonctionnement
5. conclusion

Chapitre IV :Simulation des cellules solair à hétérojonction de type ITO/p-Si

1. Introduction
2. Présentation du logiciel de simulation AFORS-HET
3. la structure de cellule solaire simulée
4. Les paramètres de la simulation

5. résultat de simulation

5.1. Diagramme des bandes d'énergie

5.2. La caractéristique courant tension la cellule solaire ITO/p-Si

5.3. Les paramètres électriques de la cellule solaire ITO/p-Si simulée

5.4. Influence de l'épaisseur de substrat

5.5 Influence de la concentration du dopage du substrat

5.6. Influence de l'épaisseur de l'ITO

5.7. Influence de la température

6. Conclusion

Conclusion générale

Résumé

Les cellules solaires à hétérojonctions utilisant les semiconducteurs transparents (TCO) présentent aujourd'hui une évolution considérable avec de bons rendements de conversion et des processus de fabrication moins coûteux. Ces bons rendements peuvent être expliqués par la présence de la couche TCO qui joue un double rôle celui d'une couche antireflet vu sa forte transparence et émetteur grâce à sa bonne conductivité.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur l'étude et simulation des cellules solaires à hétérojonctions de type ITO/Si dans le but d'améliorer leurs performances photovoltaïques. Nous avons analysé les effets de plusieurs paramètres structuraux à savoir l'épaisseur et le dopage du substrat, épaisseur de la couche d'ITO ainsi que la température sur les paramètres électriques des cellules solaires tels que la tension du circuit ouvert V_{co} , le courant court-circuit I_{cc} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η .

Selon nos résultats de simulation, l'optimisation des paramètres structuraux des cellules solaires ITO/Si permet d'atteindre un rendement de conversion de 15 % démontrant ainsi les potentialités importantes de ces cellules solaires en terme d'amélioration du rendement de conversion tout en réduisant les coûts de fabrication.

Mots clés : ITO, cellule solaire, hétérojonction, silicium, AFORS-HET, rendement.

Introduction générale

La production de l'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que ceux des pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. Cette consommation donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le recours au développement des énergies non polluantes est alors apparu comme l'ultime solution face à ce problème.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique et la biomasse sont les solutions idéales. Celle issue du soleil répond parfaitement aux critères à la fois d'abondance à la surface terrestre et de la régénération infinie à notre échelle. En Algérie, l'énergie solaire offre des potentialités très importantes grâce à la grande superficie dont elle dispose et un très fort ensoleillement. L'électricité photovoltaïque est obtenue par la conversion du rayonnement solaire en électricité aux moyens de cellules solaires.

L'industrie photovoltaïque doit répondre au critère rapport qualité/prix, qui peut être viable en introduisant des matériaux permettant d'améliorer le rendement de la conversion tout en réduisant les coûts de production.

Les cellules solaires à hétérojonctions est une technologie photovoltaïque économiquement viable [1]. Ces cellules utilisent les oxydes transparents conducteurs (TCO) comme électrodes transparentes et conductrices grâce à leurs doubles propriétés : conductivité électrique et transparence dans le visible [2]. Parmi ces TCO, l'oxyde d'indium dopé étain (ITO) est le plus utilisé à l'échelle industrielle.

La simulation numérique est nécessaire avant tout projet de réalisation de cellules solaires en raison du fait qu'elle permet d'optimiser les conditions et les paramètres structuraux conduisant aux meilleures performances de ses dispositifs. De plus, elle permet une meilleure compréhension des mécanismes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules solaires.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur l'étude et simulation des cellules solaires à hétérojonctions de type ITO/Si dans le but d'améliorer leurs performances photovoltaïques.

Pour ce faire, ce manuscrit se divise en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à l'étude de l'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO) en décrivant ses propriétés optiques et électriques. Aussi, nous citons les techniques d'élaboration des couches minces d'ITO ainsi que ses différentes applications dans le domaine photovoltaïque.

Le deuxième chapitre présente les notions de base relatives à la cellule solaire à homojonction : ses constituants, son principe de fonctionnement, ainsi que ses paramètres photovoltaïques.

Le troisième chapitre se focalise sur l'étude des cellules solaires à hétérojonctions de type TCO/Si. Nous avons décrit la physique de la structure métal/semiconducteur. Nous présentons ensuite l'hétérojonction ITO-Si en effectuant des calculs pour montrer les paramètres nécessaires à la formation de la barrière de potentiel entre l'ITO et le silicium.

Le quatrième chapitre est partagé en deux parties : la première partie est consacrée à la simulation de la cellule solaire de type ITO/Si. Nous avons alors décrit le logiciel employé AFORS-HET et présenté la structure simulée ainsi que les paramètres de simulation.

Dans la deuxième partie, nous présentons les résultats de simulation des cellules ITO/Si obtenus. Nous avons varié plusieurs paramètres structuraux tels que : l'épaisseur du substrat de silicium, dopage du silicium, épaisseur de la couche ITO afin d'étudier leurs effets sur les paramètres électriques des cellules solaires. L'impact de la température sur les performances de ces cellules est également étudié. L'analyse et l'interprétation de ces résultats de simulation nous permettront de tirer des conclusions concernant les paramètres optimaux conduisant aux meilleures performances des cellules solaires ITO/Si.

Nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale et quelques perspectives pour des travaux futurs dans ce domaine.

1. Introduction

L'oxyde d'indium dopé à l'étain ITO (Indium Tin Oxide en anglais), est un oxyde très recherché en raison de ces caractéristiques exceptionnelles qui conjuguent une bonne conductivité électrique et une forte transmission dans le domaine du visible [3].

Dans ce chapitre nous présentons le matériau **ITO**, ses propriétés optiques et électriques ainsi ses applications dans le domaine photovoltaïque.

2. Généralités sur les Oxydes Transparents conducteurs

2.1 Définition d'un matériau TCO

Les oxydes transparents conducteurs (Transparent Conductive Oxide, TCO) sont des semiconducteurs dégénérés à large gap (3 à 4 eV)[4]. Leur intérêt réside dans leur double propriété conductivité électrique et transmission optique dans le domaine spectral du visible.

Les TCO les plus connus et utilisés (figure 1.1) sont des oxydes dégénérés de type n consistant en des oxydes métalliques telsque : l'oxyde d'indium (In_2O_3), l'oxyde de zinc (ZnO), l'oxyde d'étain (SnO_2), et leur dérivés par exemple : L'oxyde d'indium dopé à l'étain ($\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$ ou ITO), l'oxyde de zinc dopé aluminium ($\text{ZnO} : \text{Al}$) ou l'oxyde d'étain dopé fluor ($\text{SnO}_2 : \text{F}$)[3].

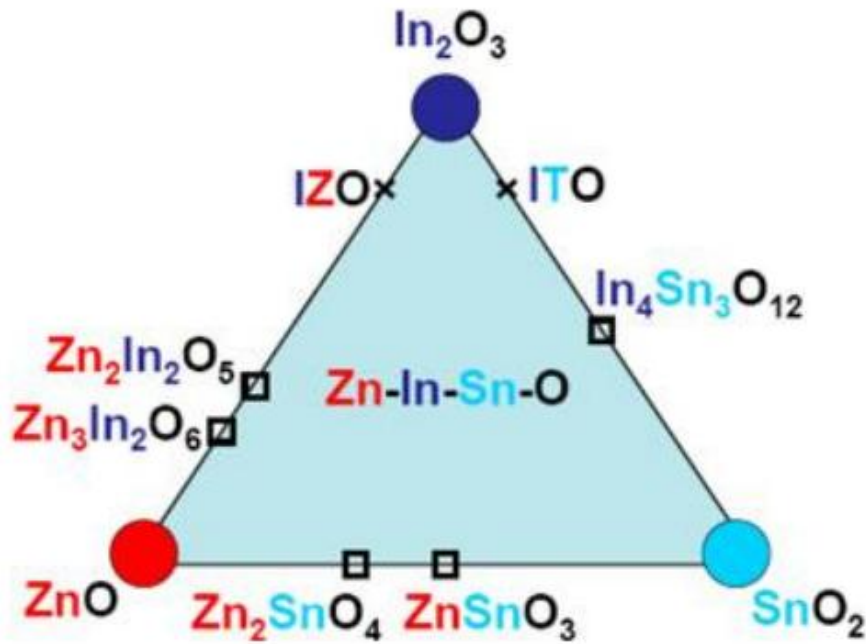


Figure 1.1. Les principaux TCO utilisés comme électrodes métalliques [3].

2.2 Critères de choix des TCO

On retrouve les TCO dans plusieurs applications qui cherchent une combinaison entre la conductivité électrique et la transparence optique. Parmi ces applications :

- Les écrans plats ;
- Les écrans à contrôle tactile ;
- Les cellules photovoltaïques.

Pour pouvoir comparer entre la qualité de différents TCO, on utilise la figure de mérite (tableau 1) qui est définie comme le rapport de la conductivité électrique sur l'absorption optique du TCO dans le visible, elle est donnée par l'équation suivante [6]:

$$\frac{\sigma}{\alpha} = - \frac{1}{R_{sq} \ln(T + R)} \quad (1)$$

où σ : conductivité ;

α : coefficient d'absorption du TCO dans le visible ;

R_{sq} : résistance par carré ;

T : transmission optique du TCO ;

R : réflectivité optique du TCO.

Matériaux	Résistance par carré	Absorbance dans le visible	La figure de mérite
ZnO:F	5	0.03	7
Cd ₂ SnO ₄	7.2	0.02	7
ZnO:AL	3,8	0,05	5
In ₂ O ₃ :Sn	6	0,04	4
SnO ₂ :F	8	0,04	3
ZnO:Ga	3	0,12	3
ZnO:B	8	0.06	2
SnO ₂ :Sb	20	0.12	0.4
ZnO:In	20	0.2	0.2

Tableau 1 :Figure de mérite $\frac{\sigma}{\alpha}$ pour quelques TCO[7].

La diversité des TCO et de leurs applications correspondent au fait que le critère de choix d'un TCO ne dépend pas uniquement de la figure de mérite, d'autres paramètres tels que : les stabilités thermique, chimique et mécanique ou encore la toxicité, le faible coût de fabrication les contraintes

de mise en œuvre ou également le travail de sortie (fondamental pour ce qui concerne l'injection des porteurs) jouent un rôle clé dans le choix des TCO.

3. l'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO) en couche mince

3.1 Présentation de l'ITO

L'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO) est l'un des oxydes transparents conducteurs (TCO) les plus utilisés dans les applications technologiques en raison de ses propriétés optiques et électriques : la transparence élevée dans le visible, la bonne conductivité électrique, la bonne résistance mécanique et en plus de la stabilité chimique.

L'ITO se forme à partir de l'oxyde d'indium (In_2O_3) et de quelques pourcentages atomiques en étain (Sn), en général 10%, qui vont se substituer aux atomes d'indium dans le cristal.

Si la concentration d'étain augmente, la conductivité électrique augmente mais la transparence sera dégradée [3].

3.2 Les propriétés électriques

L'ITO est un semiconducteur de type n fortement dégénéré. Le niveau de Fermi est situé au-dessous de la bande de conduction, à gap direct variant entre 3.5 à 4.5 eV [8] (selon le dopage : plus le dopage d'étain est élevé plus le gap est petit). L'ITO étant dégénéré, son comportement est quasi métallique.

L'ITO est caractérisé par une faible résistivité électrique $\rho = 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ [4]. La conductivité élevée de l'ITO est due à la présence des lacunes d'oxygène dans la structure d'oxyde d'indium. Le deuxième réseau de la conductivité est associé à des atomes d'étain. La concentration maximale des porteurs de charge est de l'ordre 10^{21} cm^{-3} [7].

3.3 Les propriétés optiques

L'ITO est un matériau transparent dans le domaine du visible, la valeur de l'indice de réfraction se situe entre 1.66 et 2.88 [11]. Il est caractérisé par une large bande interdite, directe, qui permet d'émettre dans les domaines du visible et ultraviolet.

En couche mince de l'ITO, on peut distinguer trois zones, selon son spectre de la réflexion et de la transmission [11]:

- L'ultraviolet, une absorption élevée ;
- Le visible, une bonne transmission dans le visible supérieur à 85%, alors une faible absorption ;
- L'infrarouge, une transmission très faible et une réflexion importante.

La courbe suivante (figure 1.2) résume les zones de transmission :

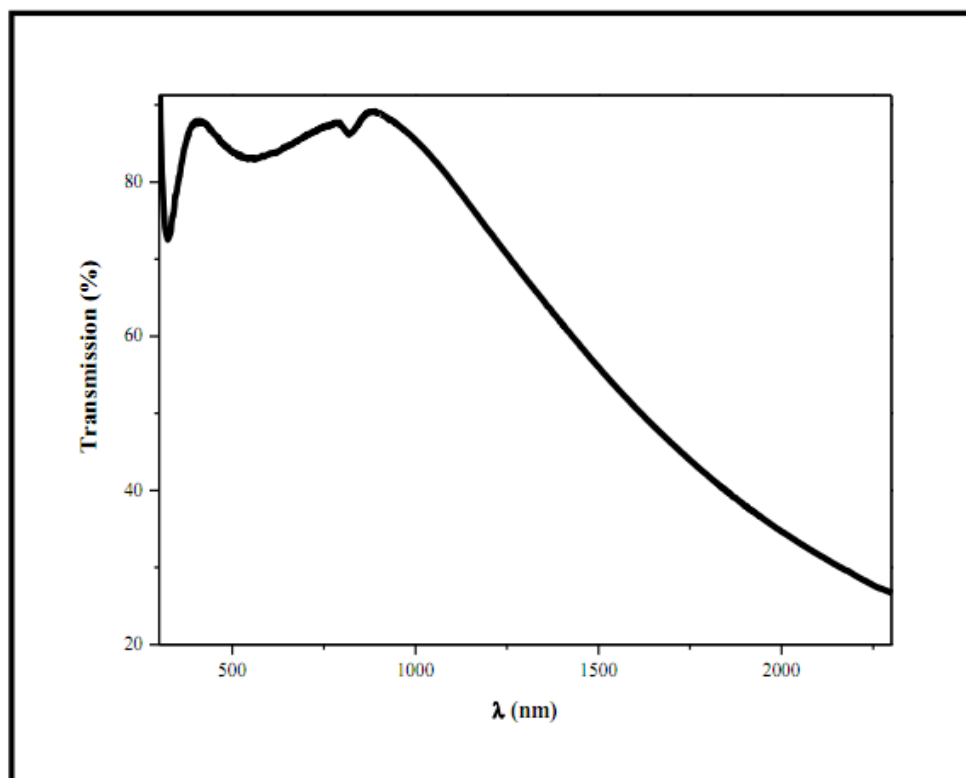


Figure 1.2. Transmission optique des films minces de l'ITO [12].

4. Techniques d'élaboration des couches minces ITO :

4.1 Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

La méthode chimique de dépôt en phase vapeur CVD, est l'une des techniques les plus utilisées pour le dépôt de couches minces métalliques, elle consiste à mettre en réaction les

précurseurs en phase vapeur, le mélange gazeux est dirigé vers le substrat à une température élevée, comprise entre 500° C et 2000°C.[3].

Cette synthèse s'effectue directement au contact du substrat puis de la couche en cours de croissance. Plusieurs paramètres influent sur l'uniformité du dépôt.

4.2 Pulvérisation cathodique

La technique de pulvérisation cathodique est utilisée pour le dépôt de tous les matériaux soit conducteurs, semiconducteurs ou isolants (figure 1.3). Dans cette technique on peut utiliser une cible, (pulvérisation mono-cible), ou des cibles (pulvérisation multi-cible) qui jouent le rôle de la cathode qui contient le matériau ou les composés à déposer.

Une différence de potentiel est appliquée entre les électrodes, ce qui provoque l'ionisation du gaz inerte, généralement l'argon. Quelques électrons toujours présents vont être accélérés et vont rentrer en collision avec les atomes d'argon et donc des ions Ar^+ et des électrons secondaires sont créés. Ces électrons secondaires vont subir des chocs avec d'autres atomes d'argon, créant de nouveaux ions et des électrons qui créent ainsi un plasma. Le dépôt est obtenu par condensation d'atomes provenant de la cible, créés par bombardement de celle-ci par les ions de plasma accélérés du fait de la décharge électrique. L'éjection d'atomes de la cible est un effet purement mécanique dû au choc des ions sur le matériau que l'on veut déposer. Les ions argon sont les seuls qui ont une énergie cinétique suffisante, ils vont pouvoir arracher et pulvériser des atomes ou des particules de la cible. Les atomes pulvérisés subissent des collisions avec les particules du plasma et donc sont diffusés dans toutes les directions avant de venir se déposer sur le substrat à recouvrir placée en face de la cible.. [12].

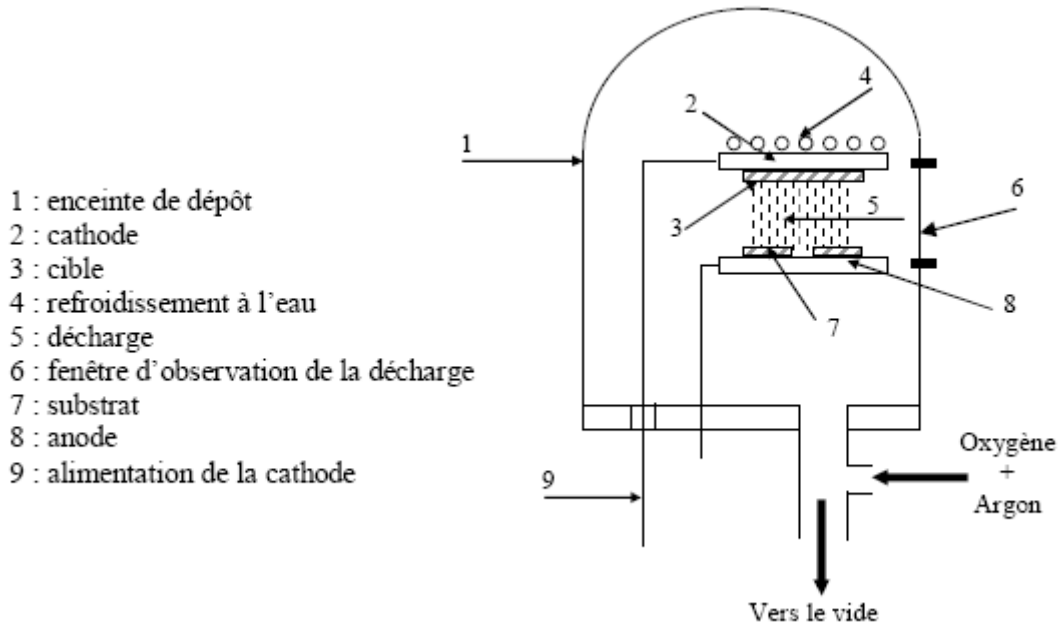


Figure1.3 : représentation schématique de la pulvérisation cathodique[4].

4.3 Sol gel

C'est une méthode chimique en phase liquide qui consiste à réaliser une solution stable appelé sol. La préparation de l'ITO par la méthode sol-gel est assurée par une solution d'indium In et d'étain Sn dans une solution alcoolique. La solution d'indium est obtenue par la dissolution du chlorure d'indium InCl_3 dans l'acétylène acétone en le mélangeant à une température de 80°C pendant quelques heures. Une masse de chlorure d'étain, est distillée dans l'éthanol absolu et chauffée à 80°C jusqu'à l'obtention d'une poudre de Sn après quatre heures [9]. Dans un agitateur (centrifugeuse), on mélange la solution In_2O_3 obtenue et la poudre Sn jusqu'à l'obtention d'une solution stable (sol). Les substrats sont plongés dans le sol, et par un procédé de spin-coating le sol est étalé sur le substrat tournant à une certaine vitesse, l'excès du liquide est évacué par le force centrifuge. Le dépôt est ensuite séché puis recuit pour obtenir un dépôt cristallisé.

Le cycle (tirage-séchage-recuit) est très important pour l'obtention des films ITO multicouches, applicable industriellement, avec de bonnes propriétés optoélectroniques qui dépendent étroitement du nombre de couches et de l'épaisseur [4].

5. Les applications photovoltaïques des couches minces d'ITO

5.1 Couches antireflet

Les pertes relatives aux photons limitent le rendement d'une cellule solaire. Ces pertes sont dues à la mauvaise absorption des matériaux, la réflexion due aux matériaux qui possèdent un indice de réfraction élevé. Dans le cas d'une cellule solaire au silicium, 35% de flux incident est réfléchi[15], ce qui présente des pertes de photons affectant son rendement. Afin de réduire ces pertes et améliorer le rendement des cellules solaires, l'ITO est utilisé comme couche antireflet (figure 1.4).

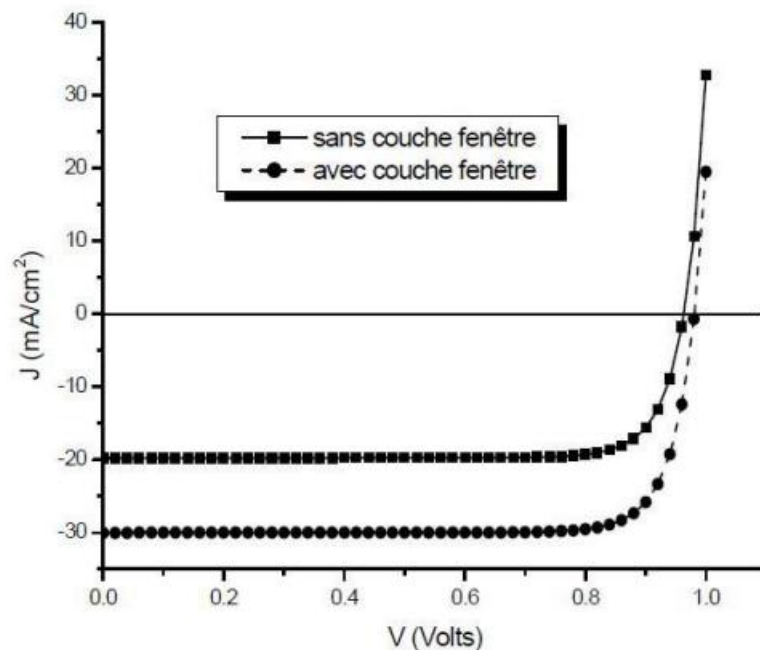


Figure 1.4. Effet de la couche antireflet sur la cellule photovoltaïque[9].

5.2 Electrode transparente

Les TCO en couches minces sont utilisés comme électrodes transparentes pour la collecte des porteurs de charge en laissant passer la lumière solaire. Ce type d'oxydes doivent nécessairement avoir une transmission optique élevée plus de 80% dans la gamme de visible et une faible résistivité de l'ordre $10^{-3} \Omega \text{ cm}$. De plus, ces TCO doivent avoir une concentration de porteurs de charge libres qui doit être de l'ordre de 10^{20} cm^{-3} .

Les couches minces d'ITO avec leurs propriétés optiques et électriques étudiées dans ce chapitre indiquent qu'elles peuvent être utilisées comme électrodes transparentes et conductrices dans les cellules solaires en couches minces.

6. Conclusion

Les oxydes transparents conducteurs (TCO) sont des matériaux remarquables dans plusieurs domaines, comme le photovoltaïque, grâce à leur transmittance élevée combinée à une bonne conductivité électrique.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales propriétés de l'ITO qui sont à l'origine de sa prédominance dans plusieurs applications notamment photovoltaïques, parmi ces applications des hétérojonctions réalisées avec ce matériau telles que les structures ITO/Si feront l'objet du chapitre 3.

1. Introduction

Le soleil est à l'origine de la vie sur la terre, il la perpétue par son apport incessant d'énergie; cette énergie est vraiment considérable. Elle nous arrive sous forme d'un rayonnement solaire à travers l'espace et peut être utilisée pour éclairer, nous réchauffer et produire de l'électricité aux moyens de cellules solaires.

Dans ce chapitre, nous introduisons en premier lieu le rayonnement solaire. Nous présentons en second lieu les cellules solaires en incluant quelques notions de base sur leurs structures, principe de fonctionnement ainsi que leurs caractéristiques électriques qui sont nécessaires pour les chapitres suivants.

2. Le rayonnement solaire

En plus des rayons cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées, le Soleil émet des ondes électromagnétiques variées allant des ondes courtes qui comprennent les rayons gamma, les rayons X, les ultraviolets C (UV-C), aux ondes longues qui incluent les ultraviolets B (UV-B), les ultraviolets A (UV-A), la lumière visible, les infrarouges (IR), les micro-ondes et les ondes radio.

L'émission d'ondes électromagnétiques par le Soleil est bien modélisée par un corps noir à 5800 Kelvin, donc par la loi de Planck, qui stipule que le rayonnement se propage à la vitesse de la lumière C , il lui faut donc, en moyenne 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère[16].

La théorie « corpusculaire » de Max Planck prévoit que tout rayonnement de fréquence ν peut être considéré comme un flux de photons dont l'énergie élémentaire est directement proportionnelle à cette fréquence :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

Avec :

h : Constante de Planck.

ν : La fréquence.

λ : La longueur d'onde.

C : La vitesse de la lumière ($C = 3.10^8$ m/s).

Le pic d'émission est dans le jaune ($\lambda=570$ nm), et la répartition du rayonnement est à peu près pour moitié dans la lumière visible, pour moitié dans l'infrarouge, avec 1% d'ultraviolets.

Une faible partie du rayonnement solaire parvient jusqu'à la surface de la Terre. L'énergie que ce rayonnement électromagnétique transmet à la terre provient essentiellement de l'émission d'ondes lumineuses qui se situent dans le visible (entre 0,4 et 0,75 micromètres de longueur d'onde environ) et proche et moyen infrarouge (entre 0,75 et 4 μm environ). Cette énergie, moyennée sur une année, sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairage de quelque 340 watts par mètre carré ou W/m^2 . Mais sur cette quantité d'éclairage qu'apporte le Soleil au système Terre-atmosphère, environ $100 \text{ W}/\text{m}^2$ sont réfléchis vers l'espace : seul le reste est absorbé, disons, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface terrestre. La notion d'Air Masse (AM) caractérisant le spectre solaire (figure II.1) en termes d'énergie émise, a été créée pour comparer les performances des cellules solaires. On utilise les notations suivantes :

- AM0 : correspond à une puissance de $1400 \text{ W}/\text{m}^2$ hors atmosphère pour les applications spatiales ;
- AM1 : quand le soleil est au zénith ;
- AM1.5 : correspond à une puissance normalisée à $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, quand le soleil est à 45° par rapport au zénith.

Ainsi, les conditions standard de mesures des cellules solaires utilisent le spectre AM1.5 correspondant à une puissance incidente de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ et une température de 25°C .

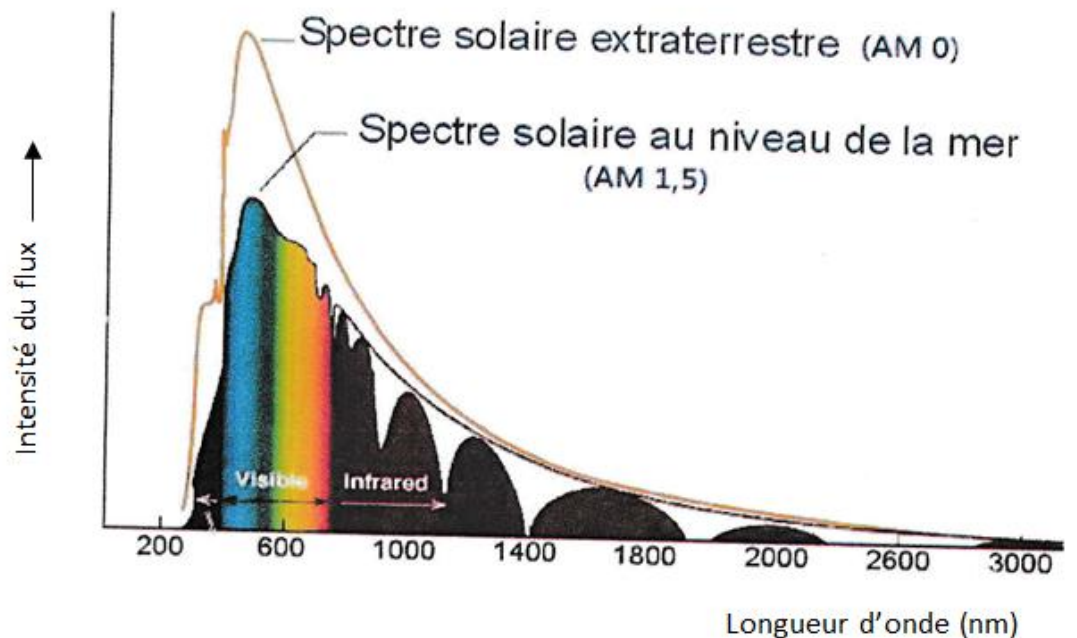


Figure II.1. Spectre solaire.

3. L'effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » est composé du mot de grec ancien "Photos" (lumière) et du nom du physicien italien Alessandro Volta, inventeur de la pile électrique, qui donna son nom au Volt (unité de mesure de la tension électrique).

L'effet photovoltaïque désigne la capacité qu'ont certains matériaux, à convertir l'énergie contenue dans le rayonnement solaire en électricité.

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés semiconducteurs qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Cet effet a été découvert en 1839 par le français Alexandre Edmond Becquerel.

Les "grains de lumière" ou les photons heurtent la surface du matériau semiconducteur disposé sur la cellule solaire. Ils transfèrent leur énergie aux électrons qui gravitent autour des atomes dont est formé le matériau. Il en résulte la création de paires "électron-trou" qui sont séparés par le champ électrique d'une jonction créée volontairement dans le semiconducteur. Autrement dit, l'effet photovoltaïque traduit l'apparition d'une différence de potentiel dans la jonction créée dans le semiconducteur suite à l'absorption des photons par le matériau constituant le dispositif.

La conversion photovoltaïque est la manière la plus propre de produire de l'électricité elle se fait sans bruit, sans partie mécanique et sans que des produits toxiques ne soient libérés.

4. La cellule solaire

La cellule solaire, élément unitaire d'un module photovoltaïque, est aussi l'élément actif dans lequel se produit l'effet photovoltaïque. Celui-ci permet au matériau de la cellule de capter l'énergie lumineuse (photons) et de la transformer en énergie électrique caractérisée par un déplacement de charges, positives et négatives.

La caractéristique commune à toutes les technologies photovoltaïques est la mise en présence dans le matériau de la cellule d'un donneur et d'un accepteur d'électrons pour permettre ce déplacement de charges. Une fois transféré dans un circuit électrique extérieur, celui-ci prend la forme d'un courant électrique continu.

De manière générale, les cellules photovoltaïques peuvent être vues comme un empilement de matériaux :

- La couche active ou l'absorbeur constitué d'une mise en contact d'un premier matériau semiconducteur accepteur d'électrons et d'un second matériau donneur d'électrons, l'un de type N, l'autre de type P, formant ainsi une jonction PN (figure II.2) ;
- Les contacts métalliques avant et arrière constituant les électrodes positive (+) et négative (-) chargées de collecter le courant généré;

- Des couches supplémentaires comme une couche antireflet ou une couche plus fortement dopée permettant d'améliorer les performances de la cellule : meilleure absorption de la lumière, meilleure diffusion des porteurs de charges dans le matériau... etc. Ainsi, ce qui différencie une technologie solaire d'une autre, c'est principalement la nature de l'absorbeur. De ses propriétés physico-chimiques dépendent les procédés de dépôt utilisés, la nature et les caractéristiques des autres composants de la cellule (antireflet, électrodes...) ainsi que son architecture globale : type de substrat, épaisseur, positionnement des électrodes...etc.

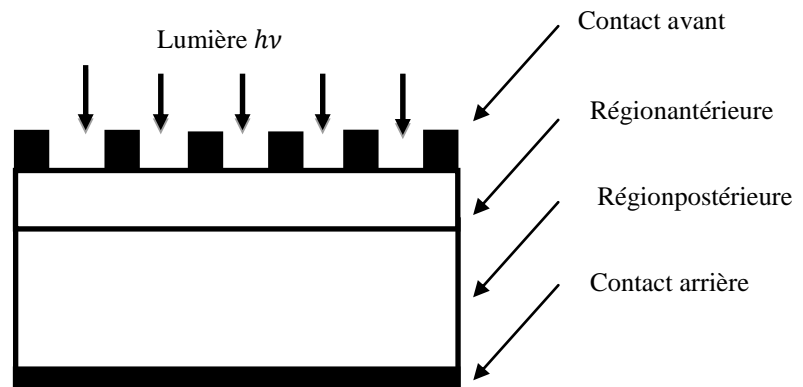


Figure II.2 : Schéma de la cellule solaire à homojonction PN.

5. Principe de fonctionnement de la cellule solaire

La cellule photovoltaïque classique biface en silicium est constituée d'une jonction P/N. Cette dernière est la juxtaposition de deux zones, l'une comportant un fort excès d'électrons libres : partie N, et l'autre comportant un fort défaut d'électrons libres (ou excès de trous), partie P. La jonction PN engendre un champ électrique dans la zone de charge d'espace, à l'interface des deux zones N et P. Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace (figure II.3). Ces porteurs ont un comportement différent suivant la région où ils sont générés :

- 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 photo-courant de diffusion.
- dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique (figure II.4) : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un photo-courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photo-courant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

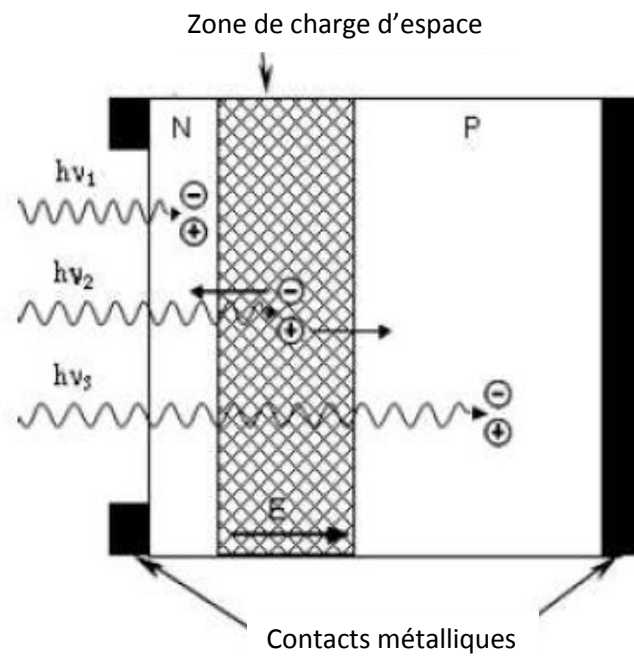


Figure II.3. Illustration des phénomènes de photogénération et de collecte de porteurs dans la cellule solaire à homojonction.

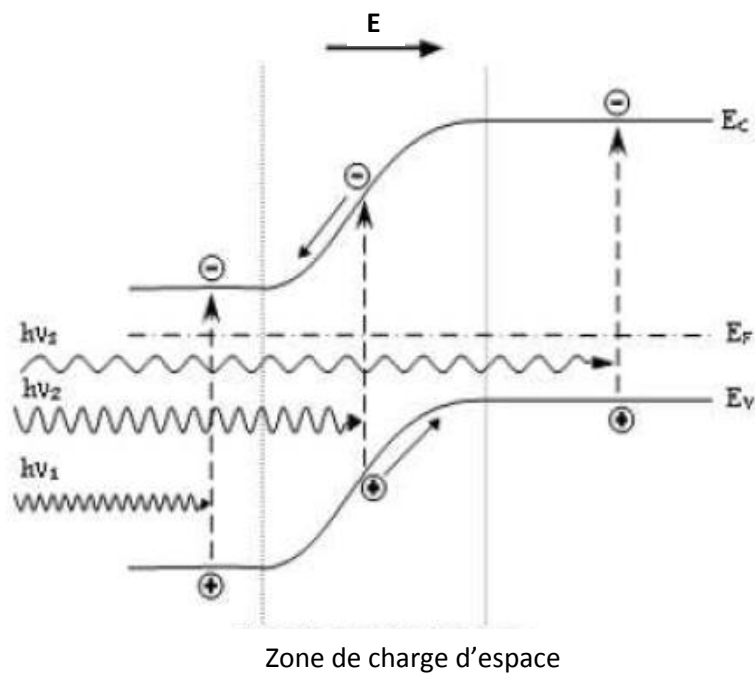


Figure II.4 : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.

6. Schéma électrique équivalent

Dans l'obscurité, une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, la diode est passante si la tension appliquée est supérieure à une tension de seuil. Le courant dans la diode suit l'équation :

$$I = I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (3)$$

I : Courant fourni par la cellule (en A) ;

V : Tension aux bornes de la cellule (en V) ;

I_s : Courant de saturation de la diode (en A), dépendant de la température ;

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb ;

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K ;

n : Facteur d'idéalité de la diode, $0 < n < 1$, dans le cas idéal $n = 1$.

T : Température effective de la cellule (en Kelvin).

Pour une structure Schottky, le courant de saturation suit la théorie d'émission thermoïonique et s'écrit:

$$I_s = A^* T^2 \exp\left(\frac{-\Delta E_{ms}}{kT}\right) \quad (4)$$

Où A^* est la constante de Richardson, et ΔE_{ms} la barrière de potentiel entre le métal et le SC. ΔE_{ms} est typique du matériau puisqu'il est relié à son affinité électronique et à son gap.

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque idéale avec éclaircissement comprend un générateur de courant qui modélise l'éclaircissement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN (figure II.5).

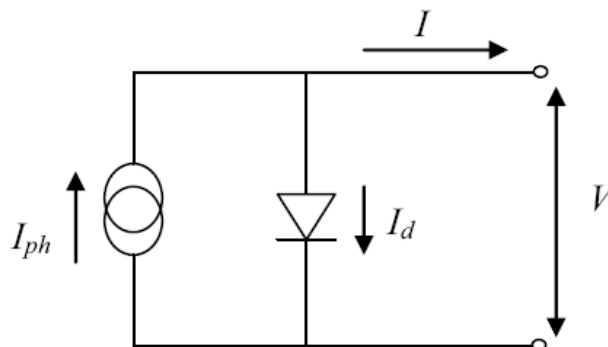


Figure II.5 : Schéma équivalent de la cellule solaire idéale.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (5)$$

En remplaçant (3) dans (6), on obtient :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (6)$$

avec

I_{ph} : courant photo-généré (en A).

Le schéma électrique équivalent dans le cas où la cellule solaire est réelle et sous éclairage est présenté sur la figure II.6. Il tient compte des résistances série R_s et parallèle R_{sh} (Rshunt).

Le courant est déduit du circuit électrique équivalent de la figure II.6 :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (7)$$

L'équation déterminant le courant pour une diode réelle est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{q(V + I.R_s)}{nkT}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \right) \quad (8)$$

Avec :

R_s : résistance série qui dépend de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact métal-semiconducteur ;

R_{sh} : résistances shunt qui correspond à la présence de courant de fuite dans la cellule.

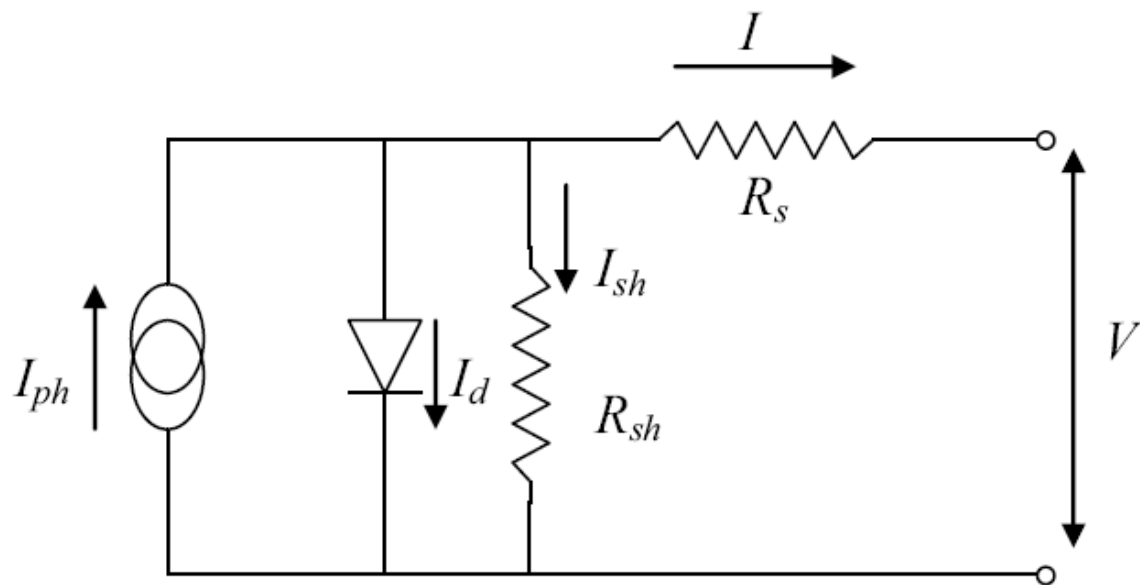


Figure II.6 : Schéma équivalent de la cellule solaire réelle.

7. Caractéristique courant-tension

Les paramètres de la cellule photovoltaïque sont déduits de la caractéristique $I(V)$ propre à la cellule.

La caractéristique courant–tension sous obscurité est celle d’une diode (récepteur).

Sous éclairage, cette caractéristique se décale vers les courants négatifs (figure II.7), la cellule solaire peut alors jouer le rôle de générateur de puissance.

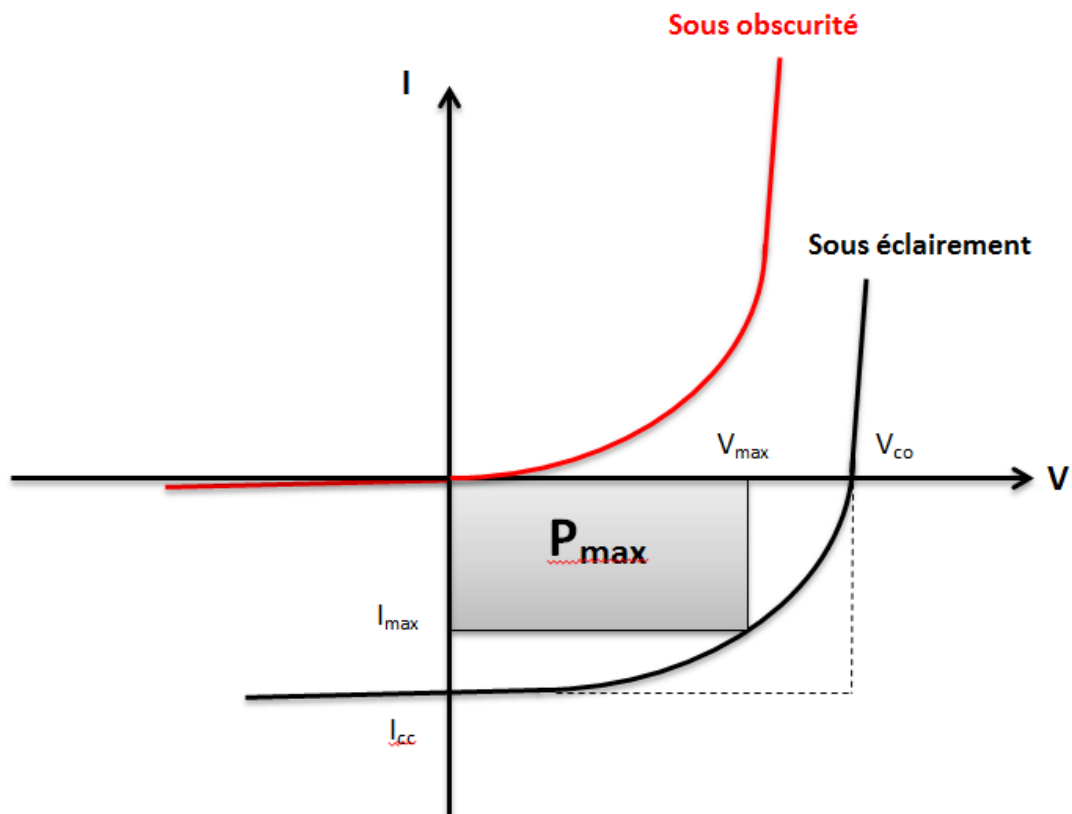


Figure II.7. Caractéristique I(V) de la cellule solaire sous obscurité et sous éclairement

8. Les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire

La cellule solaire est caractérisée par quatre paramètres électriques qui sont:

8.1 Le courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit I_{cc} de la cellule photovoltaïque (obtenu pour $V=0$) constitue le maximum de courant qui peut être obtenu d'une cellule, c'est le courant lorsque le potentiel à la cellule est nul. D'où, en annulant la tension V dans l'équation (8), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} - I_s \left(\exp\left(\frac{q \cdot R_s \cdot I_{cc}}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (9)$$

Pour un niveau d'éclairage standard, l'effet de la résistance série est négligeable (dans le cas idéal).

Pour la plupart des cellules solaires (dont la résistance série est très faible), on peut négliger le terme $I_s \left[e^{\frac{qR_s I_{cc}}{nkT}} - 1 \right]$ devant I_{ph} .

Donc l'expression du courant de court-circuit devient :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (10)$$

Dans le cas idéal ou proche $R_s \rightarrow 0$ et $R_{sh} \rightarrow \infty$

$$\frac{R_s}{R_{sh}} \ll 1 \quad (11)$$

D'où
$$1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \approx 1 \quad (12)$$

Donc
$$I_{cc} \approx I_{ph} \quad (13)$$

Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être considéré comme étant équivalent au photocourant [4] lorsque $V = 0$.

8.2 La tension en circuit ouvert V_{co}

La tension de circuit ouvert (V_{co}) est la tension pour laquelle le courant aux bornes de la cellule est nul ($I=0$) ou la tension mesurée en l'absence de débit. Elle est exprimée comme suit :

Pour
$$I = 0 \quad (14)$$

On aura :
$$I_{ph} - I_s \left(e^{\left(\frac{qV}{nkT}\right)} - 1 \right) = 0 \quad (15)$$

$$\frac{I_{ph}}{I_s} = e^{\left(\frac{qV_{co}}{nkT}\right)} - 1 \quad (16)$$

Donc

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \ln \left[\left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) + 1 \right] \quad (17)$$

8.3 Le facteur de forme FF

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement $P_m(I_m, V_m)$ de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{cc} et tension comprise entre 0 et V_{co}) comme le montre la figure II.7.

Ce point P_m est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes Ox, Oy et les droites $x = I_m$ et $y = V_m$ passe par un maximum.

Le nom "facteur de forme" (fill factor) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (18)$$

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (19)$$

8.4 Le rendement η

Il définit le rapport entre la puissance électrique optimale obtenue aux bornes de la cellule et la puissance du rayonnement incident. Il est donné en fonction des grandeurs mesurables.

Le rendement s'écrit alors :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{co} \times I_{cc}}{P_{in}} \cdot FF \quad (20)$$

où P_{in} est la puissance lumineuse incidente (W/cm^2). Le rendement est souvent exprimé en pourcentage, c'est un paramètre clef de productivité des cellules solaires.

9. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le mécanisme de la conversion photovoltaïque. Nous avons présenté également les différentes notions relatives à la cellule photovoltaïque ; sa caractéristique I-V, ses circuits électriques équivalents et ses principales grandeurs caractéristiques. Parmi ces grandeurs, le rendement photovoltaïque est le paramètre le plus important pour l'industrie des cellules solaires du fait qu'il englobe la tension de circuit

ouvert (V_{co}), le courant de court-circuit (I_{CC}) et le facteur de forme (FF). C'est aussi le paramètre utilisé pour comparer les performances des cellules solaires.

1. Introduction

Une hétérojonction est formée d'un contact entre 2 semi-conducteurs différents ou entre un métal et un semi-conducteur. A l'équilibre thermodynamique les niveaux de fermi des deux matériaux s'alignent.

Dans un dispositif électronique, l'hétérostructure peut être soit une diode (contact redresseur), soit résistance (contact ohmique).

L'étude de la première cellule à hétérojonction a été présentée en 1974 par Fuhs[17], lorsqu'il a proposé de former une hétérojonction entre un émetteur en silicium amorphe avec un substrat en silicium cristallin dans les cellules solaires. Les cellules solaires du type Schottky formées à l'aide d'une structure composée d'un métal et d'un semi-conducteur en contact sont aussi étudiées à la même époque que les cellules à hétérojonction.

Les cellules solaires à hétérojonctions de type TCO/Si telles que : ITO/Si, SnO₂/Si et ZnO/Si, sont une alternative intéressante pour réduire le coût de fabrication des cellules solaires.

Dans ce chapitre, nous décrivons en premier lieu les hétérojonctions de type métal-semiconducteur. Nous présentons en second lieu l'hétérojonction ITO-Si, objet de la simulation.

2. Affinité électronique d'un semi-conducteurs et travail de sortie d'un métal

Le travail d'extraction (figure III.1) ou le travail de sortie du métal ($e\phi_m$) représente l'énergie à fournir à un électron de conduction d'un métal pour qu'il quitte le métal et se retrouve dans le vide (NV).

Le travail de sortie d'un métal est donné par la relation suivante :

$$e\phi_m = NV - E_F \quad (21)$$

C'est une constante physique du métal considéré.

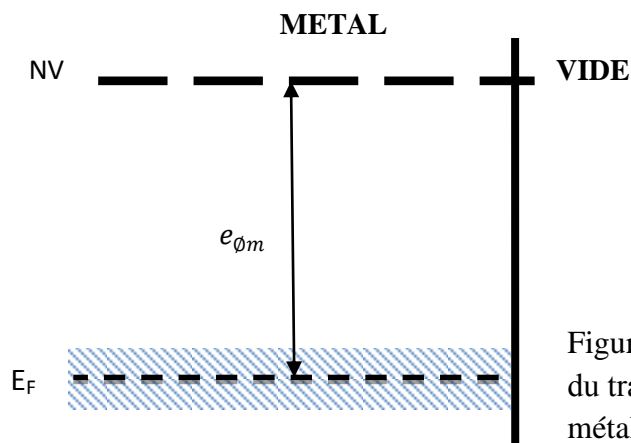


Figure III.1. Représentation du travail de sorties d'un métal.

L'affinité électronique du semiconducteur $q\chi_s$ représente l'énergie à fournir à un électron du bas de la bande de conduction pour l'extraire du semiconducteur et le placer dans le vide. C'est une caractéristique du matériau.

$$q\chi_s = NV - E_c \quad (22)$$

C'est une grandeur constante physique du semiconducteur (figure III.2).

Le travail de sortie du semiconducteur qui représente l'énergie à fournir à un électron du semiconducteur pour qu'il passe du niveau de Fermi au vide (sans énergie cinétique) dépend de l'affinité électronique du matériau et du dopage (position de E_F).

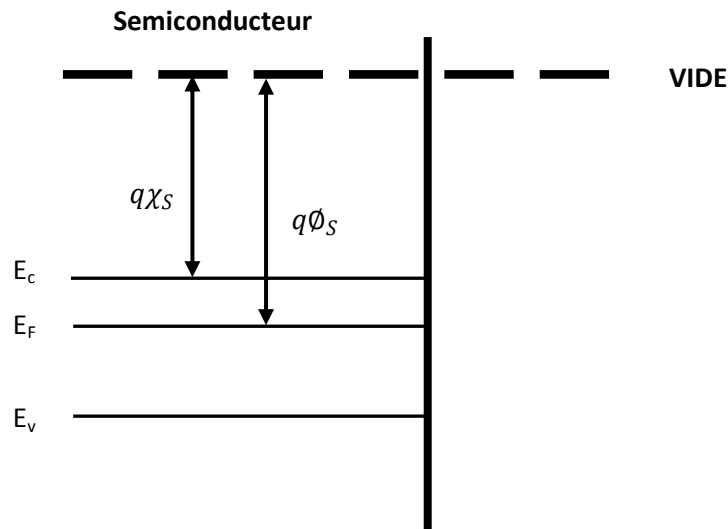


Figure III.2. Représentation de l'affinité électrique et du travail de sortie du semiconducteur.

3. Etude de la structure métal /semi-conducteur

La mise en contact d'un métal avec un semiconducteur engendre un échange de porteurs de charge qui se manifeste entre les deux matériaux jusqu'à égalisation des niveaux de Fermi. Il existe à l'interface une barrière de potentiel donnée par l'expression suivante :

$$E_{bn} = q\phi_m - q\chi_s \quad (23)$$

La structure des bandes d'énergie à l'interface du contact métal-semiconducteur est conditionnée par le type du semi-conducteur et de la différence entre le travail de sortie du métal et celui du semiconducteur.

➤ **Contact redresseur ou SCHOTTKY :**

- Si le semiconducteur est de type n : le travail de sortie du métal doit être supérieur à celui du semiconducteur.
- Si le semiconducteur est de type p : le travail de sortie du métal doit être inférieur à celui du semiconducteur.

➤ **Contact ohmique ou métallique :**

- Si le semiconducteur est de type n : le travail de sortie du métal doit être inférieur à celui du semiconducteur.
- Si le semiconducteur est de type p : le travail de sortie du métal doit être supérieur à celui du semiconducteur.

3.1. Cas ou $q \phi_m = q \phi_s$:

Dans ce cas les niveaux de Fermi du métal E_{Fm} et du semiconducteur E_{Fs} sont alignés en l'absence de contact car leur distance au niveau du vide est la même (figure III.3).

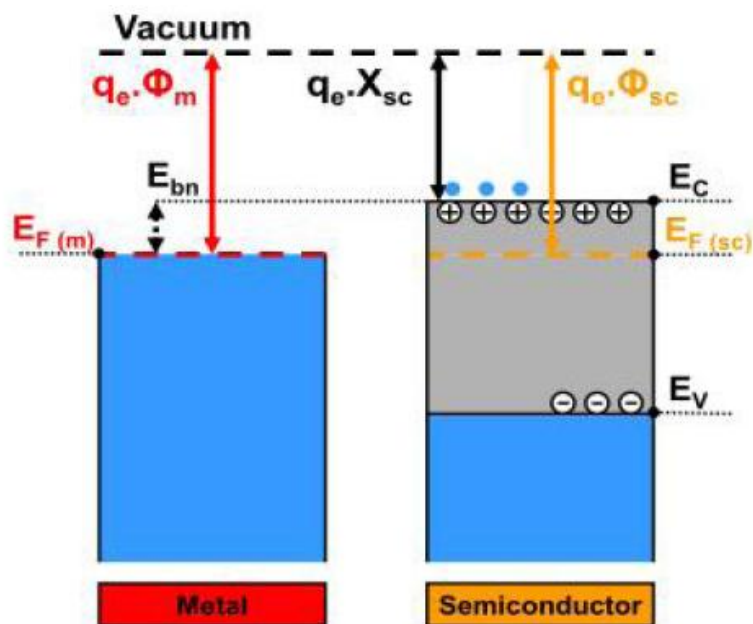


Figure III.3. Diagramme des bandes d'énergie d'un contact métal-semiconducteur avec $q \phi_m = q \phi_s$ avant contact [1].

Lors de la mise en contact des matériaux (Figure III.4), les niveaux de Fermi du métal et du semiconducteur étant déjà alignés, l'équilibre thermodynamique peut se réaliser sans échange des porteurs. Le diagramme énergétique est représenté sur la figure III.4. Ce diagramme énergétique est valable quel que soit le type du semiconducteur N ou P. Dans ce cas, les bandes de conduction et de valence restent horizontales. Le système est en régime des bandes plates.

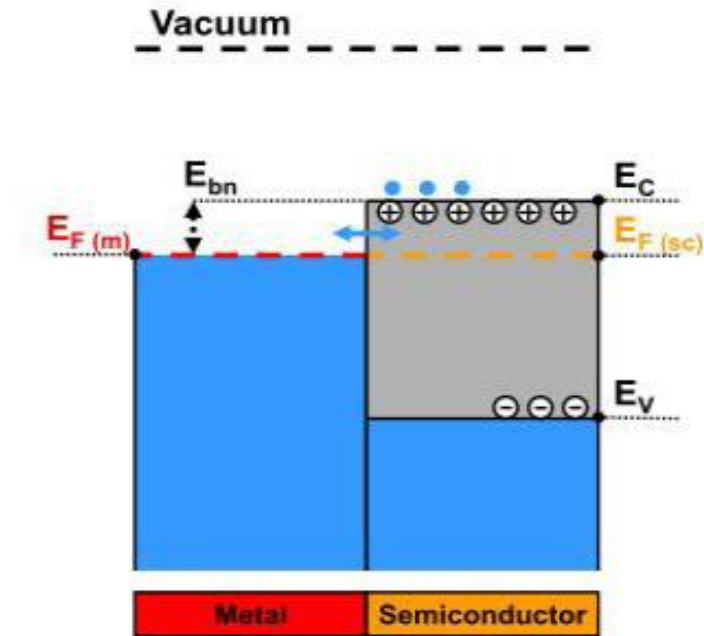


Figure III.4. Diagramme des bandes d'énergie d'un Contact métal-semiconducteur avec $q\phi_m = q\phi_s$ après contact.

3.2. Cas ou $q\phi_m > q\phi_s$:

3.2.1. Semiconducteur de type N

Le travail de sortie du semiconducteur étant inférieur à celui du métal, le diagramme des bandes d'énergie aura l'allure suivante (voir figure III.5) avant le contact.

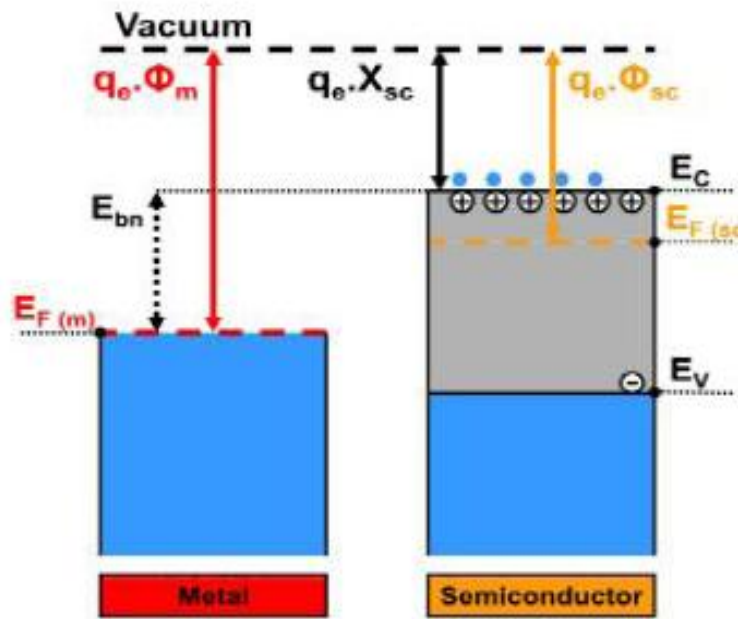


Figure III.5. Diagramme des bandes d'énergie d'un contact métal-semiconducteur de type N avec $q \phi_m > q \phi_s$ avant contact.

Lors de la mise en contact du semiconducteur et le métal, les électrons du semiconducteur situés près de l'interface nécessitant une plus faible énergie que ceux du métal, vont passer du semiconducteur vers le métal entraînant des modifications énergétiques dans chacun des matériaux.

Ces électrons passent vers le métal laissant des ions positifs fixes du côté du semiconducteur, et le nombre de charges positives développées dans le semiconducteur est égal au nombre de charges négatives développées dans le métal, ce phénomène s'arrête lorsque l'alignement des niveaux de Fermi du métal et du semiconducteur est réalisé.

Côté métal, on constate une accumulation d'électrons sur une zone infiniment mince près de l'interface métal-semiconducteur.

Une zone désertée (ZCE) apparaît au niveau de l'interface dans le semiconducteur, on suppose que cette zone est entièrement dépourvue de porteurs, donc elle est isolante sur une épaisseur W ce qui implique une courbure des bandes d'énergie vers le haut du côté semiconducteur (voir figure III.6).

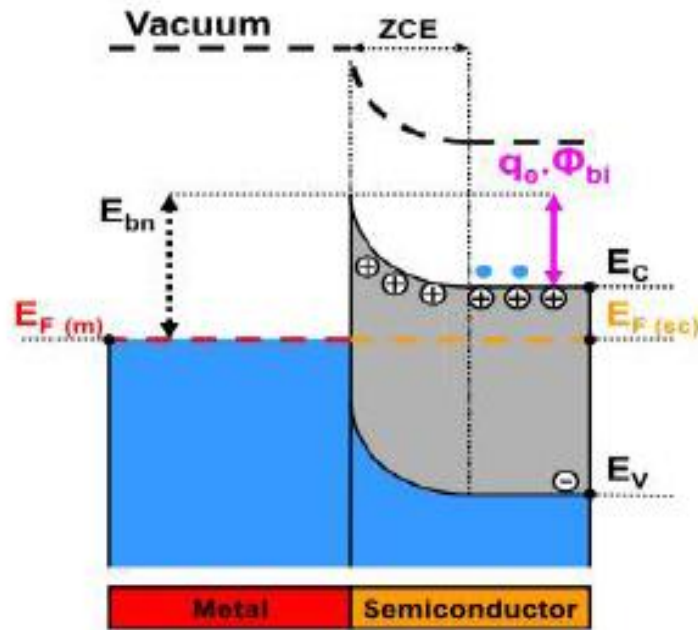


Figure III.6. Diagramme des bandes d'énergie d'un contact métal-semiconducteur de type N avec $q\Phi_m > q\Phi_s$ après contact.

Donc quand les niveaux de Fermi s'alignent, c'est-à-dire à l'équilibre, la hauteur de la barrière qui s'oppose au passage des électrons du métal vers le semiconducteur est :

$$q\phi_b = q\phi_m - q\chi_s \quad (\text{eV}) \quad (24)$$

La hauteur de barrière qui s'oppose au passage des électrons du semiconducteur vers le métal est :

$$qV_b = q\phi_m - q\phi_s \quad (\text{eV}) \quad (25)$$

où

V_b représente le potentiel de la barrière de la ZCE apparue dans le semiconducteur.

Le contact métal-semiconducteur avec un travail de sortie du métal supérieur au travail de sortie du semiconducteur présentant à l'interface une apparition d'une ZCE constitue donc un contact redresseur ou une diode SCHOTTKY.

3.2.2 Semiconducteur de type P

Le diagramme de bandes d'énergie dans le cas où le travail de sortie du semi-conducteur étant inférieur à celui du métal, avec un semiconducteur de type P avant contact est représenté ci-dessous (voir figure III.7).

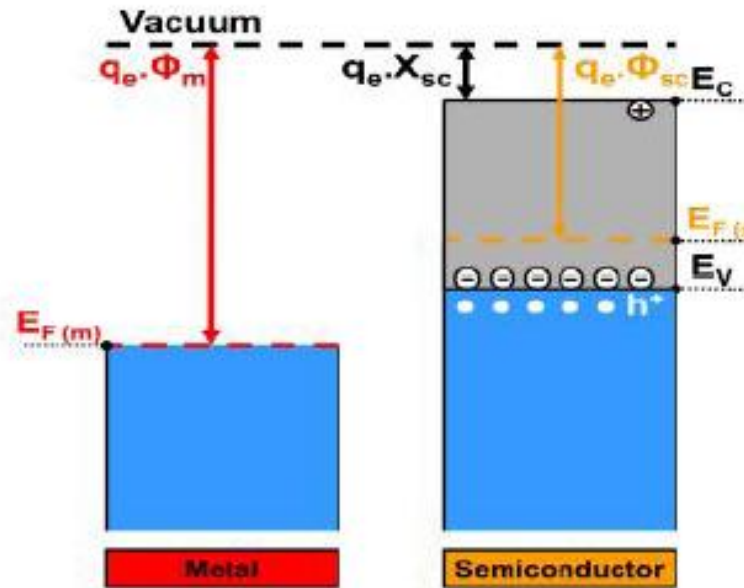


Figure III.7. Diagramme des bandes d'énergie d'un contact métal-semiconducteur de type P avec $q \phi_m > q \phi_s$ avant contact.

Lorsqu'on met en contact un métal et un semiconducteur de type P, les électrons du semiconducteur diffusent vers le métal car ils nécessitent une plus faible énergie que ceux du métal. Il en résulte une courbure vers le haut des bandes de valence et de conduction (Voir figure III.8). Il apparaît une accumulation des électrons du côté métal et une accumulation de trous à l'interface du côté semiconducteur. Il n'y a pas de zone vide de porteurs majoritaires. Le courant circule librement dans les deux sens, c'est un contact ohmique.

Le contact métal-semiconducteur avec un travail de sortie du métal supérieur au travail de sortie du Semiconducteur, présentant à l'interface un phénomène d'accumulation des porteurs majoritaires, constitue un contact ohmique.

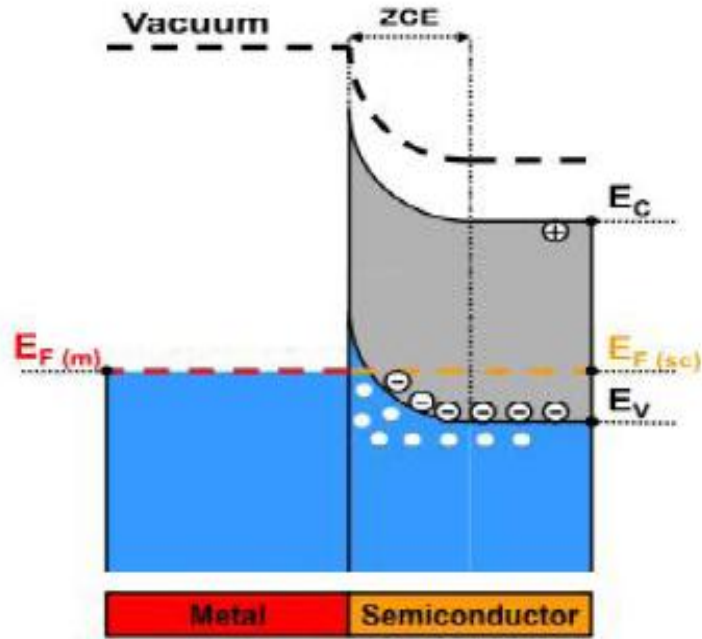


Figure III.8. Diagramme des bandes d'énergie d'un contact métal-semiconducteur de type P avec $q \phi_m > q \phi_s$ après contact.

3.3. Cas ou $q \phi_m < q \phi_s$:

3.3.1. Semiconducteur de type N

Le diagramme des bandes d'énergie avant contact est représenté sur la figure III.9.

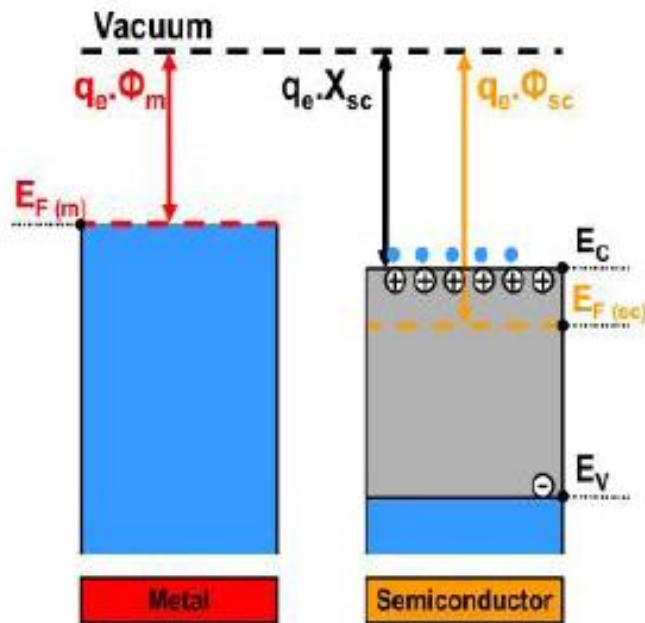


Figure III.9 : Diagramme des bandes d'énergie d'un contact métal-semiconducteur de type N avec $q \phi_m < q \phi_s$ avant contact.

Lorsque les deux matériaux, métal et semiconducteur, sont mis en contact et que le travail de sortie du métal étant inférieur à celui du semiconducteur, les électrons passent du métal vers le semiconducteur. Ce phénomène continue jusqu'à l'alignement des niveaux de Fermi. Le diagramme après contact est représenté sur la figure III.10.

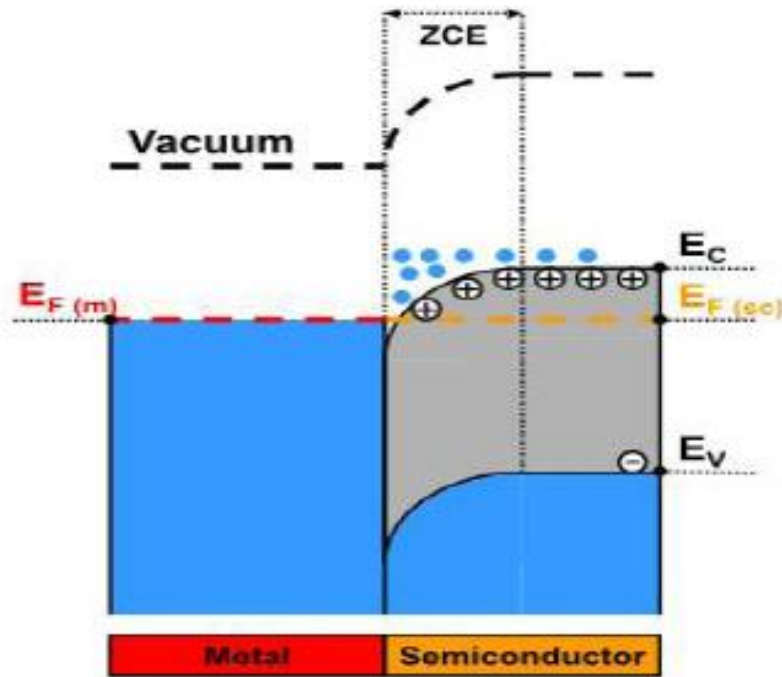


Figure III.10. Diagramme des bandes d'énergie d'un contact métal-semiconducteur de type N avec $q\phi_m < q\phi_s$ après contact.

Ces électrons qui passent du métal vers le semiconducteur font apparaître près de l'interface un déficit d'électrons dans le métal et une zone d'accumulation des porteurs majoritaires (électrons) dans le semiconducteur. Il en résulte une courbure des bandes d'énergie vers le bas du côté semiconducteur. Le courant circule dans les deux sens, le contact est ohmique.

3.3.2. Semiconducteur de type p

Avant contact, le diagramme d'énergie de la structure métal/semiconducteur de type P, où le travail de sortie du métal est inférieur au travail de sortie du semiconducteur est représenté sur la figure III.11.

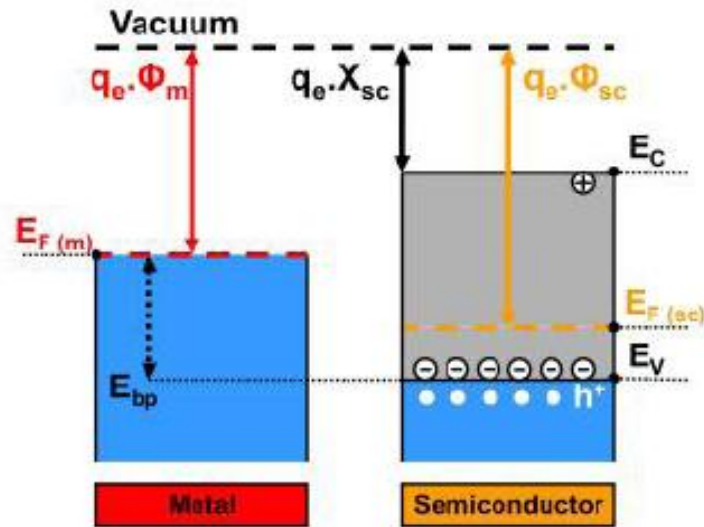


Figure III.1. Diagramme des bandes d'énergie d'un contact métal-semiconducteur de type P avec $q \phi_m < q \phi_s$ avant contact.

Lors de la mise en contact des deux matériaux, il apparaît un déficit d'électrons à l'interface du côté métal. Les électrons passent du métal vers le semiconducteur jusqu'à égalisation des niveaux de Fermi. La courbure des bandes d'énergie se fait vers le bas (figure III.12)

Les électrons qui arrivent du métal se recombinent avec les trous majoritaires créant ainsi une zone de déplétion ou une zone de charge d'espace négative dans le semiconducteur. La structure dans ce cas présente un contact redresseur ou une diode SCHOTTKY.

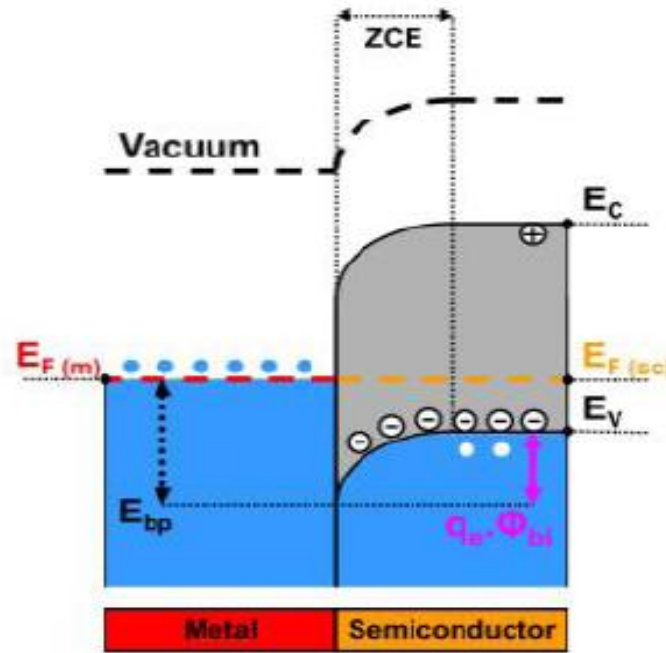


Figure III.12. Diagramme des bandes d'énergie d'un contact métal-semiconducteur de type P avec $q \phi_m < q \phi_s$ après contact.

En résumant pour les différentes structures métal/semiconducteur étudiées, on a constaté que la nature du contact obtenu, qu'il soit redresseur ou ohmique, dépend du travail de sortie du métal, du travail de sortie du semiconducteur et du type du semiconducteur.

Dans le cas d'un semiconducteur de type N, le travail de sortie de ce dernier $q \phi_s$ dépend de la position du niveau de Fermi, il est exprimé en fonction de l'affinité électronique $q \chi_s$ et de la position du niveau de Fermi $E_c - E_f$ comme le montre l'équation suivante :

$$q \phi_s = q \chi_s + (E_c - E_f) \quad (26)$$

On suppose que le niveau de Fermi est approximativement proche de la bande de conduction, on néglige $(E_c - E_f)$, donc

$$q \phi_{scN} \approx q \chi_{sc} \quad (27)$$

Dans le cas d'un semiconducteur de type P, le niveau de Fermi est proche de la bande de valence, le travail de sortie peut s'écrire :

$$q \phi_{sc_p} = q \chi_{sc} + E_G - (E_{FP} - E_V) \quad (28)$$

Avec

E_G :Gap du semiconducteur

On suppose que le niveau de Fermi est approximativement proche de la bande de valence, on néglige $(E_{FP} - E_V)$, donc :

$$q \phi_{sc_p} \approx q \chi_{sc} + E_G \quad (29)$$

Le tableau III.1 résume la nature du contact métal/semiconducteur selon la différence des travaux de sortie et le type du semiconducteur.

	$q \phi_m > \phi_{sc}$	$q \phi_m < \phi_{sc}$
Semiconducteur de type N	Contact redresseur	Contact ohmique
Semiconducteur de type p	Contact ohmique	Contact redresseur

Tableau III.1. Nature du contact métal/semiconducteur.

4. Les cellules solaires à hétérojonctions de type ITO/ p-Si

La cellule solaire permet de convertir l'énergie solaire en électricité et cela par l'absorption de photons donnant lieu à la création de paires électrons-trous. Un champ électrique permanent, au sein de la structure, permet la séparation rapide de ces porteurs pour éviter les phénomènes de recombinaison.

Dans les cellules solaires conventionnelles, ce champ électrique (nécessaire pour la séparation des porteurs de charges) est créé par une jonction PN réalisée dans le semiconducteur.

Dans les cellules solaires à hétérojonctions, la couche du TCO sert d'une part de couche antireflet, par optimisation de son épaisseur optique, et d'autre part pour la formation de la zone de déplétion à l'interface entre celle-ci et le substrat de la structure de la cellule solaire ITO/ p-Si.

Le contact métal/ semiconducteur est en régime de déplétion avec un semiconducteur de type P lorsque le travail de sortie du métal est inférieur à celui du semiconducteur, c'est ce que nous allons vérifier.

	$q\chi$ (eV)	$N_A(cm^{-3})$	$N_V(cm^{-3})$	$N_D(cm^{-3})$
ITO	4.45			10^{19}
Si (p)	4,05	$1,5.10^{16}$	10^{19}	

Calculons le travail de sortie du Si (p) :

On a :

$$q\phi_s = q\chi_s + E_g - \delta E_p$$

Avec : $\delta E_p = E_{F_p} - E_V$

$$E_{F_p} - E_V = kT \ln \frac{N_V}{N_A}$$

$$E_{F_p} - E_V = 0.026 \ln \frac{10^{19}}{1,5.10^{16}}$$

$$\delta E_p = 0.169 \text{ eV}$$

Donc :

$$q\phi_s = 4,05 + 1,12 - 0,169$$

$$q\phi_s = 5 \text{ eV}$$

Calculons le travail de sortie de l'ITO :

$$q\phi_{ITO} = q\chi_{ITO} + \delta E_n$$

Avec

$$\delta E_n = E_c - E_{F_n} = kT \ln \frac{N_c}{N_D}$$

$$\delta E_n = 0,026 \ln \frac{2,9 \cdot 10^{19}}{10^{19}}$$

$$\delta E_n = 0,03 \text{ eV}$$

Donc

$$q\phi_{ITO} = 4,45 + 0,03$$

$$q\phi_{ITO} = 4,48 \text{ eV}$$

Le travail de sortie du métal étant inférieur à celui de semiconducteur ($q\phi_m < q\phi_{sc}$); le semiconducteur est de type P : donc il s'agit bien d'un contact redresseur donc la structure remplit la condition de son utilisation en tant que cellule solaire.

Le diagramme des bandes d'énergie de la cellule solaire ITO/Si (p) est représenté sur la figure III.13.

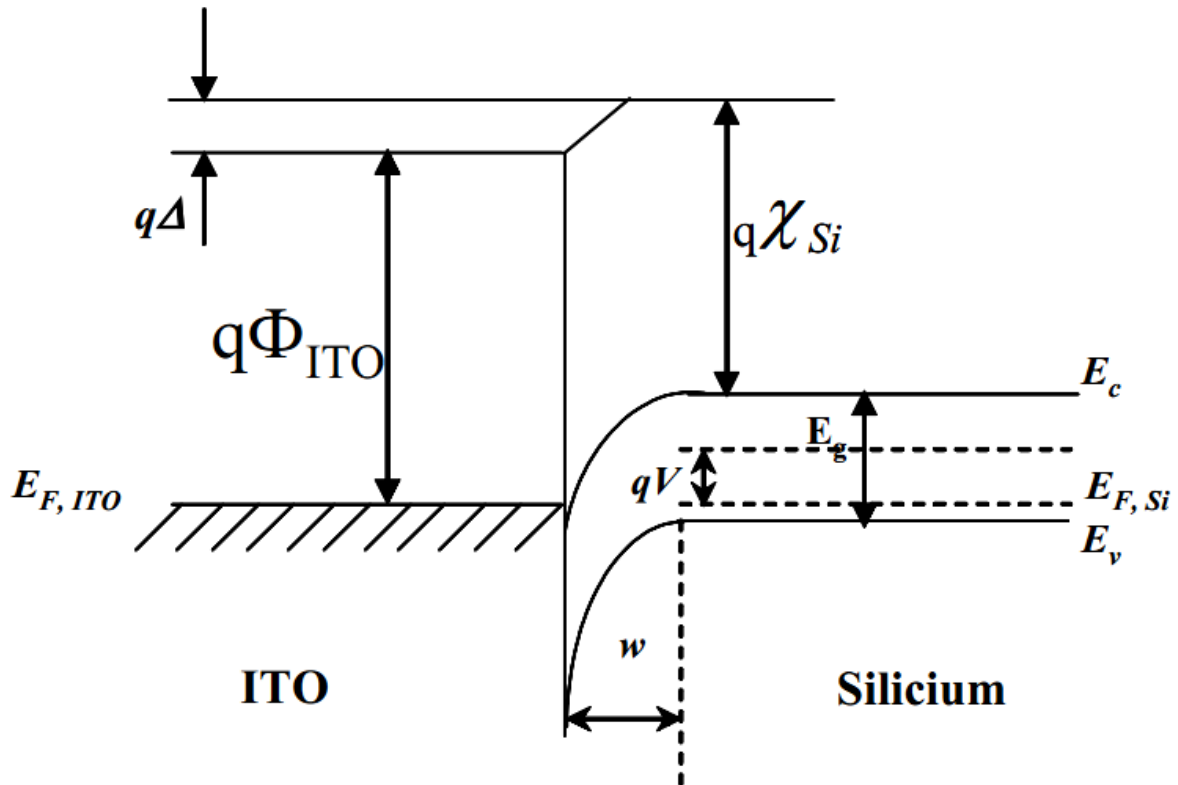


Figure III.13. Diagramme des bandes d'énergie de la cellule solaire simulée ITO/Si (p).

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans une première partie la physique des structures Métal/Semiconducteur.

Dans la deuxième partie, nous avons décrit la structure de la cellule ITO/Si (p) qui fera l'objet de notre travail de simulation dans le chapitre suivant.

1. Introduction

Dans la première partie de ce chapitre, nous décrivons le logiciel de simulation utilisé AFORS-HET et les différentes étapes de simulation. Nous présentons la structure de la cellule solaire simulée ITO/Si (p) dans le but d'approcher schématiquement le composant réel.

Dans la deuxième partie, on présentera les résultats de simulation de la cellule solaire ITO – Si(p) avec une interprétation en vue d'une optimisation du rendement de conversion photovoltaïque.

2. Présentation du logiciel de simulation AFORS-HET

Le logiciel de simulation AFORS-HET est un outil de simulation numérique à une dimension (1D) dédié à l'étude de dispositifs semiconducteur à hétérojonctions. Cet outil a été conçu plus particulièrement pour étudier l'hétérojonction à base de silicium. Il permet de définir et de simuler le fonctionnement d'une structure composée éventuellement d'un empilement de couches de matériaux semiconducteurs différents (figure IV.1).

AFORS-HET présente une interface accueillante qui permet la définition et la création d'une structure donnée permettant de simuler son fonctionnement à l'obscurité ou sous éclairage.

Les propriétés électroniques de chaque matériau semiconducteur peuvent être définies pour simuler le fonctionnement d'une structure donnée. L'interface du logiciel est répartie en trois zones (voir la figure IV.2.a).

A. Zone de contrôle ou program control :

La zone de contrôle sert à définir la structure de la cellule à simuler et les paramètres de chaque couche utilisée.

Les paramètres électroniques sont la bande interdite E_G , la permittivité relative ϵ_r , l'affinité électronique χ , la densité effective d'états dans la bande de conduction N_C , la densité effective d'états dans la bande de valence N_V , et la mobilité des électrons et des trous.

B. Zone de paramètres externes ou external parameters :

La zone des paramètres externes permet de déclarer le spectre d'illumination et les conditions aux limites.

C. Zone de mesure ou measurement

La zone de mesure permet de choisir les mesures à effectuer.

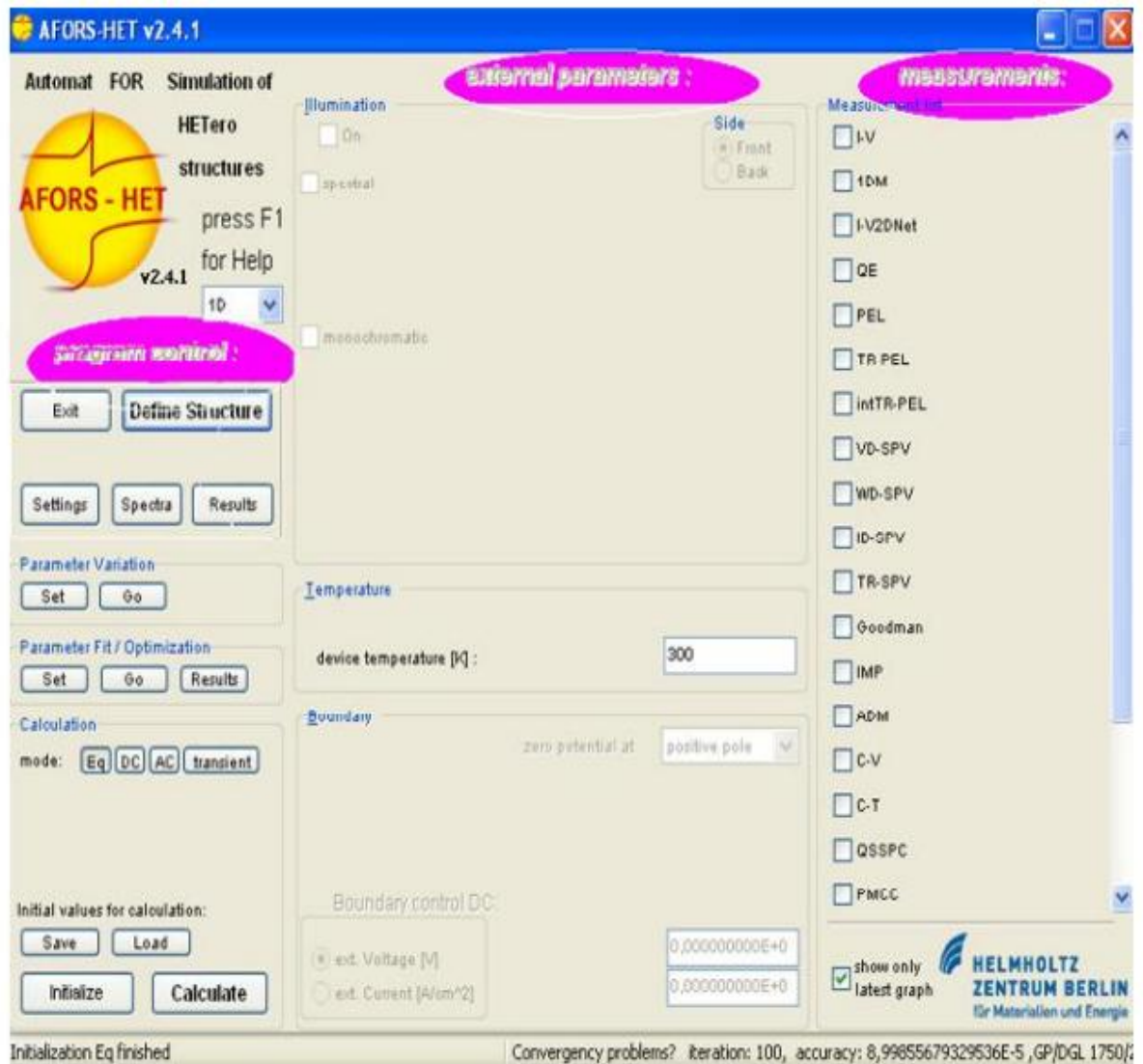


Figure IV.1. La fenêtre principale de l'interface graphique du logiciel de simulation.

- **Les étapes de la simulation :**

La première étape de simulation avec AFORS-HET est de définir la structure de la cellule à simuler, elle est composée toujours d'un contact avant et arrière et un nombre variable de couche (les interfaces).

Après définition de la structure, nous introduisons les paramètres nécessaires pour chaque couche tels que l'épaisseur et les propriétés électrique (le gap, le dopage...etc.) comme le montre la figure IV.2.a.

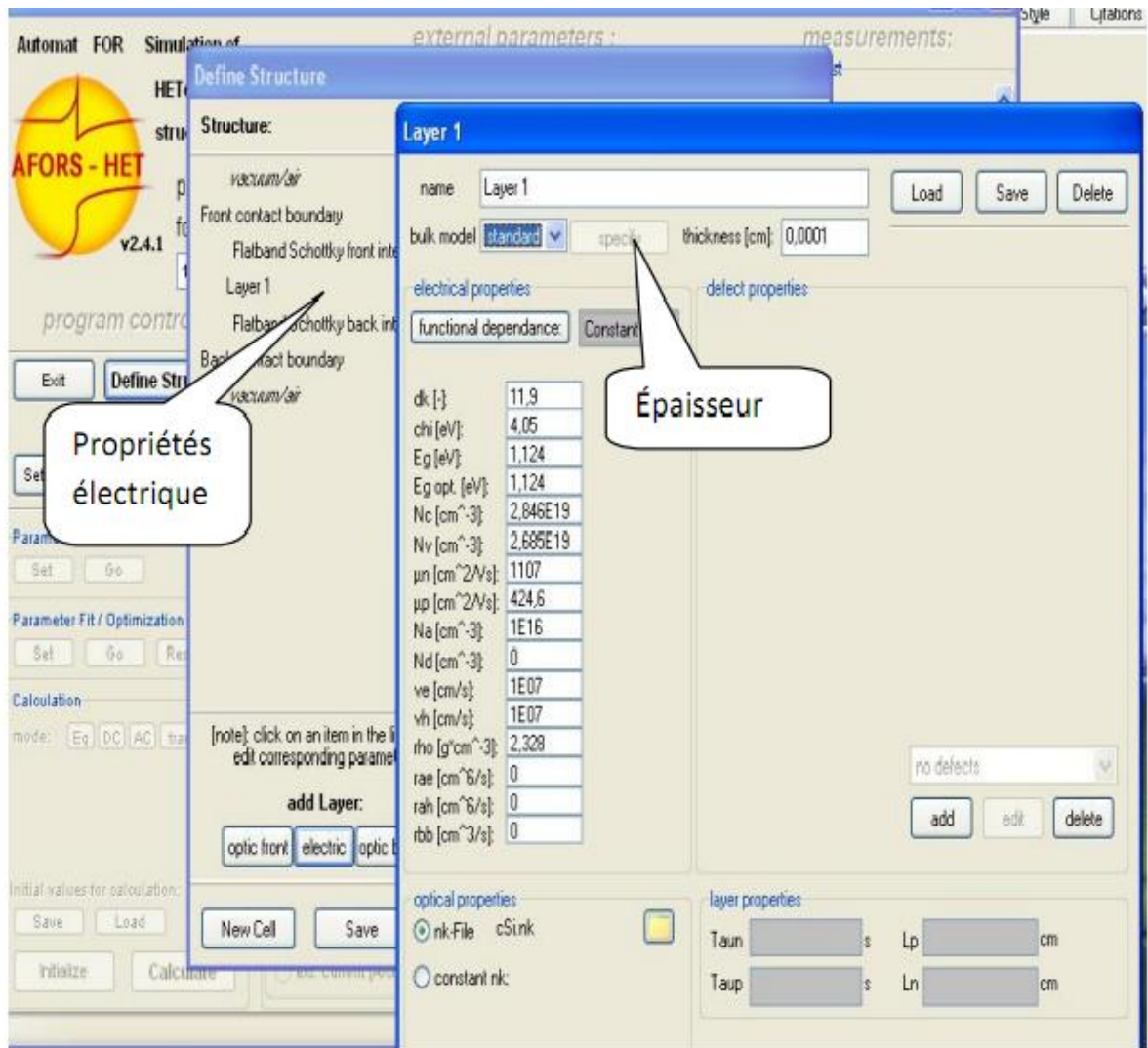


Figure IV.2.a. Fenêtre correspondant à la définition de la structure.

Une fois que la cellule est créée et enregistrée, le calcul des conditions d'équilibre thermodynamique est fait automatiquement.

Pour l'illumination de la cellule, on choisit le mode de polarisation (mode AC ou DC), on sélectionne ensuite la lumière spectrale monochromatique avec laquelle on veut travailler (figure IV.2.b).

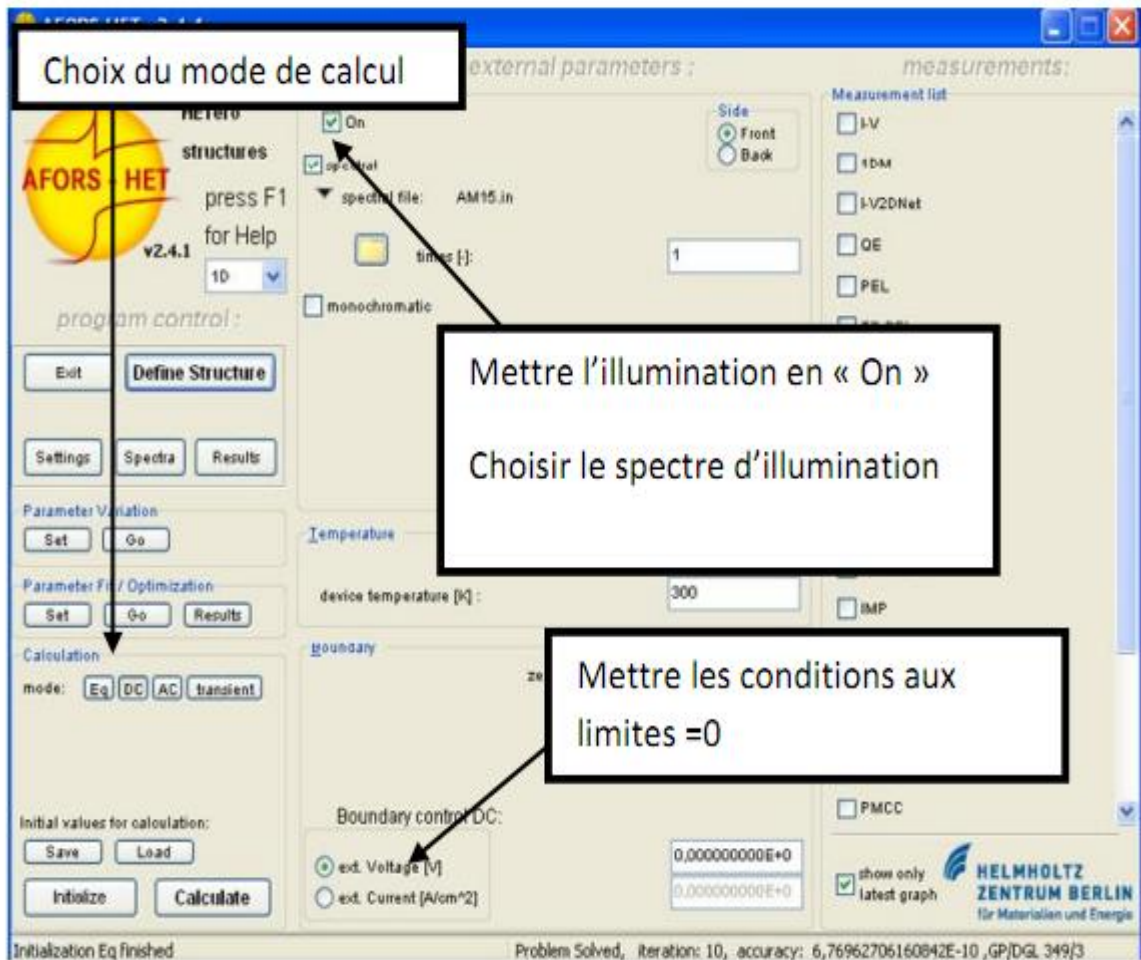


Figure IV.2.b. Mode de calcul et l'illumination de la cellule

Ce logiciel est utilisé par de nombreux chercheurs pour la simulation des cellules solaires à hétérojonctions [18, 19].

3. la structure de la cellule solaire simulée

La figure IV.3 représente la cellule solaire simulée qui est constituée d'un substrat de silicium monocristallin de type P sur lequel est déposé un film mince d'ITO qui sert d'émetteur et de couche antireflet. Cette structure est munie d'une grille métallique en face avant et d'un contact métallique arrière qui permettent la collecte des porteurs et la connexion de la cellule au circuit électrique extérieur.

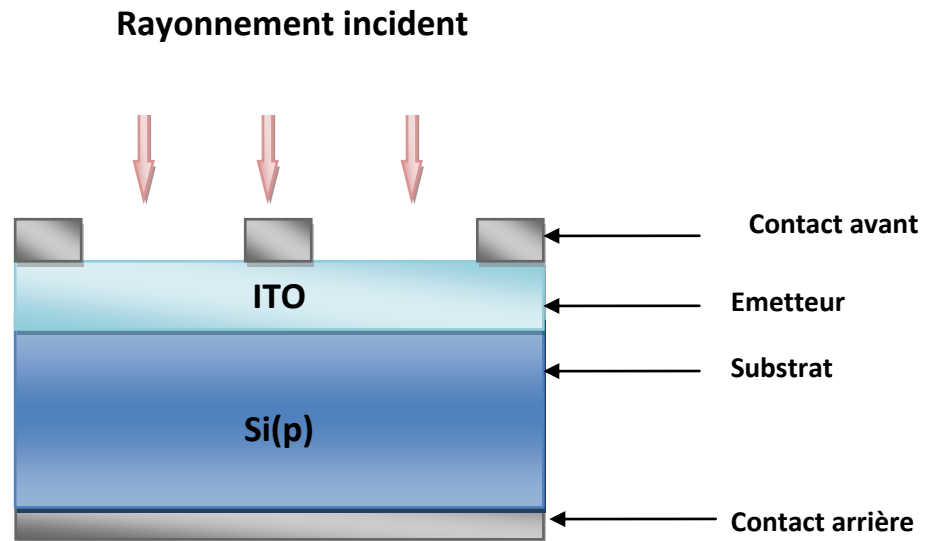


Figure IV.3. Structure de la cellule solaire à simuler.

4. Les paramètres de la simulation

La simulation est effectuée à une température de 300 K, sous une spectre AM.1,5 avec une puissance de $P=1000 \text{ W/m}^2$.

Les paramètres de chacune des couche (Si, ITO) utilisés dans la simulation sont donnés dans le tableau IV.1 suivant [20, 21, 22]:

	Substrat : silicium (p)	Emetteur :ITO
Epaisseur	150 – 350 μm	80 n m
Travail de sortie	4,05 eV	4.4 eV
Dopage	$1.5 \cdot 10^{16}$	10^{19} cm^{-3}
Vitesse de recombinaison	$V_e=V_h=10^7 \text{ cm/s}$	
Résistivité	1.1 $\Omega\cdot\text{cm}$	$10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$

Tableau IV.1. Paramètres de simulation

5. Résultats de simulation

5.1 Diagramme des bandes d'énergie

La figure IV. 4 représente le diagramme des bandes d'énergie de la structure ITO/p-Si à l'équilibre thermodynamique.

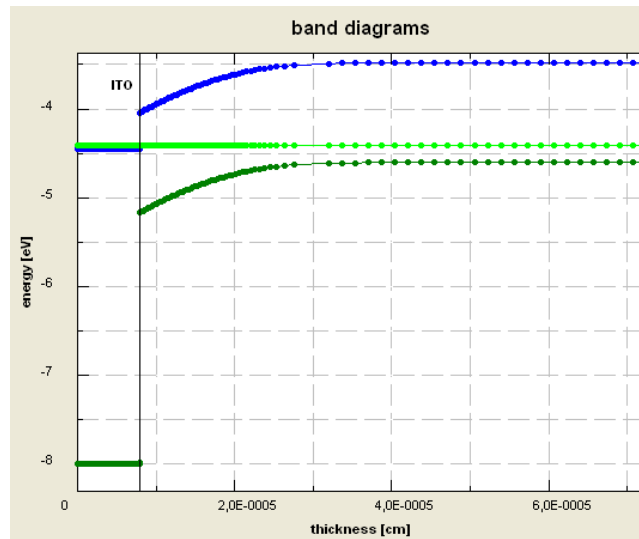


Figure IV.4. Diagramme des bandes d'énergie de la cellule solaire ITO/p-Si.

5.2. La caractéristique courant-tension la cellule solaire ITO/p-Si

La caractéristique J-V de la cellule solaire ITO/p-Si simulées sous AFORS-HET est représentée sur la figure IV.5.

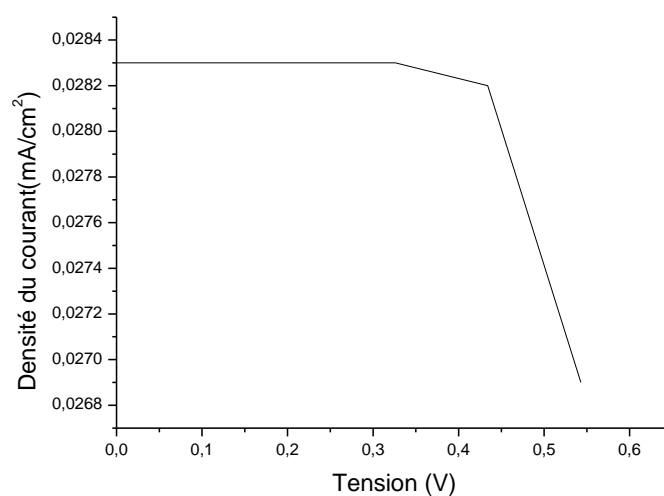


Figure IV.5. Caractéristique J(V) de la cellule solaire ITO/p-Si.

5.3. Les paramètres électriques de la cellule solaire ITO/p-Si simulée

Les paramètres électriques de la cellule solaire ITO/p-Si sont regroupés dans le tableau IV.2.

Paramètres/structure	V_{co} (mV)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF(%)	η (%)
Cellule solaire ITO/p-Si	621.7	28.27	82.95	14.58

Tableau IV.2. Paramètres électriques de la cellule solaire ITO/p-Si simulée.

5.4. Influence de l'épaisseur du substrat

Les figures IV.6 a, b, c et d représentent les variations des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire ITO/Si (p) en variant l'épaisseur de la base Si. Les valeurs numériques de ces paramètres sont données en annexe A.

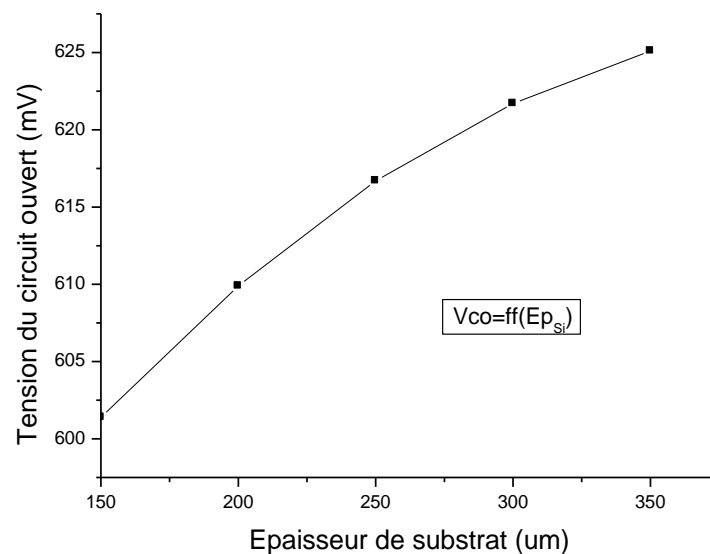


Figure IV.6.a Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur du substrat.

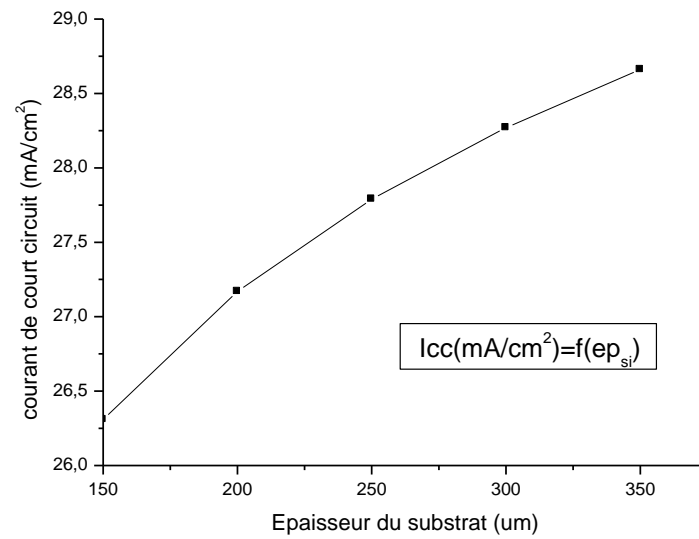


Figure IV.6.b Variation du courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur du substrat.

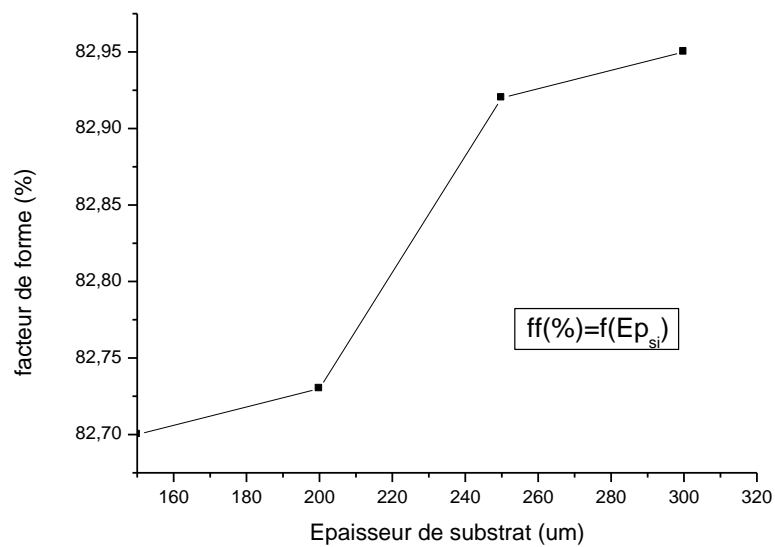


Figure IV.6.c Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur du substrat.

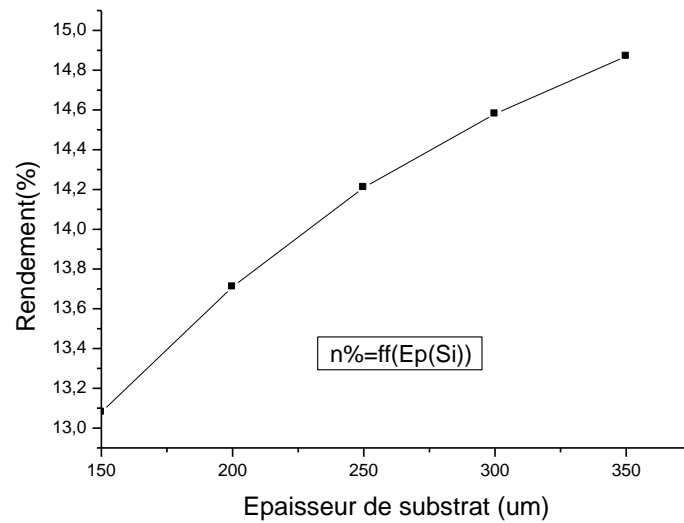


Figure IV.6.d Variation du rendement en fonction de l'épaisseur du substrat.

Ces résultats montrent que le rendement de conversion de la cellule solaire ITO/Si (p) est fortement amélioré suite à l'augmentation de l'épaisseur du substrat. Cette amélioration du rendement est due principalement à l'augmentation de la tension de circuit ouvert et du courant de court-circuit comme le montre la relation suivante :

$$\eta = \frac{V_{co} \times I_{cc}}{P_{in}} \cdot FF \quad (30)$$

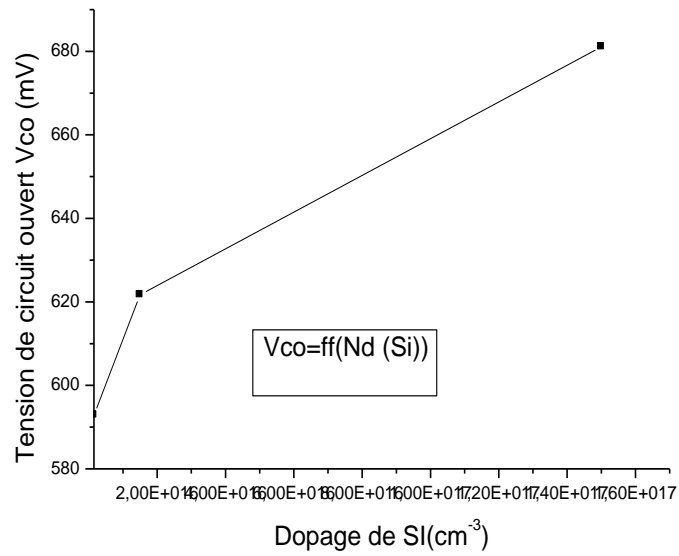
En effet, l'augmentation de l'épaisseur du substrat permet une meilleure absorption des photons dans la cellule, induisant une augmentation des paires "électron- trou" photogénérées. Ceci implique une amélioration du courant de court-circuit qui est à l'origine de l'augmentation de la tension de circuit ouvert comme le montre la relation (31).

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \ln \left[\left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \right] \quad (31)$$

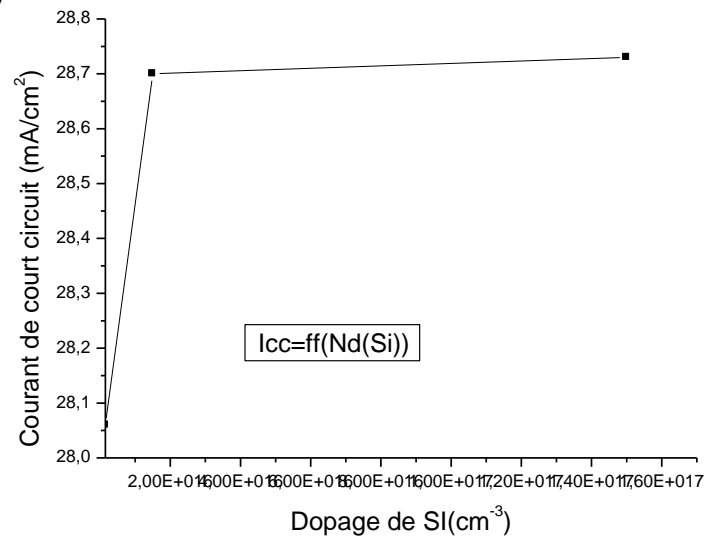
5.5 Influence de la concentration du dopage du substrat

L'impact de la variation de la concentration du dopage du substrat sur les performances des cellules solaires ITO/Si (p) est illustré sur les figures IV.7 a, b, c, d. Les paramètres électriques correspondants sont donnés en Annexe B.

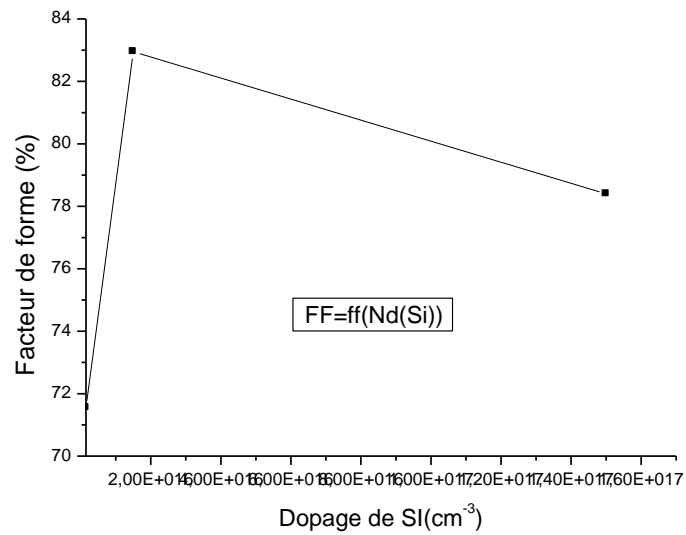
(a)



(b)



(c)



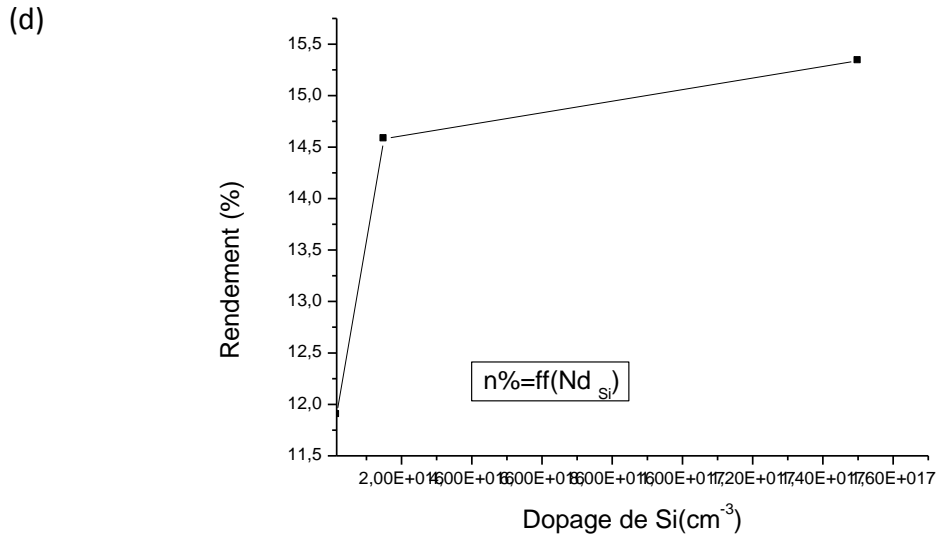


Figure IV.7. Effet de la variation du dopage de silicium sur : (a) la tension de circuit ouvert, (b) courant de court-circuit, (c) facteur de forme, (d) rendement.

A partir de ces figures, nous remarquons une augmentation considérable du rendement de conversion de la cellule solaire ITO/Si (p) suite à l'augmentation de la concentration du dopage du substrat et ce, grâce à l'accroissement de la conductivité du substrat et à une réduction des pertes résistives.

5.6 Influence de l'épaisseur de l'ITO

La figure IV.8 représente la variation du rendement de conversion des cellules solaires ITO/Si simulées en fonction de l'épaisseur de l'émetteur ITO. Les paramètres électriques correspondants aux cellules solaires sont regroupés dans le tableau IV.3.

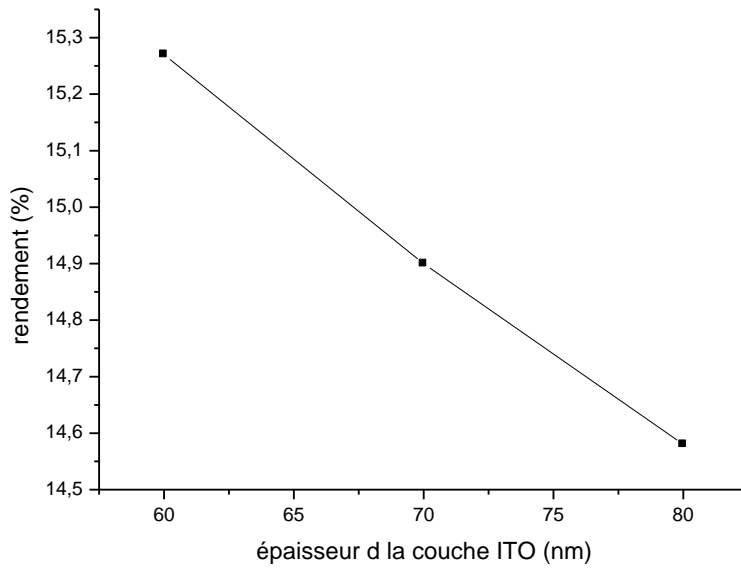


Figure IV.8. Variation du rendement de conversion des cellules solaires ITO/Si en fonction de l'épaisseur de l'émetteur ITO.

Epaisseur d'ITO (nm)	V_{CO} (mV)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
60	621,7	27,27	88,49	15,27
70	621,7	28,87	83,02	14,9
80	621,7	28,27	82,95	14,58

Tableau IV.3. Paramètres électriques de la cellule solaire ITO/p-Si simulée pour différentes épaisseurs de l'émetteur ITO.

L'épaisseur de l'émetteur ITO permettant le meilleur rendement est de 60 nm. Au-delà de cette valeur, nous observons une diminution du rendement qui peut être expliquée par une réduction de la probabilité de la collection des porteurs de charge suite à la distance à parcourir dans un émetteur plus large.

5.7. Influence de la température

La figure IV.9 montre l'impact de la température sur la caractéristique I(V) des cellules solaires ITO/Si (p). Nous remarquons que ces cellules sont plus performantes à la température ambiante (300 K). Au-delà de cette valeur, nous observons une diminution de la tension avec l'augmentation de la température de la cellule par contre la variation du courant est très petite (insignifiante).

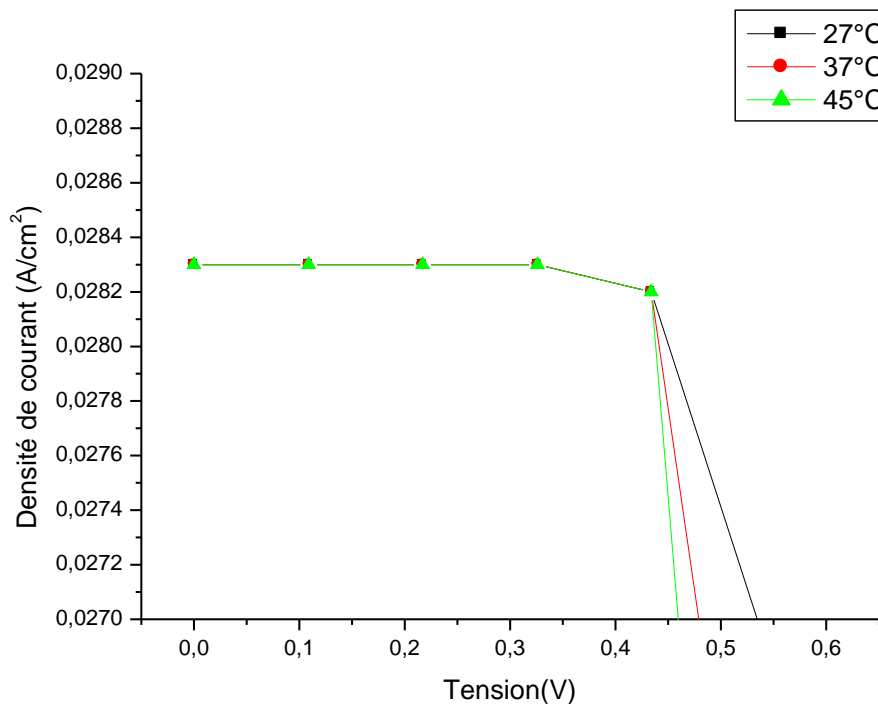


Figure IV.9. Effet de la température sur la caractéristique I(V) des cellules solaires ITO/Si (p)

L'allure du rendement η en fonction de la température est illustrée sur la Figure IV.10. On peut voir que l'augmentation de la température mène à une diminution du rendement de la cellule solaire dans l'intervalle $T=300-330\text{ K}$. Ceci peut être expliqué par la décroissance de la tension de circuit ouvert (tableau IV.4) et à la diminution de la mobilité des porteurs avec l'augmentation de la température.

Température (K)	V_{CO} (mV)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
300	621,7	28,27	82,95	14,58
310	603,1	28,27	82,4	14,05
318	589,5	28,27	80,85	13,47
328	572,5	28,27	74,18	12,01

Tableau IV.4. Paramètres électriques des cellules solaires ITO/Si (p) en fonction de la température.

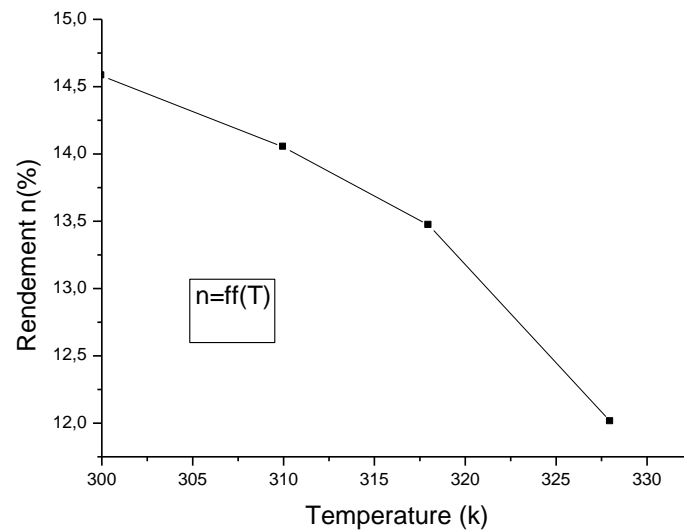


Figure IV.10. Variation du rendement (η) en fonction de la température.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation des cellules solaires ITO/Si et nous avons étudié l'effet de la variation de plusieurs paramètres structuraux sur leurs performances photovoltaïques.

Les cellules solaires ITO/Si un dopage du substrat de $1.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ présentent les meilleures performances photovoltaïques avec un rendement η de 15% (voir Annexe B), ce rendement de simulation est conforme au rendement expérimental obtenu par Kobayashi et al [23].

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a concerné l'étude et la simulation des cellules solaires à hétérojonctions de type ITO/Si (p) à l'aide du simulateur AFORS-HET.

Les cellules solaires à hétérojonctions utilisant les semiconducteurs transparents (TCO) présentent aujourd'hui une évolution considérable avec de bons rendements de conversion et des processus de fabrication moins coûteux. Ces bons rendements peuvent être expliqués par la présence de la couche TCO qui joue un double rôle celui d'une couche antireflet vu sa forte transparence et émetteur grâce à sa bonne conductivité.

Nos cellules photovoltaïques à hétérojonction ITO/Si utilisent des substrats en silicium de type p. Les calculs effectués en fonction des travaux de sortie des deux matériaux constituant la cellule solaire, ont montré la formation d'une barrière de potentiel entre l'ITO et le Si donc cette structure ITO/Si remplit sa condition d'utilisation comme cellule solaire.

Nous avons effectué plusieurs simulations en faisant varier certains paramètres structuraux à savoir l'épaisseur et le dopage du substrat, épaisseur de la couche d'ITO ainsi que la température pour pouvoir évaluer leurs influences sur les performances photovoltaïques des cellules solaires. Nous concluons que les cellules solaires ITO/Si ayant une épaisseur de silicium de 300 μm dopé à $1.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et une couche d'ITO d'épaisseur 60 nm, présentent les meilleurs paramètres photovoltaïques : tension de circuit ouvert de 0.68 V ; courant de court-circuit de 28.73 mA/cm² ; facteur de forme de 0.78 et un rendement de 15% qui sont conformes aux résultats de la littérature.

Nos résultats de simulation ont démontré les potentialités importantes de ces cellules solaires à hétérojonctions ITO/Si en terme d'amélioration du rendement de conversion tout en réduisant les coûts de fabrication.

En terme de perspectives, il serait intéressant de réaliser d'autres simulations en intégrant une double couche antireflet dans le but d'améliorer davantage les performances de la cellule solaire ITO/p-Si.

Références

- [1] "Les technologies solaires de production d'électricité", Dossier d'information du Service pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France en Allemagne – Octobre 2008.
- [2] Benoit Chavillon, "Synthèse et caractérisation d'oxydes transparents conducteurs de type p pour applications en cellules solaires à colorant". Archive ouverte HAL, 2012.
- [3] N Manavizadeh, F.A Bonoumad, et al., Thin Solid film Vol. 517 pp. 2324-2327, 2009.
- [4] T.Goudjil. Thèse de magister, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.
- [5] H.Liu et al , "Transparent conducting oxides for electrode application in light emitting and devices" superlattices and Microstructures Vol.48, pp458-484, 2010.
- [6] J. gregory et al., "discovery-based desing of transparent conducting oxide film", thin solid film ,Vol .515, pp. 7025-7052, 2007
- [7] Roy G. Gordon, "Transparent conducting oxides" MRS Bulletin, Vol. 25 pp. 53, 2000.
- [8] L. Gupta, A. Mansingh and P.K. Srivastava, Thin Solid Films, Vol. 176, pp. 33, 1989.
- [9] K. Daoudi. Thèse de doctorat, Claude Bernard, Lyon 2003.
- [10] J.C.Manifacier, L. Szepessy, et al, Mat., Res.Bull.Vol. 14, pp. 163 – 175, 1979.
- [11] M.C.Radhaksna, M.R.Rao, Paramana, Vol.9, No, 1 pp. 1 – 6, 1977.
- [12] Y. LI, X. LIU, Y. ZOU, Y. GUO, "The growth morphology of ZnO hexangular tubes synthesized by the solvothermal method", Materials Science-Poland, Vol. 27, No. 1, (2009)
- [13] H.J.Mathieu,E.Bergmann,R.Gras, "traité des matériaux.Analyse et technologie des surfaces", Presse polytechnique et universitaires romandes Lausanne, 2003.
- [14] Fatima Hadjersi, thèse de Magister, "Investigation des propriétés structurales,optiques électriques des films ITO élaborés par pulvérisation cathodique RF;Effet du recuit 2011.
- [15] S.Ponce-Alcantra,C. del Canizo, " Integration of silicon nitride layers in multicrystalline silicon solar cell processes", 21 st European photovoltaic solar energy conference,Germany,2006.

- [16] Thibaut Desrues, "Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière", thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009.
- [17] Delfina Munoz Cervantes, thèse de doctorat, polytechnique de catalogue 2008.
- [18] S. Roy et al, "Comparative simulation study between n-type and p-type silicon solar cells and the variation of efficiency of n-type solar cells by the application of passivation layer with different thickness using AFORS HET and PC1D", IOSR Journal of Engineering, ISSN 2250 – 3021, pp. 41-48, 2012.
- [19] C. Leendertz and al, "Modeling an a-Si:H/c-Si solar cell with AFORS HET", ISBN 978-3-642-2275, 2012.
- [20] M. Huang et al, the 6 th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp. 655 – 656, DOI:10.13140/RG.2.1.2799.5681, 2015.
- [21] A. Chen, K. Zhu, Solar Energy, Vol. 107, pp. 195 – 201, 2014.
- [22] Woong-Kyo Oh et al, Materials Research Bulletin, Vol. 47, pp. 3032 – 3035, 2012.
- [23] H. Kobayashi, Y. Kogetsu, T. Ishida, Y. Nakato, J. Appl. Phys. Vol. 74, pp. 4756, 1993.

Annexe A

Epaisseur de la base (μm)	V_{co} (mV)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
150	601,4	26,31	82,7	13,08
200	609,9	27,17	82,73	13,71
250	616,7	27,79	82,92	14,21
300	681,1	28,27	82,95	14,58

Annexe B

Dopage de la base (cm^{-3})	V_{co} (mV)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
$1,5 \cdot 10^{15}$	592,9	28,06	71,55	11,9
$1,5 \cdot 10^{16}$	621,7	28,7	82,95	14,58
$1,5 \cdot 10^{17}$	681,1	28,73	78,4	15,34

Quelques mots clés

Photovoltaïque

Semi-conducteur

Cellules solaires

Hétérojonction

Oxyde d'indium

Matériaux transparent

Domaine du visible

Concentration maximale

Substrat

Films minces

Travail de sortie

Conductivité

Diagramme des bandes

rayonnement