

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 D'informatique
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

**Mémoire de Fin d'Etudes
de MASTER ACADEMIQUE**
Filière : **Génie Electrique**
Spécialité : **Génie Microélectronique**

Présenté par
Ali Djafour

Thème

**Etude et simulation d'une cellule solaire à hétérojonction de type
ZnO/n-Si**

Mémoire soutenu publiquement le 09/11/2015 devant le jury composé de :

Arezki BENFDILA
Dalila HOCINE
Djedjiga HATEM
Amel SIDI SAID

Professeur
M.C.B
M.C.B
M.A.A

Président
Encadreur
Examineur
Examineur

UMMTO
UMMTO
UMMTO
UMMTO

Remerciements

Louange à DIEU qui ma comblé de faveurs, et apporté son aide afin de réaliser le travail exposé tout le long de ce mémoire.

Je tiens à remercier vivement ma promotrice Mlle Dalila HOCINE, Maître de Conférences B à l'UMMTO, je lui exprime aussi toute ma reconnaissance pour sa compréhension, pour m'avoir aidé et conseillé dans les moments difficiles, ainsi pour son dynamisme et sa collaboration tout au long de ce mémoire. Que cet espace le prenne à témoin tout en lui révélant l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie Mlle Samira OUSIDHOUM pour toute son aide précieuse.

Mes vifs remerciements vont aussi à monsieur Arezki BENFDILA, responsable de la formation, tous les enseignants micro-électronique.

Je remercie sincèrement les membres de jury qui ont accepté aimablement d'examiner et de juger mon travail, je leur fais honneur de respect.

Je tiens également à remercier tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

Je dédie ce travail à ...

Je dédie ce modeste travail comme fruit de toutes mes études :

-A ma très chère mère et mon très cher père, qui ont passé des nuits longues pour mon bonheur et qui se sont fatigués pour mon repos, qui m'ont encouragé à aller au bout de mes objectifs et qui m'ont accompagné durant toutes mes années d'études, et dans les moments difficiles, qui ont prié pour mon succès et mon bonheur. Jamais je ne pourrai vous remercier suffisamment pour tout ce que vous avez fait pour moi Que dieu le tout puissant vous préserve, vous donne la santé, le bonheur et une longue vie.

-A mes frères et Sœurs

-A ma grand-mère très chère à mes yeux,

-A ma fiancée Souhila

-A mes confrères et consœurs,

-A tous mes amis, avec lesquels j'ai passé d'agréable moment tout au long de mon cursus.

Ali DJAFOUR

SOMMAIRE

Introduction générale

Chapitre I : L'oxyde de zinc : propriétés et applications

I.	Introduction.....	8
II.	Les principaux oxydes transparents conducteurs (TCO).....	8
III.	L'oxyde de zinc en couches minces.....	8
	III.1 Structure électronique	9
	III.2 Les propriétés du ZnO.....	9
	III.2.1 Propriétés structurales	9
	III.2.2 Propriétés optiques	10
	III.2.3 Propriétés électriques.....	11
IV.	Le dopage du ZnO.....	12
	IV.1 Dopage de type n.....	12
	IV.2 Dopage de type p	12
V.	Les applications du ZnO	12
	V.1 Application optoélectronique.....	13
	V.2 Application photovoltaïque	14
VI.	Conclusion.....	15
	Références.....	16

Chapitre II : Structure et fonctionnement des cellules solaires

I.	Introduction.....	18
II.	Le spectre solaire.....	18
III.	L'effet photovoltaïque.....	19
IV.	La cellule solaire	19
	IV.1 Principe de fonctionnement	20
	IV.2 Schéma électrique équivalent	21
	IV.3 Caractéristique courant-tension	22
	IV.4 Paramètres électriques d'une cellule solaire.....	23
V.	Les constituants de base d'une cellule solaire	24
VI.	Les différentes filières photovoltaïques	26
	VI.1 La filière à base de silicium cristallin.....	26
	VI.2 Les cellules solaires à multijonctions	26
	VI.3 Les cellules solaires hétérojonctions	27
	VI.4 Les cellules solaires en couches minces	27
VII.	Conclusion	27
	Références.....	28

Chapitre III : Etude des cellules solaires à hétérojonctions

I.	Introduction.....	30
II.	Etude de la structure métal/semiconducteur.....	30
	II.1 Cas où $\varnothing_m = \varnothing_s$	30
	II.2 Cas où $\varnothing_m > \varnothing_s$	31
	II.2.1 Semiconducteur de type n.....	31
	II.2.2 Semiconducteur de type p.....	32
	II.3 Cas où $\varnothing_m < \varnothing_s$	32
	II.3.1 Semiconducteur de type n.....	32
	II.3.2 Semiconducteur de type p.....	33
III.	La cellule solaire de type métal/semiconducteur (Schottky)	34
	III.1 Diagramme des bandes d'énergie.....	35
	III.2 Principe de fonctionnement.....	35
IV.	La cellule solaire de type métal/isolant/semiconducteur.....	35
	IV.1 Diagramme des bandes d'énergie.....	36
	IV.2 Influence de la couche isolante interfaciale.....	36
V.	La cellule solaire à hétérojonction de type ZnO/n-Si.....	36
	V.1 Diagramme des bandes d'énergie.....	37
	V.2 Principe de fonctionnement.....	37
VI.	Conclusion.....	38
	Références.....	39

Chapitre IV : Simulation des cellules solaires à hétérojonctions de type ZnO/n-Si

	Introduction.....	41
I.	Présentation du logiciel AFORS-HET.....	41
II.	La structure de la cellule solaire simulée	44
III.	Paramètres de simulation de la cellule solaire ZnO/n-Si.....	44
IV.	Résultats de la simulation de la cellule solaire ZnO/n-Si.....	45
	IV .1 Diagramme des bandes d'énergies.....	45
	IV.2 La caractéristique courant-tension	46
V.	Paramètres influençant les performances des cellules solaires ZnO/n-Si.....	46
	V.1 Effet de l'épaisseur du substrat.....	46
	V.2 Effet du dopage du substrat.....	48
	V.3 Effet du dopage du ZnO.....	51
	V.4 Effet de l'épaisseur du ZnO.....	53
	Conclusion	55
	Conclusion générale	58

LISTE DE FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1: Structure de bande du ZnO (la référence zéro correspond au maximum d'énergie de la bande de valence).

Figure I.2 : Représentation des structures de ZnO : (a) cubique rocksalt, (b) cubique zinc blende et (c) hexagonale wurtzite. Les sphères grises représentent les atomes de Zn et les noires ceux d'oxygène.

Figure I.3 : Transmission optique des films minces ZnO:Al recuits à 500 °C.

Figure I.4 : Effet de la couche antireflet sur la cellule photovoltaïque

CHAPITRE II

Figure II.1 : Définition de l'Air Masse, spectre d'émission solaire sous AM0 et AM1,5.

Figure II.2: Jonction n/p éclairée, cellule photovoltaïque.

Figure II.3: Structure d'une cellule solaire au silicium.

Figure II.4: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque .

Figure II.5: caractéristique courant-tension à l'obscurité et sous éclairage d'une cellule

Figure II.6: Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium.

CHAPITRE III

Figure III.1 : Contact métal/semiconducteur avec $\phi_m = \phi_s$. (a) Avant contact. (b) A l'équilibre thermodynamique, après la mise en contact.

Figure III.2 : Diagramme de bandes d'énergie d'un contact métal/semiconducteur de type n, avec $\phi_m > \phi_s$. (a) Avant contact. (b) Après la mise en contact.

Figure III.3 : Diagramme de bandes d'énergie d'un contact métal/semiconducteur de type p avec $\phi_m > \phi_s$. (a) Avant contact. (b) En contact, à l'équilibre thermodynamique.

Figure III.4 : Diagramme de bandes d'énergie d'un contact métal/semiconducteur de type n, avec $\phi_m < \phi_s$. (a) Avant contact. (b) En contact, à l'équilibre thermodynamique.

Figure III.5 : Diagramme de bandes d'énergie d'un contact métal/semiconducteur de type p, avec $\phi_m < \phi_s$. (a) Avant contact. (b) En contact, à l'équilibre thermodynamique.

Figure III.6 : Diagramme de bandes d'énergie d'une photopile Schottky sous illumination

Figure III.7 : Diagramme de bandes d'énergie d'une cellule solaire de type Métal/Isolant/Semiconducteur (MIS)

Figure III.8 : Diagramme de bandes d'énergie : (a) d'une ZnO/n-Si, (b) ZnO/p-Si

CHAPITRE IV

Figure IV.1.a : Fenêtre principale de l'interface graphique du logiciel de simulation.

Figure IV.1.b : Fenêtre correspondante à la définition de la structure.

Figure IV.1.c : Mode de calcul et illumination de la cellule.

Figure IV.2. Structure de la cellule solaire

Figure IV.3 Diagramme des bandes d'énergie de la cellule solaire ZnO/n-Si

Figure IV.4. Caractéristique J(V) de la cellule solaire ZnO/n-

Figure IV.5: Variation de courant de court circuit en fonction de l'épaisseur de substrat.

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

Figure IV.7 : Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de substrat.

Figure IV.8 : Variation de rendement en fonction de l'épaisseur de substrat.

Figure IV.9 : Variation du courant de court-circuit en fonction du dopage de silicium.

Figure IV.10 : Variation de la tension de circuit ouvert en fonction du dopage de silicium.

Figure IV.11: Variation du facteur de forme en fonction du dopage de silicium.

Figure IV.12: Variation du rendement en fonction du dopage de silicium.

Figure IV.13: Variation de tension de circuit ouvert en fonction du dopage de ZnO.

Figure IV.14: Variation de courant de court-circuit en fonction du dopage de ZnO.

Figure IV.15: Variation du facteur de forme en fonction du dopage de ZnO.

Figure IV.16: Variation du rendement en fonction du dopage de ZnO.

Figure IV.17: Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO.

Figure IV.18: Variation du courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO.

Figure IV.19: Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO.

Figure IV.20: Variation de rendement fonction de l'épaisseur de la couche ZnO

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Le développement scientifique et technologique que connaît le monde a généré des problèmes liés à la surconsommation de l'énergie qui se répercutent négativement sur l'environnement et l'équilibre de notre planète terre. La satisfaction des besoins énergétiques est un problème qui se pose avec acuité et suscite l'engouement des pays riches à prospecter de nouveaux sites d'énergies fossiles et à se donner les moyens matériels pour le développement des énergies renouvelables qui présentent l'unique alternative après épuisement des énergies fossiles.

Les énergies renouvelables sont des énergies qui à l'inverse des énergies dites de stock (pétrole, gaz, charbon...) sont basées sur l'exploitation d'un flux (soleil, vent, eau) qui se renouvelle en permanence. Parmi celles-ci, l'énergie solaire offre un gigantesque gisement énergétique, car chaque année la terre reçoit du Soleil plus de 14000 fois la production d'énergie annuelle mondiale [15]. Il paraît donc évident que si on en transforme une petite partie en énergie utilisable, son potentiel est énorme. La technologie solaire permettant de transformer cette énergie en électricité (photovoltaïque (PV)) est une voie très intéressante pour remplacer en partie les moyens de production traditionnels. De plus, le PV permet une production plus propre que son équivalent pétrole et charbon.

L'énergie solaire à conversion photovoltaïque, inépuisable et propre, occupe une place prépondérante dans l'éventail des énergies renouvelables. Cette forme d'énergie, assurée fondamentalement, par des cellules solaires au silicium dont la fabrication est de plus en plus maîtrisée.

Le module photovoltaïque est lui même constitué de plusieurs cellules interconnectées électriquement en série ou en parallèle de manière à produire de l'électricité à une certaine tension. L'efficacité d'un module PV est évaluée par son rendement de conversion qui est le rapport entre l'énergie solaire arrivant sur le module et l'énergie électrique produite par celui-ci. Les rendements des modules dépendent en grande partie du type de cellules utilisées pendant la fabrication de celui-ci.

Une grande variété de cellules PV existe, on peut les distinguer en trois grandes familles

- 1^{ère} génération : cellules cristallines
- 2^{ème} génération : couches minces ("thin films")
- 3^{ème} génération : multijonction, cellules à concentration, ...etc

Dans le but d'améliorer le rendement des cellules solaires à hétérojonction (3^{ème} génération) plusieurs recherches au niveau des laboratoires sont consacrées en utilisant la simulation numérique, c'est dans ce contexte que se situe notre travail, qui se divise en quatre chapitres comme suit :

- le premier chapitre sera consacré à l'étude de l'oxyde de zinc (ZnO) en illustrant ses propriétés optiques, électriques, et structurales. Nous avons cité les dopants du ZnO pour obtenir le type p (p-ZnO) ou n (n-ZnO) ainsi que ses différentes applications.

- le deuxième chapitre sera consacré à la présentation de la cellule solaire standard, ses constituants, son principe de fonctionnement, ainsi que les différentes filières photovoltaïques.
- le troisième chapitre portera sur l'étude des cellules solaires à hétérojonctions, en premier lieu l'étude de la structure métal/semiconducteur, puis les cellules solaires de type métal/semiconducteur et métal/isolant semiconducteur. Nous avons présenté également la cellule de type ZnO/Si et décrit son principe de fonctionnement.
- le quatrième chapitre sera consacré à la simulation de la cellule solaire de type ZnO/Si, et l'interprétation des résultats de la simulation.

Chapitre 1 : L'oxyde de zinc : propriétés et applications

I. Introduction

L'oxyde de zinc (ZnO) est récemment apparu en tant que concurrent sérieux très sollicité pour ses propriétés optiques et électriques intéressantes. C'est un matériau qui, pendant longtemps n'a été utilisé que pour des applications chimiques et pharmaceutiques. Dans ce chapitre nous présenterons le matériau ZnO, ses domaines d'applications et ses propriétés optiques et électriques qui le rendent plus prometteur dans le domaine photovoltaïque en tant que oxyde transparent conducteur.

II. Les principaux oxydes transparents conducteurs (TCO)

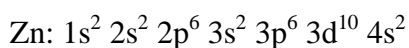
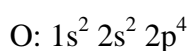
Les oxydes transparents conducteurs (Transparent Conductive Oxides) TCO sont des semiconducteurs dégénérés à large gap. Ils présentent la double propriété d'être de bons conducteurs électriques et transparents dans le domaine du visible. Les TCO semiconducteurs importants sont ZnO dopé, In_2O_3 , SnO_2 , aussi bien que les ternaires composés Zn_2SnO_4 , ZnSnO_3 , $\text{Zn}_2\text{In}_2\text{O}_5$, $\text{Zn}_3\text{In}_2\text{O}_6$, In_2SnO_4 , CdSnO_3 , et les oxydes multi-composants qui consistent en combinaison de ZnO, In_2O_3 et SnO_2 . L'ITO, SnO_2 et le ZnO sont les couches minces les plus étudiées pour la plupart des applications photovoltaïques.

III. L'oxyde de zinc en couches minces

Les couches minces d'oxyde de zinc sont réalisées en utilisant une grande variété de techniques dues à la diversité des applications de ce matériau. Elles peuvent être obtenues en opérant en phase liquide ou en phase vapeur, et par des procédés physiques ou chimiques. Grâce à ses propriétés semi-conductrices, piézo-électriques, optiques et catalytiques [1], l'oxyde de zinc en couches minces a de multiples applications. Il occupe une place importante dans l'industrie électronique.

1. Structure électronique

On rappelle que les structures électroniques de bande de l'oxygène et du zinc sont :



La structure électronique de bandes montre que le ZnO est un semi-conducteur à gap direct, le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont situés au même point. La largeur de la bande interdite est de l'ordre de 3,3 eV (figure I.1).

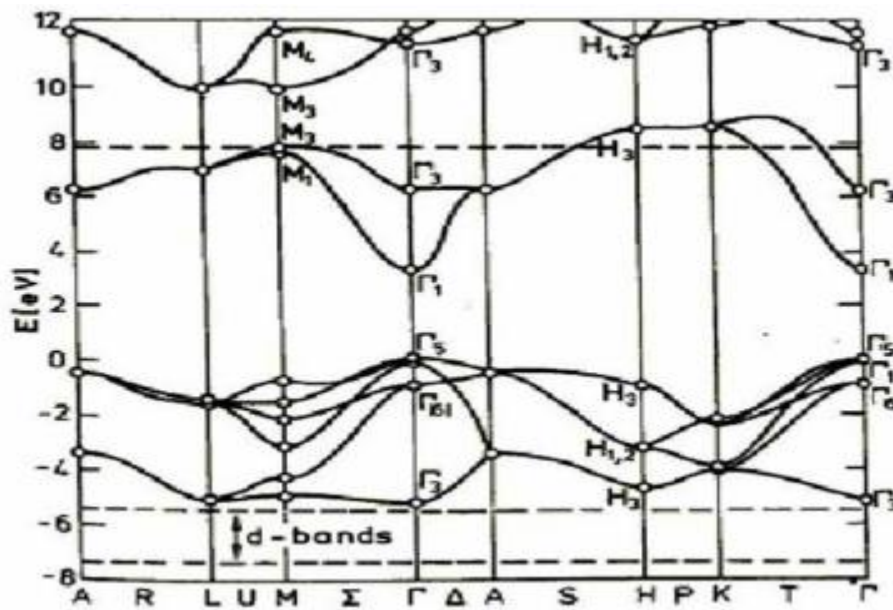


Figure I.1: Structure de bande du ZnO (la référence zéro correspond au maximum d'énergie de la bande de valence [3]).

2. Les propriétés du ZnO

Les films minces d'oxyde de zinc (ZnO) sont des semi-conducteurs de large gap, ils sont transparents dans le visible, dans le proche infrarouge et bons conducteurs.

2.1 Propriétés structurales

La majorité des semi-conducteurs du groupe II-VI cristallisent dans la structure cubique zinc blende ou hexagonale du type wurtzite. On connaît actuellement trois phases cristallographiques différentes pour l'oxyde de zinc (figure I.2) : la phase c (Wurtzite), la phase b (Blende) et la phase a (Rocksalt). La structure Wurtzite (hexagonale) est la structure thermodynamiquement stable à température ambiante. La structure Blende

(cubique) est observée lorsque le ZnO est déposé sur certains substrats de symétrie cubique, La structure Rocksalt (NaCl) peut être obtenue à haute pression hydrostatique (10-15 Gpa).

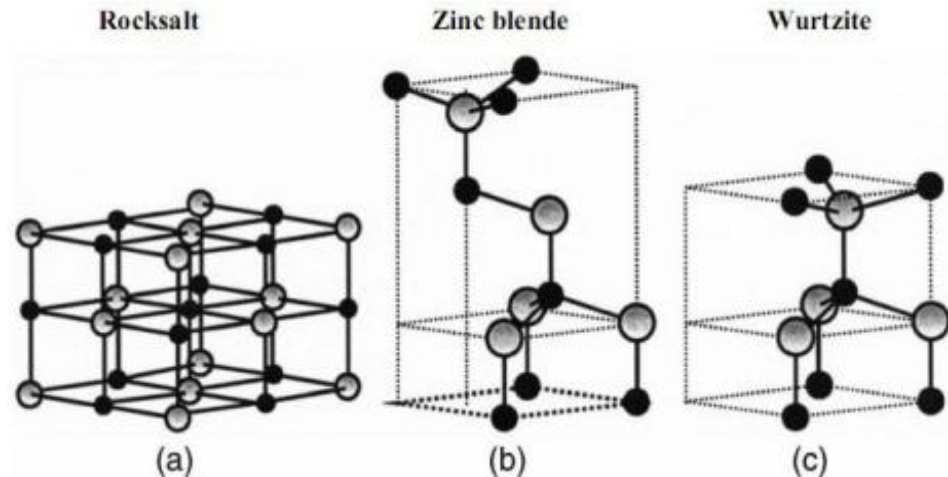


Figure I.2 : Représentation des structures de ZnO : (a) cubique rocksalt, (b) cubique zinc blende et (c) hexagonale wurtzite. Les sphères grises représentent les atomes de Zn et les noires ceux d'oxygène [3].

2.2 Propriétés optiques

Le ZnO est un matériau transparent dans le visible ayant un indice de réfraction égal à 2, il présente un intérêt considérable qui réside dans ses propriétés remarquables telles que la largeur de sa bande interdite qui permet d'émettre dans le visible et l'ultraviolet. D'autre part, son gap direct induit des recombinaisons radiatives très efficaces [4].

En couches minces, on peut distinguer trois zones, selon le spectre de la réflexion et de la transmission de ZnO :

- Dans l'ultraviolet, il y a une absorption totale de la lumière par les électrons de la bande de valence, qui transitent vers la bande de conduction. La transmission décroît rapidement et s'annule.

- Dans le visible, la transmission est élevée ; alors que l'absorption est très faible.

- Dans l'infrarouge, la zone d'absorption par les porteurs libres est marquée par une transmission faible à nulle et une réflexion élevée [5].

La courbe suivante (Figure I.3) [6] résume les différentes zones de transmission:

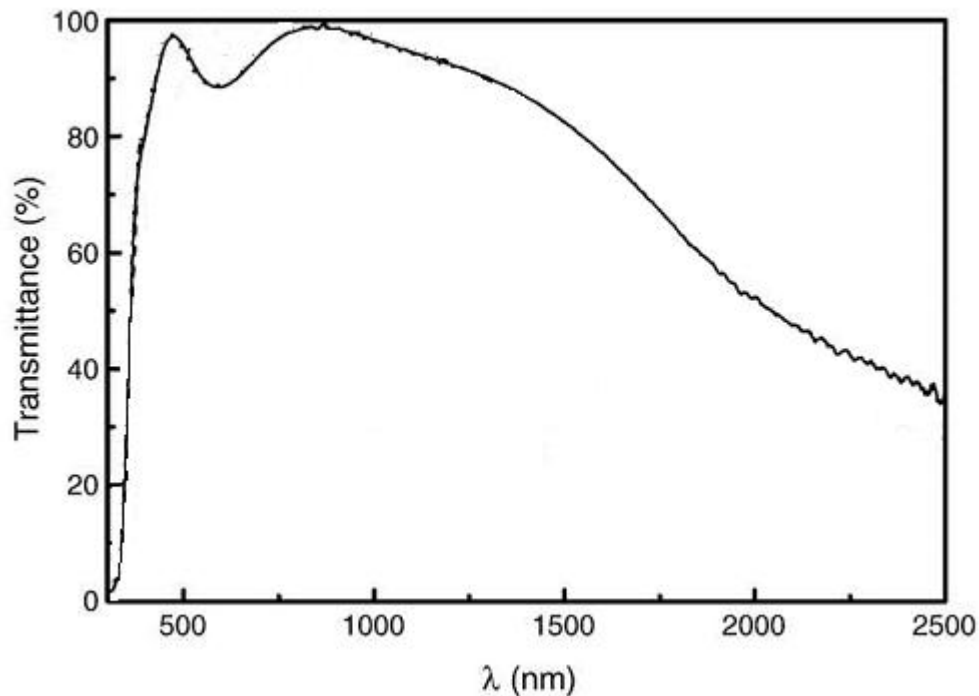


Figure I.3 : Transmission optique des films minces ZnO:Al recuits à 500 °C [6].

2.3 Propriétés électriques

L'oxyde de zinc présente un gap direct (figure I.1) ; 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 de Brillouin).

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 stoechiométrique est un isolant. Le dopage permet d'améliorer la conductivité électrique de ce matériau. Les éléments chimiques qui permettent un dopage type n du ZnO sont l'aluminium, le gallium et l'indium [7,8].

Ces dernières années, des travaux de recherches se sont orientés vers l'étude et la synthèse de l'oxyde de zinc dopé p [8], parmi les dopants qui permettent d'obtenir ce type de dopage, il y a l'azote, et le co-dopage azote-aluminium.

2.3.1 Le dopage du ZnO

Le dopage de ZnO est nécessaire pour les applications dans les dispositifs optoélectronique, les détecteurs de gaz et notamment les cellules solaires photovoltaïques. Le dopage peut être utilisé pour obtenir des propriétés électriques désirées (type n ou type p).

a) Dopage de type n

Généralement la conductivité électrique de type n de ZnO est facilement obtenue par le dopage avec les éléments des deux groupes [9]:

- **Groupe III: Al, Ga, In** : en substituant les sites Zn ;
- **Groupe VII: Cl, F** : en substituant les sites d'oxygène O.

Ces éléments s'incorporent dans le réseau de ZnO en formant des niveaux donneurs peu profonds qui contribuent à la conduction électrique du ZnO. Une conductivité électrique élevée des couches minces de ZnO avec une concentration des électrons libres d'environ 10^{20} cm^{-3} a été obtenue pour le ZnO dopé Al et le ZnO dopé Ga [10].

b) Dopage de type p

L'une des difficultés de l'utilisation du ZnO pour les nouvelles applications optoélectroniques est l'obtention du dopage de type p fiable et reproductible [9]. Les candidats pour ce dopage sont les éléments des deux groupes :

- **Groupe I: Li, Na, K, Cu, Ag** : en substituant ces atomes dans les sites Zn ;
- **Groupe V: N, P, As** : en substituant ces atomes dans les sites d'oxygène O.

Mais certains d'entre eux forment des niveaux accepteurs profonds et par conséquent ne sont pas très utiles [9]. Les calculs ont prévu que l'azote (N) est un bon candidat pour les dopants de type p dans le ZnO [11].

VI. Les applications du ZnO

Les domaines d'applications du ZnO sont extrêmement variés. L'oxyde de zinc est déjà utilisé dans certains domaines comme la catalyse, les varistances (résistances variables) ou les crèmes de protection solaire, mais c'est bien dans le domaine de

l'électronique, de l'optique et de la mécanique que les propriétés du ZnO paraissent les plus prometteuses.

VI.1 Application optoélectronique

Depuis plusieurs années, un effort de recherche important a été développé dans les domaines des applications des semiconducteurs à large bande interdite tel que le ZnO en optoélectronique. Les principaux objectifs sont la réalisation de détecteurs ultraviolets UV et la fabrication de diodes laser émettant dans le bleu ou l'UV. Cependant, l'enjeu du développement des émetteurs bleus est considérable puisque l'émission bleue est le dernier élément nécessaire en émetteur solide à la reconstitution de la lumière blanche. Les films de ZnO peuvent alors trouver des applications dans les affiches couleurs sur écrans plats. D'autres part, le développement de laser bleu et UV permet de réduire le diamètre de focalisation du faisceau émis, et donc, la mise au point de têtes de lecteurs capables de lire des données stockées en grande densité [12]. L'énorme potentiel pour l'usage du ZnO dans les applications optoélectroniques peut être expliqué dans le tableau II.1.

matériau	Structure cristalline	paramètres de la maille		Energie de gap (eV)	Energie de cohésion (eV)	Energie de fusion (eV)	Energie d'excitons (eV)
		a (nm)	c (nm)				
ZnO	Wurtzite	0.325	0.5207	3.37	1.89	2248	60
ZnS	Wurtzite	0.382	0.6261	3.8	1.59	2103	30
ZnSe	Zinc blende	0.566		2.7	1.29	1793	20
GaAs	Zinc blende	0.565		1.43	-	-	4.2
GaN	Wurtzite	0.319	5.185	3.39	2.24	1973	21
6H-SiC	Wurtzite	0.318	1.5117	2.86	3.17	>2100	-

Tableau I.1: La comparaison des principales propriétés des composés semiconducteurs [2].

VI.2 Application photovoltaïque

- **Electrode transparente**

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

Les couches minces de ZnO peuvent être utilisées comme contact transparent et diffuseur de la lumière pour les cellules solaires en couche minces [13].

- **Couche antireflet**

Le rendement d'une cellule solaire est limité par les multiples pertes qui s'y produisent. Les pertes relatives aux photons sont à l'origine d'une réduction considérable du rendement.

Ces pertes peuvent être dues à une mauvaise absorption, généralement liée au gap du matériau utilisé ou à une réflexion due au fait que le matériau possède un indice de réfraction élevé. Pour le silicium plus de 35% du flux lumineux incident est réfléchi, ce qui affecte considérablement le rendement des cellules photovoltaïques [14]. Pour améliorer l'efficacité des cellules solaires, le ZnO est utilisé comme couche antireflet déposée par différentes méthodes et selon des conceptions variées. En effet la (figure I.4) suivante montre l'apport de la couche antireflet sur la cellule solaire.

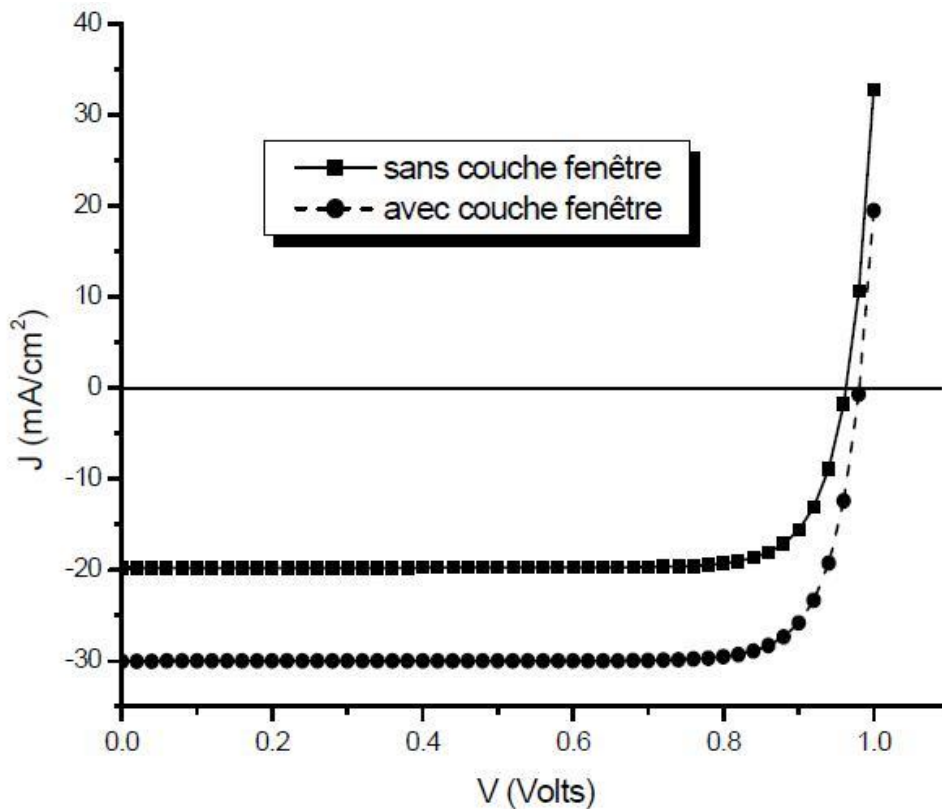


Figure I.4 : Effet de la couche antireflet sur la cellule photovoltaïque [2].

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les propriétés structurales, optiques et électriques du ZnO ainsi que ses domaines d'applications. Dans la suite de notre étude, nous allons nous focaliser sur l'application photovoltaïque de ce matériau en tant que émetteur et couche antireflet dans les cellules solaires à hétérojonctions et ce, grâce à sa transmittance élevée combinée à une bonne conductivité électrique.

Références

- [1] W. R.L. Lambrecht, A. V. Rodina, et al, "Valence-band ordering and magneto-optic exciton structure in ZnO". *Phys. Rev. B*, 65 , 075207, (2002).
- [2] K. Daoudi, Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard-Lyon 1, 2002.
- [3] Ü. Özgür, Ya. I. Alivov, C. Liu, et al, *journal of applied physics* 98. 041301, (2005).
- [4] J.T. Chen, J. Wang, R.F. Zhuo, D. Yan, et al, "The effect of Al doping on the morphology and optical property of ZnO nanostructures prepared by hydrothermal process", *Applied Surface Science* 255 (2009) 3959–3964.
- [5] J. EL GHOUL, "Elaboration et caractérisation des nanoparticules ZnO dopées Vanadium", Mémoire master, université de Tunis El MANAR (2007).
- [6] 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).
- [7] F. Ynineb, "Contribution à l'élaboration de couches minces d'Oxydes Transparents Conducteurs (TCO)". Thèse de Magister, Université Mentouri Constantine, (2010).
- [8] K. LAGHA- MENOUER, « Etude et réalisation d'une cellule solaire multicouches du type Si-SiO₂-SnO₂-ZnO par APCVD ». Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2011).
- [9] Ü. Özgür, Y. I. Alivov, C. Liu, et al, *J. Appl. Phys.* 98 (2005).
- [10] M. Lorenz, E. Kaidashev, H. V. Wenckstern, et al, *Solid-State Electronics*, 47 (2003).
- [11] A. Kobayashi, O. F. Sankey, J. D. Dow, *Phys. Rev. B* 28 (1983).
- [12] S.Uthanna, T.K.Subramanyam, B. Srinivasulu, et al, *optical mater.* (2002).
- [13] M. Purica, E. Budianu, E. Rusu, M. Danila and R. Gavrilă; *Thin Solid Films* (2002)
- [14] S. Ponce-Alcántara, C. del Cañizo and A. Luque, "Integration of silicon nitride layers in multicrystalline silicon solar cell processes". 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, (2006).
- [15] Smil V. Energy resources and uses: a global primer for the twenty-first century. *Current History* 101(653):126-132., 2002

Chapitre II : Structure et fonctionnement des cellules solaires

I. Introduction

Dans ce premier chapitre nous avons présenté les notions de base concernant le rayonnement solaire, le silicium, et la cellule solaire à homojonction que nous avons jugés utiles pour la compréhension du sujet.

II. Le spectre solaire

Le principe des convertisseurs photovoltaïques consiste à transformer l'énergie solaire en une énergie électrique. La connaissance du spectre solaire qui arrive sur la terre est donc indispensable.

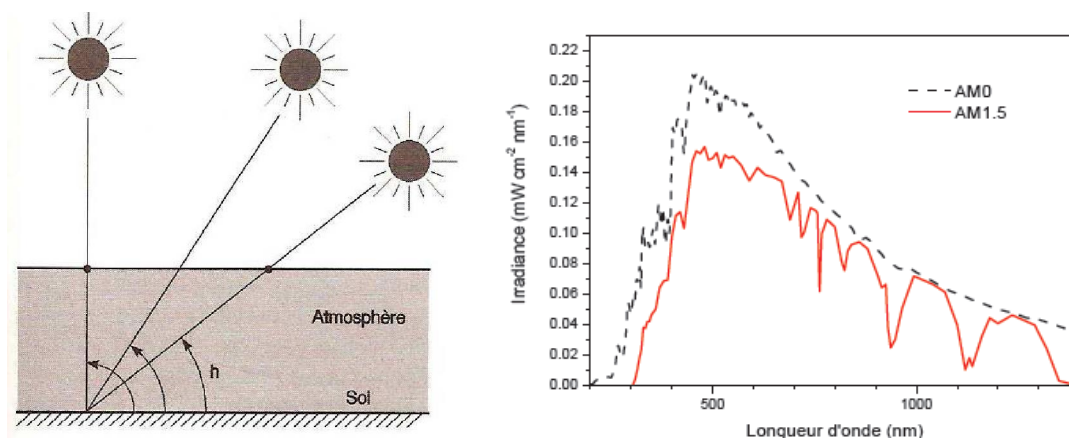


Figure II.1 : Définition de l'Air Masse, spectre d'émission solaire sous AM0 et AM1,5 [1 ,2]

On appelle constante solaire, la densité d'énergie qui atteint la frontière externe de l'atmosphère. Sa valeur est communément prise égale à 1360 W/m^2 [3 ,4], mais à la traversée de cette atmosphère, le spectre solaire subit une atténuation et une déformation. En effet, la couche d'ozone absorbe une grande partie du rayonnement ultraviolet. Le spectre solaire subit également l'influence d'autres molécules présentes dans l'atmosphère (O_3 , CO_2 , $\text{H}_2\text{O} \dots$) [6], lorsqu'il arrive à la surface de la terre il dépend de la couche d'air qu'il a traversée et donc de l'angle d'incidence. Si on fait face au soleil, on le voit à une certaine hauteur qu'on appelle 'hauteur apparente'. Celle-ci est l'angle h que fait le plan horizontal avec une droite pointée vers le soleil (figure II.1). La quantité h permet de déterminer la distance parcourue par les rayons du soleil à travers l'atmosphère. On introduit alors un nombre m , qu'on appelle Air Masse (AMm) et qui représente cette distance calculée en multiples de la distance parcourue si le soleil était à la verticale du lieu ($m=1/\sin(h)$).

AM0 : Hors atmosphère (applications spatiales)

AM1: Soleil au zénith du point d'observation.

AM1.5 : Soleil à 45° [5, 7].

On appelle STC (Standard Test Conditions), des conditions normalisées de test de panneaux solaires. Celles-ci sont caractérisées par un rayonnement de 1000W/m^2 , un spectre solaire AM1.5 et 25°C [6, 8].

III. L'effet photovoltaïque

III.1 Définition

L'effet photovoltaïque est le phénomène physique permettant la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique, il consiste en l'apparition d'une force électromotrice aux bornes d'un dispositif, appelé cellule solaire, soumis à un éclairage.

III.2 Principe de l'effet photovoltaïque

Le principe de l'effet photovoltaïque consiste en la génération de paires (électron/trou) dans un semi conducteur soumis à un éclairage, et la séparation de ces porteurs photogénérés par le biais du champ interne de la jonction, ce dernier est entraîné par la barrière de potentiel qui provient soit :

- D'un gradient de dopage dans le même matériau semi-conducteur : homojonction PN.
- D'un contact métal- semi-conducteur : structure MS ou diode Schottky, structure M.I.S.
- D'une jonction entre deux semiconducteur différents: hétérojonction.

IV. La cellule solaire au silicium

IV.1 Définition

Une cellule solaire (Figure II.2) est un dispositif électronique capable de transformer l'énergie solaire en énergie électrique, elle peut être conçue à base d'une homojonction ou d'une hétérojonction.

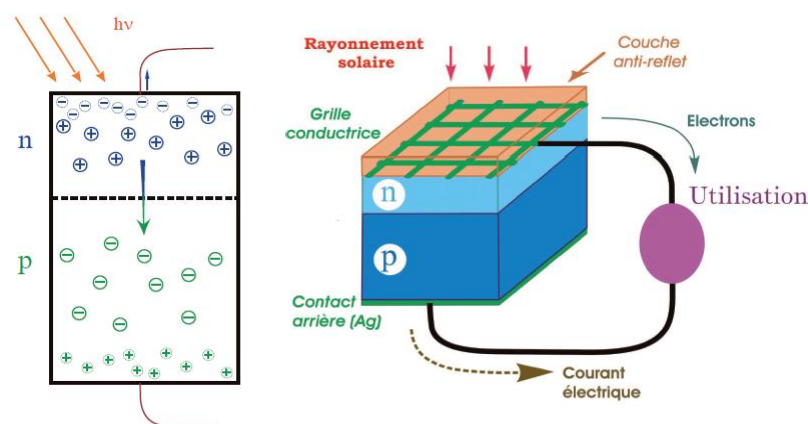


Figure II.2: Jonction n/p éclairée, cellule photovoltaïque [9]

IV.2 Le principe de fonctionnement

La cellule photovoltaïque classique en silicium est constituée d'une jonction P/N (Figure II.3). 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. 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 photocourant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un photo-courant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

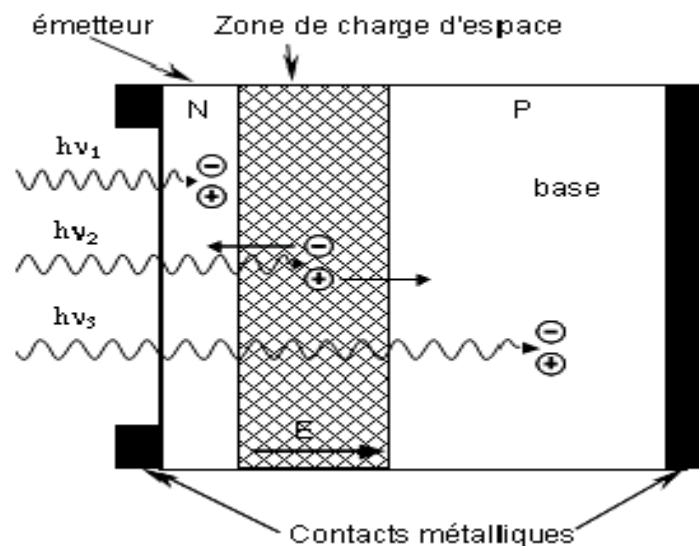


Figure II.3: Structure d'une cellule solaire au silicium [10]

La conversion photovoltaïque repose donc, sur trois principes :

- ✓ L'absorption de photons;
- ✓ La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres;
- ✓ La collecte de ces particules dans un circuit électrique.

Le courant délivré sur une charge par cellule solaire éclairée s'écrit :

$$J = J_{ph} - J_S \left(\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) \dots \dots \dots \text{(II.1)}$$

Où :

q : charge de l'électron ;

J_{ph} : densité de courant photogénéré ;

J_S : densité du courant inverse de saturation ;

V : tension ;

K : constante de Boltzmann ;

T : température (en K) ;

n : facteur d'idéalité de la diode (égale a 1 si la diode est idéale et égale a 2 si la diode est entièrement gouvernée par la génération /recombinaison).

IV.3 Schéma électrique équivalent

La figure II.4 représente un modèle électrique de la cellule photovoltaïque prenant en compte les différents facteurs limitatifs. On y retrouve le générateur de courant I_{ph} , correspondant au courant photogénéré ainsi que des résistances complémentaires, R_s et R_p , et deux diodes d_1 et d_2 . R_c est la résistance de charge.

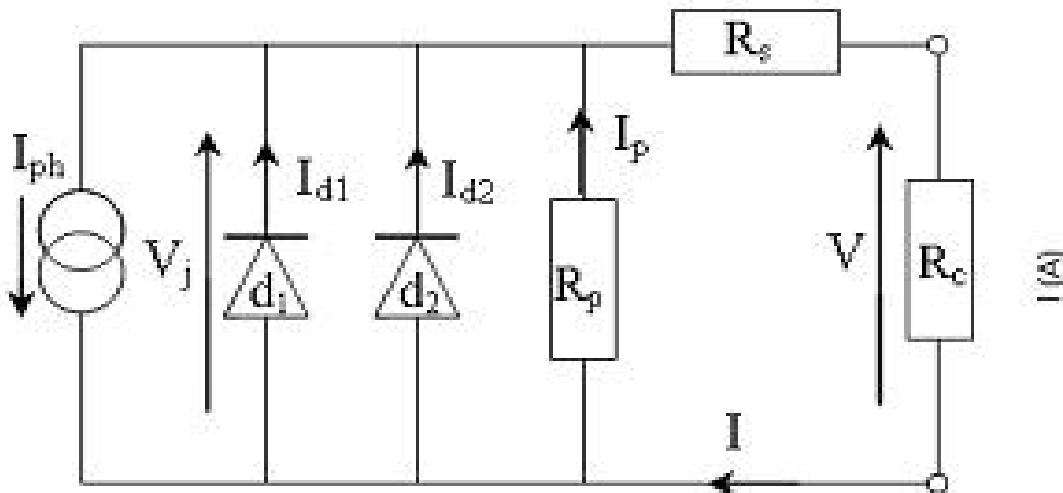


Figure II.4: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque .

La résistance série R_s est due à la résistivité des différentes couches de la cellule : émetteur, base et contacts métalliques (en particulier leur interface avec le semiconducteur). Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semiconducteur, et en

diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs.

La résistance parallèle ou de court-circuit R_p traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut, ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible.

L'équation du courant (I.1) devient [13] :

$$J = J_{ph} - J_1 - J_2 - \frac{V+J.R_s}{R_{SH}} \dots\dots\dots(\text{II.2})$$

$$J = J_{ph} - J_{S1} \left[\exp\left(\frac{q(V+J.R_s)}{n_1 K T}\right) - 1 \right] - J_{S2} \left[\exp\left(\frac{q(V+J.R_s)}{n_2 K T}\right) - 1 \right] - \frac{V+J.R_s}{R_{SH}} \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

Où :

J_1 : courant de génération –recombinaison ou d'effet tunnel dans la ZCE ;

J_2 : Courant de diffusion dans les zones neutres ;

R_{SH} : Résistance parallèle ;

R_s : Résistance série ;

J_{S1} : Courant de saturation de la 1^{ère} diode ;

J_{S2} : Courant de saturation de la 2^{ème} diode.

IV.4 Caractéristique courant-tension

La caractéristique $J(V)$ d'une cellule solaire est la superposition de celle de la diode sous obscurité et du courant photogénéré (figure II-5).

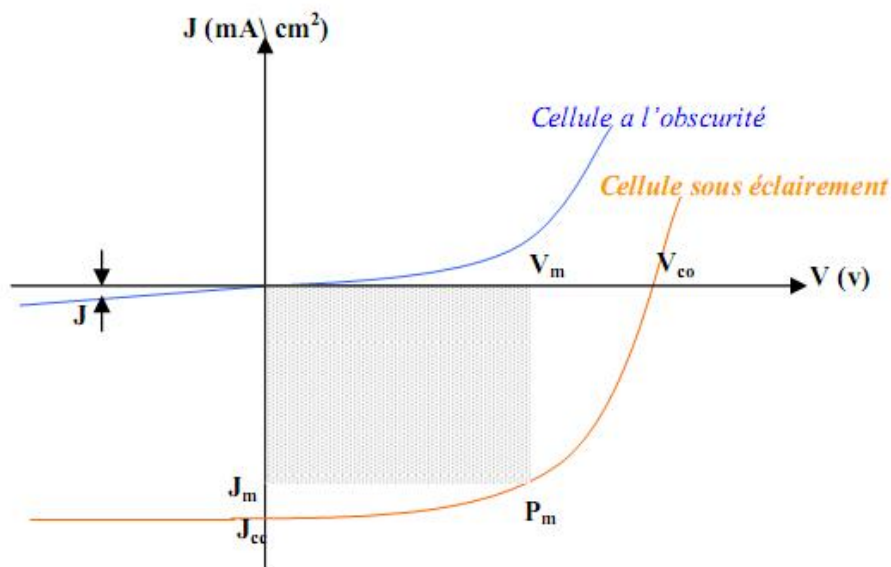


Figure II.5: caractéristique courant-tension à l'obscurité et sous éclairage d'une cellule solaire.

Pour la jonction PN à l'obscurité la caractéristique $I(V)$ passe par l'origine. Le produit $V.I > 0$ donc elle absorbe tout le temps de l'énergie.

Pour la cellule solaire sous éclairage, la caractéristique $I(V)$ ne passe pas par l'origine.

Dans la région hachurée le produit $V I < 0$ donc la cellule fournit de l'énergie.

IV.5 Paramètres électrique d'une cellule solaire

La caractéristique $J(V)$ de la cellule solaire permet de déduire les paramètres photovoltaïques propres à la cellule :

- le courant du court-circuit I_{cc} (obtenu pour $V=0$)
- la tension du circuit-ouvert V_{co} (obtenu pour $J=0$)
- le facteur de forme FF
- le rendement de conversion (η)

a. Le courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit est celui qui circule dans une cellule soumise à un flux de photons sans application de tension ($V=0$). Il est proportionnel à l'éclairage. On le mesure en branchant les bornes de la cellule directement à un ampèremètre.

b. Tension du circuit-ouvert V_{co}

Si on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur, on obtient à ses bornes une tension continue, dite tension à circuit-ouvert (obtenue pour $I = 0$).

Cette tension est généralement de l'ordre de 0.5 à 0.7 V pour les cellules élémentaires (elle dépend du matériau, de la technologie et de l'éclairage). Elle exprime le nombre de porteurs créés par chaque photon incident.

c. La puissance maximale P_m

Suivant la formule $P=V I$, pour que P soit maximal, il faut être dans les conditions où le produit $V I$ est maximal : c'est le point de charge idéal de la photopile.

d. Le facteur de forme FF

Le facteur de forme est un paramètre qui caractérise la qualité de la cellule ; il est défini par le rapport de la puissance maximale générée à la puissance optimisée.

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{J_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \dots\dots\dots (II.4)$$

e. Le rendement de conversion η

Le rendement de conversion est un paramètre important pour comparer les performances des cellules solaires. Il est défini par le rapport de la puissance maximale fournie sur la puissance solaire incidente.

$$\eta = \frac{J_m \cdot V_m}{P_i} = \frac{J_{cc} \cdot V_{co}}{P_i} FF \dots \dots \dots (II.5)$$

V. Les constituants de base d'une cellule solaire

La cellule solaire est constituée de plusieurs couches, l'élément de base est la jonction PN qui joue le rôle principal dans le dispositif solaire plus quelques couches donnant une structure industrielle standard qui est présentée sur la figure II.6.

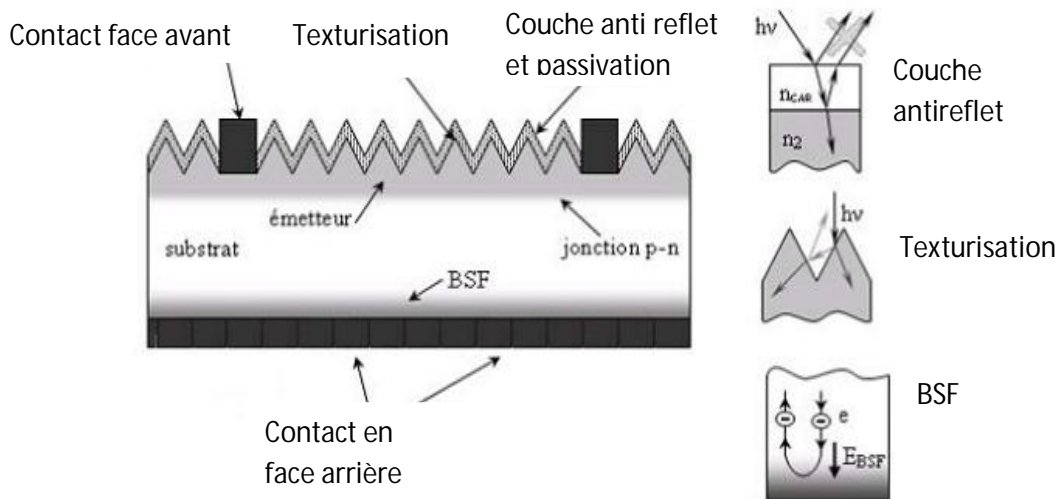


Figure II.6: Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium [11]

V.1 Texturation de la surface

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. Le relief créé permet d'augmenter le parcours des rayons en induisant des réflexions multiples sur les facettes des pyramides. La texturation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturation: attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturation mécanique, plasma ou laser.

V.2 Couche anti reflet

Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface au niveau de la face avant, cette surface est recouverte d'une couche anti-réfléchissante (Anti-Reflective Coatings CAR). Sans cette couche, la cellule solaire agit comme un miroir et reflète jusqu'à 33% de la lumière incidente sur la cellule. Différentes couches anti-réfléchissantes sont utilisées en photovoltaïque, elles peuvent être isolantes comme le TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 et SiN_x ou conductrices comme le ZnO ou l'ITO. La réflectivité dépend de l'indice de réfraction du matériau n_{CAR} , de l'épaisseur de la couche déposée d_{CAR} , de l'angle d'incidence λ et de l'état de polarisation du rayon incident. Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à [12].

$$d_{\text{CAR}} = \frac{(2.N+1)\lambda}{4.n_{\text{CAR}}}, N = 0,1,2,3 \dots \dots \dots \text{(II.6)}$$

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semiconducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents).

V.3 Réflecteur arrière (BSF)

C'est une couche fortement dopée sur la face arrière de la cellule. Cette zone a le même type de dopage que celui de la base, conduisant à une structure $p - p^+$. Ce qui crée une barrière de potentiel sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence du niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Donc le but du champ arrière est de diminuer la vitesse de recombinaison.

V.4 Les Contacts face avant et arrière

Les contacts métalliques de l'émetteur et du substrat servent à collecter le courant de porteurs photo-générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est à dire que la caractéristique I-V du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme ainsi que le rendement. Les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Les doigts de sérigraphie possèdent une largeur minimale de $100 \mu\text{m}$ et une épaisseur de $10 \mu\text{m}$ à $30 \mu\text{m}$ [12,13] permettant de conduire une forte densité de courant. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées.

VI. Les différentes filières photovoltaïques

VI.1 La filière à base de silicium cristallin

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs filières technologiques pour le photovoltaïque, d'une part, les cellules à base de silicium massif (monocristallin, polycristallin, rubans) dites de « première génération » et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés, et d'autre part, la technologie à base de silicium en couches minces.

a-Silicium monocristallin

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité électronique : la méthode de Czochralski (CZ) et la méthode de fusion de zones (FZ), mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable. Le silicium obtenu permet d'obtenir des rendements de conversion record en laboratoire, de l'ordre de 25% [14]. L'inconvénient de cette technologie est le coût prohibitif de production des matériaux.

b- Silicium polycristallin

Le silicium polycristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (dénommé silicium multicristallin) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Les rendements de conversion industriels, qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980, sont actuellement de 16 à 17 % pour des (grandes) plaquettes de 200 cm² [15]. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle lie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.

c- Les cellules solaires multijonctions

Comme son nom l'indique, la cellule solaire multijonction est une combinaison de trois simples jonctions ou plus, montées en série. Ces cellules qui sont à base de matériaux semiconducteurs (III-V) ont été mises au point depuis les années 60, le premier dispositif de la multijonction a été exploité au début de 1980, il a pu convertir 16% de l'énergie solaire en électricité, et en 1994, US National Renewable Energy Laboratory (NREL) a atteint un record de 30%, et actuellement elles présentent du rendement très élevé environ de 42,3%. [14] Cependant, ces cellules restent peu connues face à leur coût de fabrication très élevé, mais comme leur domaine de prédilection est le domaine spatial, le marché est moins sensible au coût qu'à la performance. Le fameux avantage à signaler pour ces cellules est leur robustesse vis-à-vis des radiations et des impacts.

d- Les cellules solaires à hétérojonctions

Les cellules PV à hétérojonction (HJ) sont obtenues par la mise en contact de matériaux d'énergie de gap (EG) différents. L'hétérojonction de silicium (Si-HJ) consiste à mettre en contact le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) avec le silicium cristallin (c-Si). L'énergie de gap du a-Si:H, entre 1.5 eV et 1.9 eV, est en effet plus élevée que celle du c-Si (1.12eV).

e- Les cellules solaires en couches minces

Les technologies naissantes des couches minces représentent une alternative très prometteuse à la technologie cristalline. Elles ont surtout l'avantage du moindre coût par rapport à celle du silicium cristallin en raison de plusieurs facteurs, tels que les faibles consommations de matière et d'énergie lors de leur fabrication.

Bien que leur part de marché soit faible aujourd'hui, les perspectives de croissance sont prometteuses. A l'heure actuelle, trois matériaux sont devenus la colonne vertébrale de la recherche dans ce domaine stimulée par la demande pressante des industries photovoltaïque et électronique : le silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H), le tellure de cadmium(CdTe) ainsi que le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS).

VII. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons décrit la cellule solaire, ses différents constituants, ses différents paramètres électriques (rendement, facteur de forme, le courant de court circuit, tension de circuit ouvert) et leurs caractéristiques principales.

Références

- [1] A. Yazid mémoire magister, «Optimisation des cellules solaires conventionnelles à base du silicium de type N», Université de Tlemcen, (2011).
- [2] R. De Bettighies, thèse doctorat, «Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués», Université d'Auger, (2003).
- [3] B. EQEUR, «Energie solaire photovoltaïque», volume1, UNESCO,(1999).
- [4] www.NREL.com
- [5] T.Destus, thèse doctorat, « développement de cellules photovoltaïque à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière », INSA Lyon, (2009).
- [6] M. Navaro, thèse de doctorat, «Cellules photovoltaïques organiques transparentes dans Le visible», Université de Toulouse,(2008).
- [7] L. Remache, thèse de doctorat, «Silicium poreux passivé par des nitrures et des oxydes de silicium. Application aux revêtements anti-réfléchissants, Université de Constantine, (2011).
- [8] T. schutz-kuchly, thèse doctorat, «Investigation du silicium de qualité solaire de type n pour la fabrication de cellules photovoltaïques»,Université Aix-Marseille,(2011).
- [9] www.pvresources.com
- [10] A. Rothwarf and K.Boer, «Direct conversion of solar energy through photovoltaic cells», Process solid-state chemistry, (1975).
- [11] M. Boussaid, mémoire magister, «Modélisation des phénomènes de vieillissement des modules photovoltaïques», Université de Tlemcen, (2012).
- [12] F. Ynineb, « Contribution à l'élaboration de couches minces d'Oxydes Transparents Conducteurs (TCO) », Thèse de Magister, Université Mentouri Constantine, (2010).
- [13] M. Purica, E. Budianu, E. Rusu, M. Danila and R. Gavrilă; Thin Solid Films (2002).
- [14] S. Ponce-Alcántara, C. del Cañizo and A. Luque, «Integration of silicon nitride layers in multicrystalline silicon solar cell processes», 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, (2006).
- [15] HANDBOOK OF SEMICONDUCTOR WAFER CLINING TECHNOLOGY (Science, Technology, and Applications); Werner Kren; NOYES PUBLICATIONS; Westwood New Jersey, U.S.

Chapitre III : Etude des cellules solaires à hétérojonctions

I. Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous aborderons ainsi, en premier lieu, quelques notions sur les structures métal/semi-conducteur et métal/isolant/semiconducteur en décrivant les phénomènes physiques les régissant. Nous présentons ensuite la cellule solaire de type métal/isolant/semiconducteur ainsi que le fonctionnement de la cellule solaire à hétérojonction de type ZnO/Si.

II. Etude de la structure métal/semiconducteur

La structure métal/semiconducteur (MS) est le dispositif unipolaire le plus simple. Il est à la base d'un grand nombre de structures plus complexes.

Les contacts métal/semiconducteur consistent en l'existence d'une barrière de potentiel, des mécanismes de transport de charges. Ils peuvent se comporter comme des contacts redresseurs (Diode de Schottky) ou comme des contacts ohmiques.

Lorsqu'un métal et un semiconducteur sont au contact, il existe à l'interface une barrière de potentiel donnée par l'expression :

$$E_e = e\phi_m - e\phi_s \tag{III.1}$$

Où

E_e : Énergie de la barrière de potentiel

$e\phi_m$: Travail de sorti de métal

$e\phi_s$: Affinité électronique de semiconducteur

II.1 Cas où $\phi_m = \phi_s$

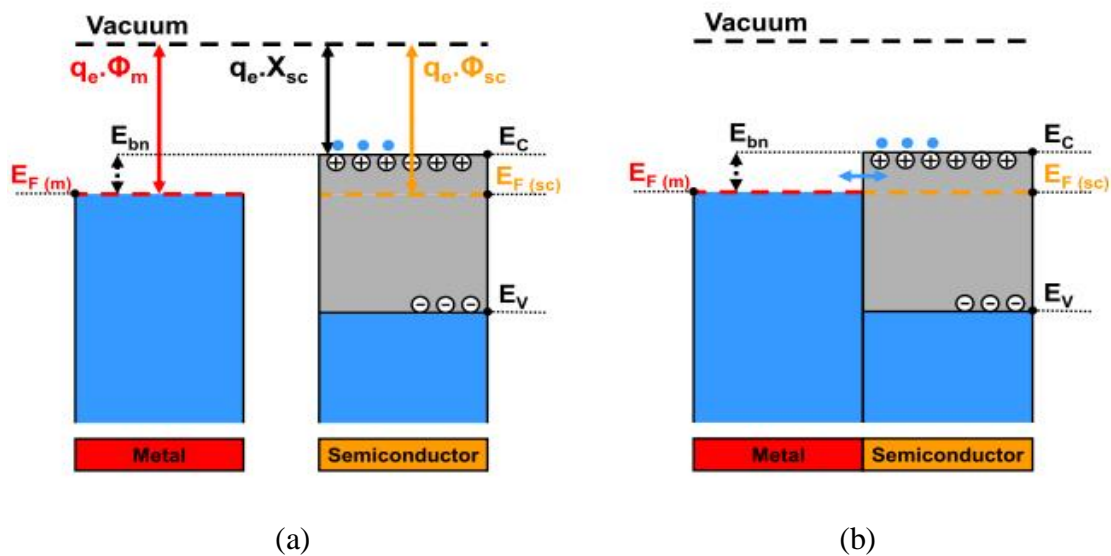


Figure III.1 : Contact métal/semiconducteur avec $\phi_m = \phi_s$. (a) Avant contact. (b) A l'équilibre thermodynamique, après la mise en contact.

Lorsque le métal et le semiconducteur sont mis en contact, l'alignement des niveaux de Fermi du métal et du semiconducteur est déjà réalisé avant la mise en contact. La distribution statistique des électrons est, dans ce cas, représenté par un niveau de Fermi unique et inchangé lors de la mise en contact. L'équilibre thermodynamique est atteint sans échange d'électrons. Le diagramme d'énergie équivalent est représenté sur la figure III.1b, où l'on peut voir que les bandes sont parfaitement horizontales. Le système est dit en régime de bandes plates.

II.2. Cas où $\phi_m > \phi_s$

II.2.1. Semiconducteur de type n

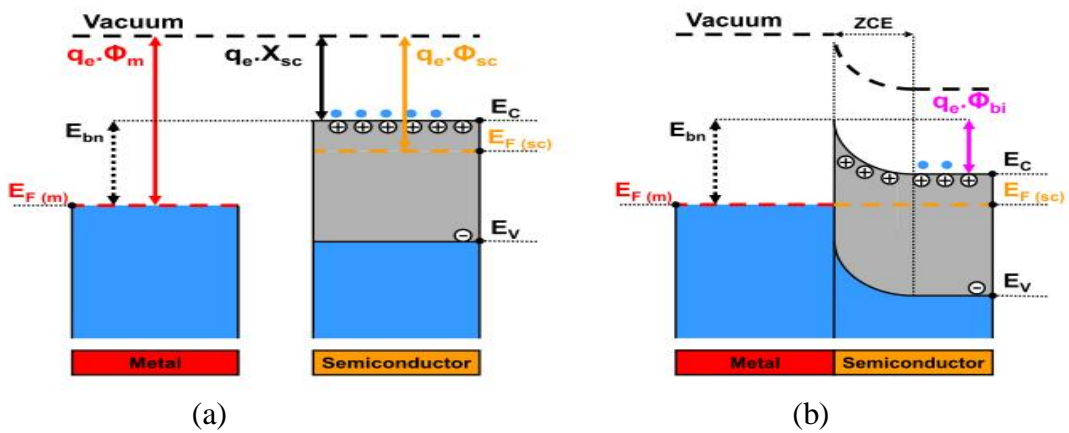


Figure III.2 : Diagramme de bandes d'énergie d'un contact métal/semiconducteur de type n, avec $\phi_m > \phi_s$. (a) Avant contact. (b) Après la mise en contact.

Les électrons présents dans le semiconducteur de type n possèdent une énergie supérieure à ceux présents dans le métal (figure III.2a). Lors de la mise en contact, les électrons du semiconducteur vont diffuser vers le métal jusqu'à alignement des niveaux de Fermi (figure III.2b).

Pour permettre cet alignement, les bandes de conduction et de valence vont alors s'abaisser de $q_e \cdot \phi_{bi}$ ou énergie de bande plate [1].

$$\phi_{bi} = \frac{q_e \cdot (N_D - N_A) \cdot W^2}{2 \cdot \epsilon_{sc}} \tag{III.2}$$

Avec, N_D la concentration d'atomes donneurs, N_A la concentration d'atomes accepteurs et W la largeur de la zone de déplétion (vide de porteurs et donc isolante) qui apparaît au niveau de l'interface (du côté du semiconducteur), en raison de la diffusion des électrons du semiconducteur vers le métal (figure III.2b).

Du côté du métal, toujours au niveau de l'interface, il apparaît une accumulation d'électrons qui ont diffusé depuis le semiconducteur.

Le contact dit « Schottky », dont la caractéristique I (V) présente un comportement redresseur.

II.2.1.Semiconducteur de type p

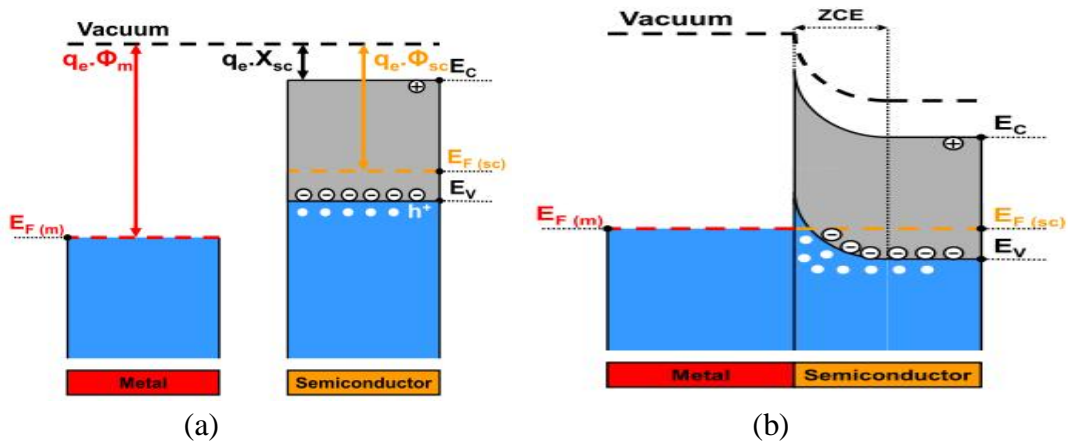


Figure III.3 : Diagramme de bandes d'énergie d'un contact métal/semiconducteur de type p avec $\phi_m > \phi_s$. (a) Avant contact. (b) En contact, à l'équilibre thermodynamique.

Tout comme dans le cas précédent, en raison de leur énergie (figure III.3a), ce sont les électrons du semiconducteur qui diffusent vers le métal pour permettre aux niveaux de Fermi de s'aligner (Figure III.3b). A l'interface, la diffusion des électrons, va entrainer l'apparition d'une zone de charge d'espace (ZCE) de charge positive dans le semiconducteur, constituée d'une zone d'accumulation de trous Figure III.3c) accompagnée d'une accumulation d'électrons du côté du métal. Le contact est dit « Ohmique » et présente une caractéristique I (V) linéaire.

II.3. Cas où $\phi_m < \phi_s$

II.3.1.Semiconducteur de type n

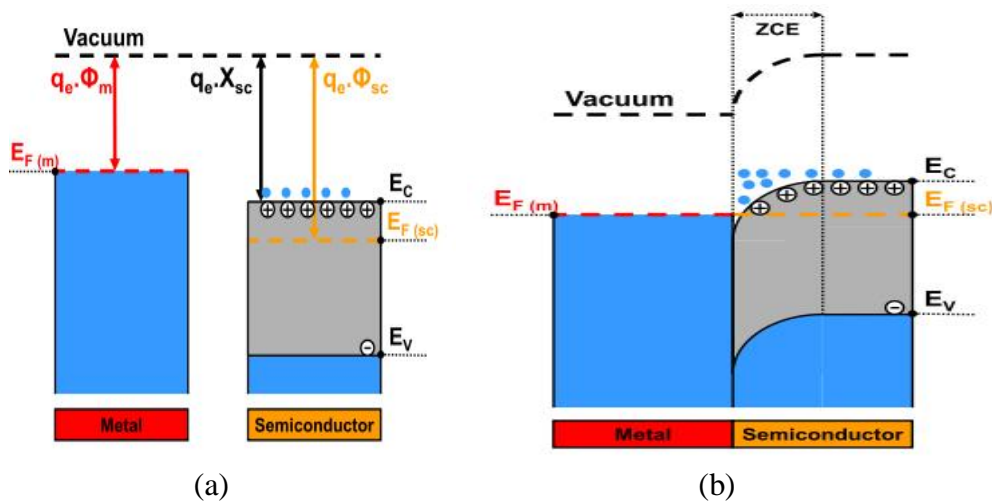


Figure III.4 : Diagramme de bandes d'énergie d'un contact métal/semiconducteur de type n, avec $\phi_m < \phi_s$. (a) Avant contact. (b) En contact, à l'équilibre thermodynamique.

Ici ce sont les électrons du métal qui possèdent une énergie supérieure à ceux du semiconducteur (Figure III.4a). Les électrons diffusent donc depuis le métal vers le semiconducteur (Figure III.4b) jusqu'à l'équilibre thermodynamique caractérisé par l'alignement des niveaux de Fermi du métal et du semiconducteur (Figure III.4b).

De manière analogue à la structure précédente, il en résulte la formation d'une zone de charge d'espace constituée d'une zone d'accumulation d'électrons du côté du semiconducteur, accompagnée d'un déficit d'électrons du côté du métal. L'alignement du niveau de Fermi s'accompagne, ici aussi, d'une courbure des bandes d'énergie du semiconducteur mais cette fois-ci vers les basses énergies.

De part la nature conductrice de la ZCE dans le semiconducteur, qui est ici aussi une zone d'accumulation de porteurs de charges libres (électrons), le courant va pouvoir circuler librement lors de la mise sous tension de cette structure. Le contact est dit aussi «Ohmique », et possède une caractéristique $I(V)$ linéaire.

II.3.2.Semiconducteur de type p

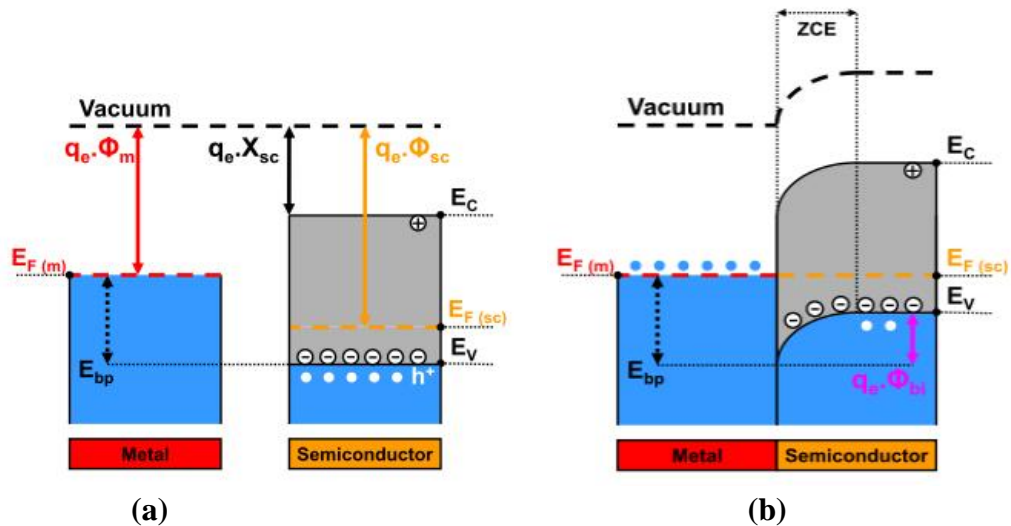


Figure : III.5 : Diagramme de bandes d'énergie d'un contact métal/semiconducteur de type p, avec $\Phi_m < \Phi_s$. (a) Avant contact. (b) En contact, à l'équilibre thermodynamique.

En raison de la différence d'énergie des électrons du métal et du semiconducteur (Figure III.5a), les électrons du métal vont diffuser vers le semiconducteur (Figure III.5b) jusqu'à un alignement du niveau de Fermi et accompagné d'une courbure des bandes d'énergie du semiconducteur vers les basses énergies (Figure III.5b).

Il apparaît alors un déficit d'électrons à l'interface, du côté du métal, et une zone de charge d'espace négative du côté du semiconducteur. En effet, les électrons provenant du métal vont ioniser les atomes accepteurs (ions négatifs) présents dans le semiconducteur de type p et entraîner l'apparition d'une zone de déplétion (vide de porteurs) dans le semiconducteur. Lors de la mise sous tension de cette structure, la tension de polarisation va donc être localisée au niveau de la ZCE du semiconducteur (zone isolante).

Dans ce cas le contact dit « Schottky », dont la caractéristique $I(V)$ présente un comportement redresseur.

Nous venons de voir que la nature du contact réalisé sur un semiconducteur, dépend du travail de sortie du métal ϕ_m et de celui du semiconducteur ϕ_{sc} (tableau.III.1). Le travail de sortie du métal est une constante intrinsèque au métal, alors que celui du semiconducteur va dépendre de la position du niveau de Fermi et donc du dopage. On peut exprimer le travail de sortie du semiconducteur ϕ_{sc} à partir de l'affinité électronique χ_{sc} et de la position du niveau de Fermi $E_C - E_F$:

$$\phi_{sc} = \chi_{sc} + (E_C - E_F) \quad (\text{III.3})$$

Dans le cas d'un semiconducteur de type n, on considère que le niveau de Fermi est relativement proche de la bande de conduction :

$$\phi_{sc-n} \sim \chi_{sc} \quad (\text{III.4})$$

Par contre, dans le cas d'un semiconducteur de type p, on considère que le niveau de Fermi se situe près de la bande de valence. Le travail de sortie peut alors s'écrire en fonction du gap E_G du semiconducteur [1, 2,13]:

$$\phi_{sc-p} \sim \chi_{sc} + E_G \quad (\text{III.5})$$

	$\phi_m > \phi_s$	$\phi_m < \phi_s$
Semiconducteur de type N	Contact redresseur	Contact ohmique
Semiconducteur de type P	Contact ohmique	Contact redresseur

Tableau III.1 : Nature des contacts en fonction du type de semiconducteur (n ou p) et de la différence de travail de sortie entre le métal et le semiconducteur.

III. La cellule solaire de type métal/semiconducteur (Schottky)

Quand une jonction métal/semiconducteur (diode Schottky) est éclairée par des photons d'énergie supérieure à la valeur du gap E_g , des paires électron-trou sont générées et séparées sous l'influence du champ électrique interne qui règne dans la zone de charge d'espace.

III.1. Diagramme des bandes d'énergie

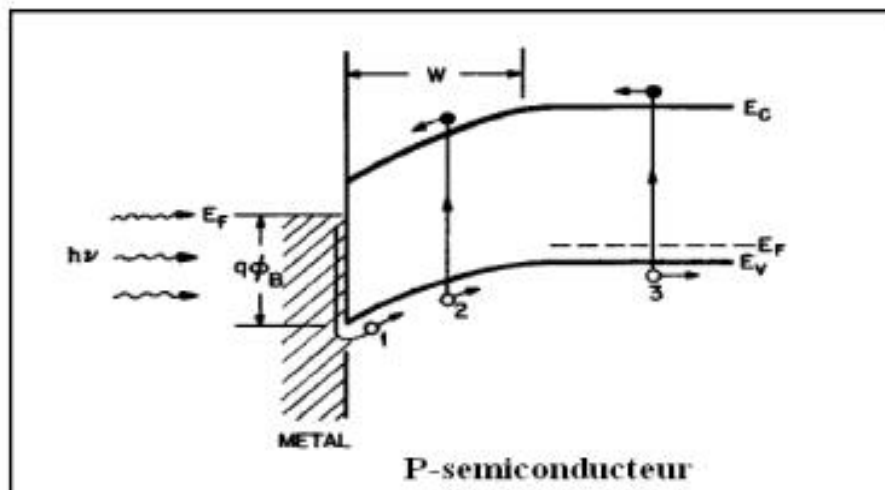


Figure III.6 : Diagramme de bandes d'énergie d'une photopile Schottky sous illumination [2]

III.2. Principe de fonctionnement

Lorsque les photons sont absorbés par le semiconducteur, ils transmettent leur énergie aux électrons. Si l'énergie transmise est supérieure à celle associée à la bande interdite E_g du semiconducteur, des paires électrons trous sont alors créées dans cette zone de déplétion par arrachement des électrons.

Les électrons créés dans la région P et les trous engendrés dans la région N diffusent, sous l'effet d'un champ électrique E qui règne dans cette zone, ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule et une différence de potentiel supportée entre les électrodes métallique de la cellule.

IV. La cellule solaire de type métal/isolant/semiconducteur

Dans la réalisation de la cellule solaire de type TCO/Si, il est impossible de négliger la formation d'un film isolant très mince à l'interface du métal et le substrat semiconducteur. Dans cas, on aura alors une cellule de type TCO/SiO₂/Si. Le diagramme des bandes d'énergie est illustré par la figure III.7.

IV.1 Diagramme des bandes d'énergie

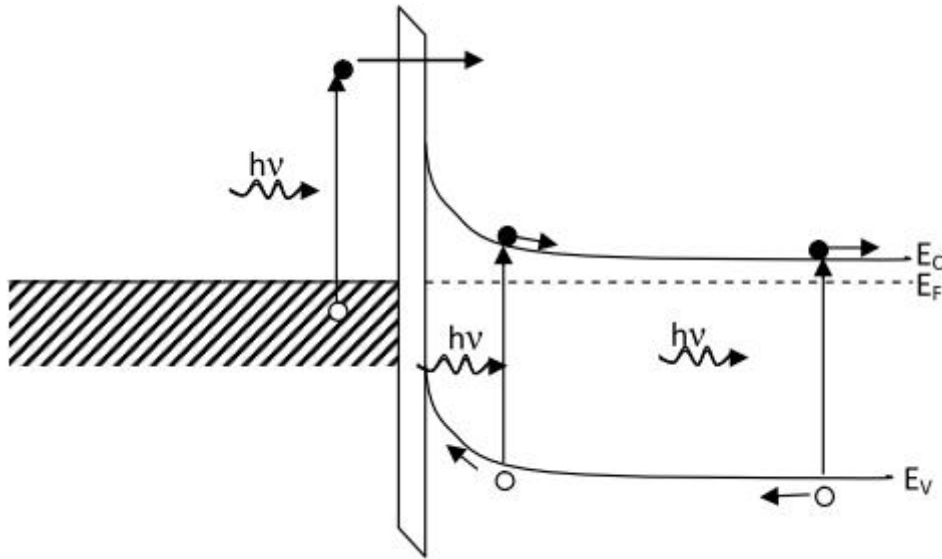


Figure III.7 : Diagramme de bandes d'énergie d'une cellule solaire de type Métal/Isolant/Semiconducteur (MIS)

IV.2 Influence de la couche isolante interfaciale

En introduisant une couche fine isolante entre le silicium et l'oxyde de zinc, la structure devient une hétérojonction du type Métal-Isolant-Semiconducteur MIS[14,15].

D'après A.K. Gosh [7] la fine couche isolante améliore la tension de circuit ouvert. Cette amélioration est due au fait que le courant inverse de saturation est réduit. La caractéristique courant-tension de ce type de cellule est exprimé en fonction de l'épaisseur δ de la couche isolante (équation III.6) [8,9].

$$V_{co} = n \left(\phi_b + \left(\frac{kt}{q} \right) \chi^{\frac{1}{2}} \delta \left(\frac{kt}{q} \ln \frac{J_{sc}}{A^* T^2} \right) \right) \quad \text{III.6}$$

V. La cellule solaire à hétérojonction de type ZnO/n-Si

La conversion de l'énergie solaire est le résultat de 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, généralement,

par diffusion du phosphore sur un même substrat de silicium monocristallin. Or, le coût de la mise en œuvre de telles cellules est élevé.

De plus à cause de la réflectivité élevée du silicium dans la gamme du visible (30%) [3], d'autres alternatives sont nécessaires. Parmi celles-ci, on retrouve les hétérojonctions TCOs /Si. A ce jour, plusieurs hétérojonctions TCOs / Si ont été étudiées telles que ITO/ Si [3], SnO_2 / Si [4], ZnO/Si [5,6]. Dans ce type de cellules, la couche du TCO sert d'une part comme 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 silicium.

V.1 Diagramme des bandes d'énergie

Au cours de ces dernières années, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'étude de l'hétérojonction ZnO/Si . A titre d'exemple, les figures III-8 (a) et (b) montrent les diagrammes de bandes d'énergie des hétérojonctions ZnO/n-Si et ZnO/p-Si . Dans les deux cas la structure obtenue est une diode Schottky.

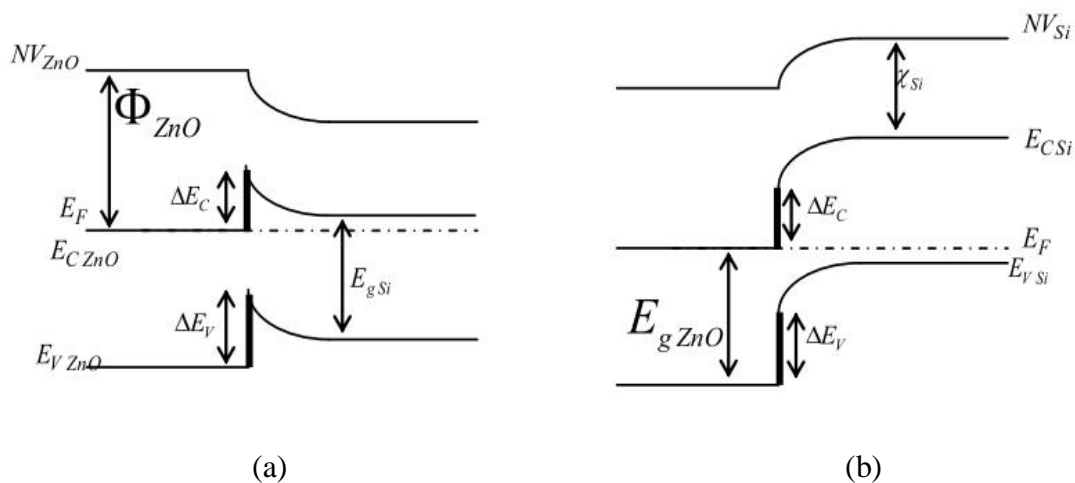


Figure III.8 : Diagramme de bandes d'énergie : (a) d'une ZnO/n-Si , (b) ZnO/p-Si

V.2 Principe de fonctionnement

Lorsque les photons sont absorbés par la couche ZnO , ils transmettent leur énergie aux porteurs de charges au niveau de la ZCE. Si l'énergie transmise est supérieure à celle associée à la bande interdite E_g du semiconducteur, des paires électrons trous sont alors créées dans cette zone de déplétion par arrachement des électrons.

Les électrons créés dans la région P et les trous engendrés dans la région N diffusent, sous l'effet d'un champ électrique E qui règne dans cette zone, ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métallique des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule et une différence de potentiel supportée entre les électrodes métalliques de la cellule.

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans une première partie la physique des structures Métal/Semi-conducteur et Métal/isolant/semiconducteur. Dans la deuxième partie, nous avons décrit le principe de fonctionnement des cellules solaires à hétérojonctions en général et des cellules ZnO/Si en particulier qui fera l'objet de notre travail de simulation dans le chapitre suivant.

Références

- [1] E. H. Rhoderick et R. H. Williams, "Metal-Semiconductor Contacts" . 2^{ème} édition.
Oxford University Press, USA, sept. 1988.
- [2] S.M.Sze, "Physics of semiconductor devices" ouvrage, Simon M. Sze, Kwok K. Ng,
John Wiley and Sons, ISBN:0470068302, 9780470068304, (2006).
- [3] J. Lu, Z. Ye, L. Wang, J. Huang and B. Zhao; Materials Science in Semiconductor
Processing 5 (2003).
- [4] S.H. Jeong, S. Kho, S.B. LEE and J.H. Boo; Surface and Coating Technology (2003).
- [5] Z. Zhao, M. Vinson, T. Neumuller, J.E. McEntyre, F. Fortunato and A.T. Hunt G.
Ganguly, Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-
Ninth IEEE, 2002.
- [6] A. Tiburcio-Silver, J.C. Joubert et M. Labeau ; J. Phys.III France 2 (1992).
- [7] A.K Gosh et al, Journal of Applied Physics, (1978).
- [8] N. Tugluoglu et al, Applied Surface Science, (2005).
- [9] S. Karadeniz et al, Applied Surface Science, (2004).
- [10] H. Bo et al, Superlattices and Microstructures, (2009).
- [11] J. Loney et al, Electro component Science and Technology, (1976).
- [12] T.J. Stanimirova, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, (2005).
- [13] H. Mathieu, « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques»,
1ère Edition, MASSON, 1987.
- [14] J. Loney et al, Electro component Science and Technology, 2 (1976) 223-231.
- [15] T.J. Stanimirova, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 7 (2005) 1335-
1340.

**Chapitre IV : Simulation des
cellules solaires à
hétérojonctions de type
ZnO/n-Si**

Introduction

Dans ce chapitre nous décrivons, dans un premier lieu, la structure simulée et le logiciel de simulation employé AFORS-HET et nous présentons, dans un second lieu, les résultats de simulation de cellules solaires ZnO – Si(n) avec une interprétation en vue d'une optimisation du rendement de conversion photovoltaïque.

I. Présentation du logiciel de simulation AFORS-HET

Le logiciel AFORS-HET (Automate **F**or Simulation of **H**eterostructure) est un outil de simulation numérique à une dimension, développé en Allemagne par le laboratoire Helmholtz Zentrum Berlin (HZB), ce logiciel est adapté d'une manière particulière à la simulation des cellules solaires à hétérojonction à base de silicium [1].

AFORS HET possède une interface graphique qui nous permet de définir, de créer facilement des structures différentes, dont on peut contrôler la plupart des paramètres, tels que : l'affinité électronique, énergie du gap du matériau, la mobilité des électrons et trous... , cette interface est répartie en 3 zones (voir figure IV.1.a):

- Zone de contrôle : *program control* ;
- Zone de paramètres externes : *external parameters* ;
- Zone de mesure : *measurment*.

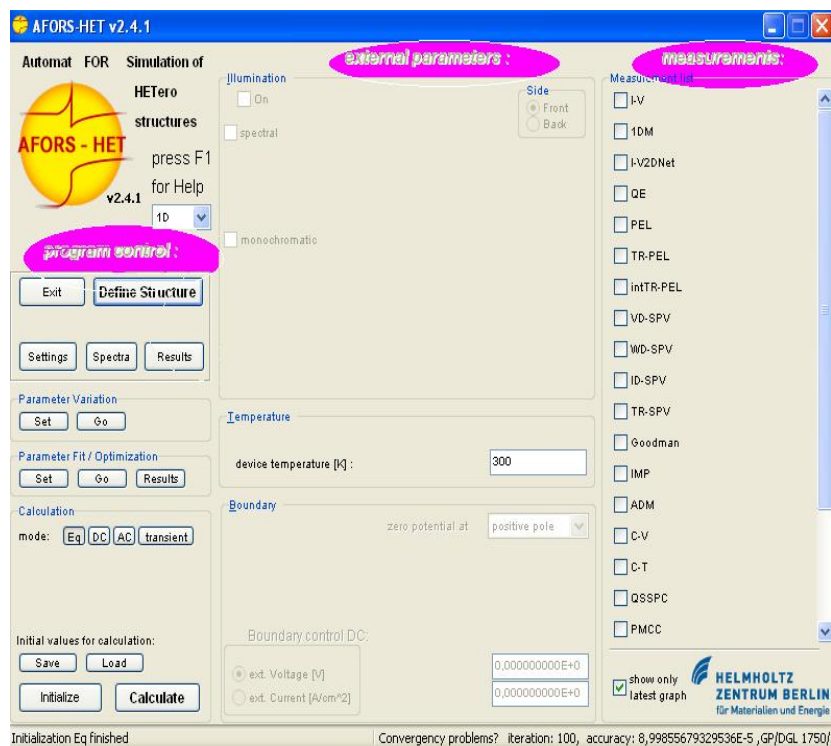


Figure IV.1.a : Fenêtre principale de l'interface graphique du logiciel de simulation.

La zone de control sert à 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.

La zone des paramètres externes on y trouve , la température externe, le spectre d'illumination et les conditions aux limites.

La zone de mesure sert à choisir la mesure à effectuer.

- **Les étapes de la simulation :**

On note les étapes de la simulation comme suit :

Définition de la structure à simuler, elle est composée toujours d'un contact avant et d'un contact arrière et un nombre variable de couches entre lesquelles existent des interfaces.

Après la définition de la structure, nous introduisons les paramètres nécessaires tels que l'épaisseur et les propriétés électriques (le gap, le dopageetc.) (Figure IV.1.b).

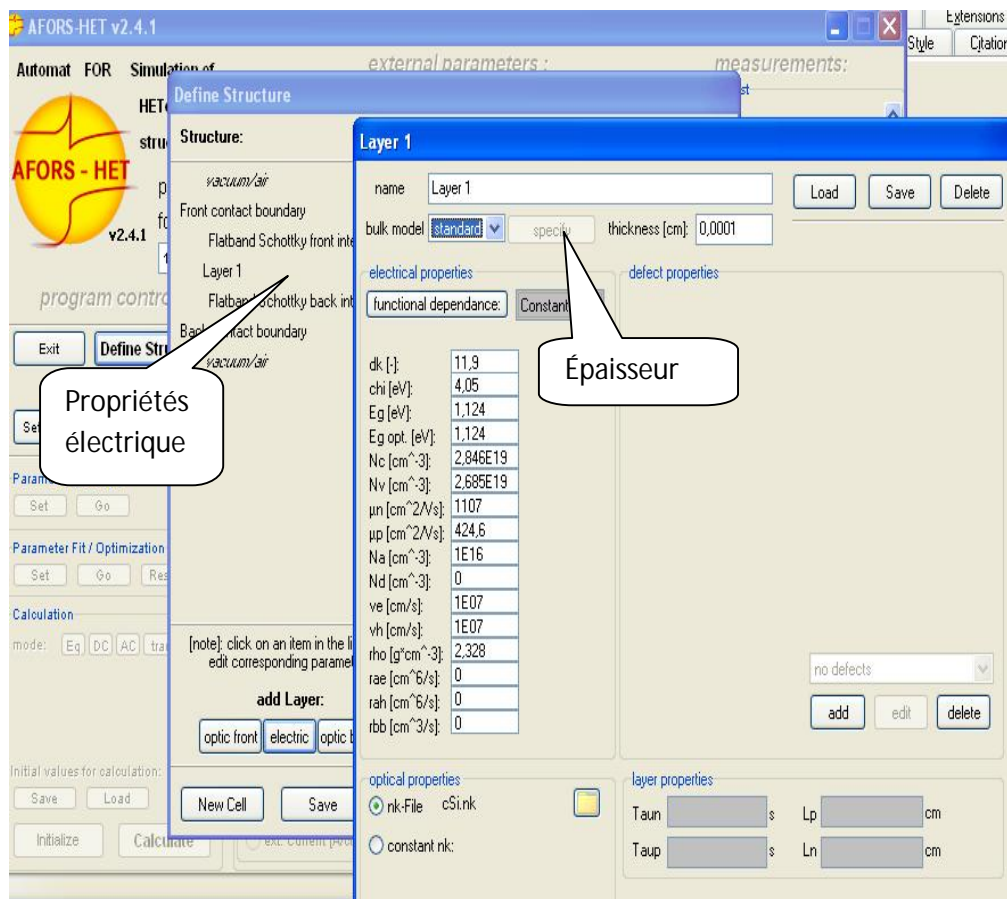


Figure IV.1.b : Fenêtre correspondante à la définition de la structure.

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

Pour l'illumination de la cellule, on choisit d'abord le mode de polarisation AC ou DC, on sélectionne ensuite la lumière spectrale ou monochromatique avec laquelle on veut travailler (figure IV.1.c). On pourra ensuite effectuer de nombreuses simulations.

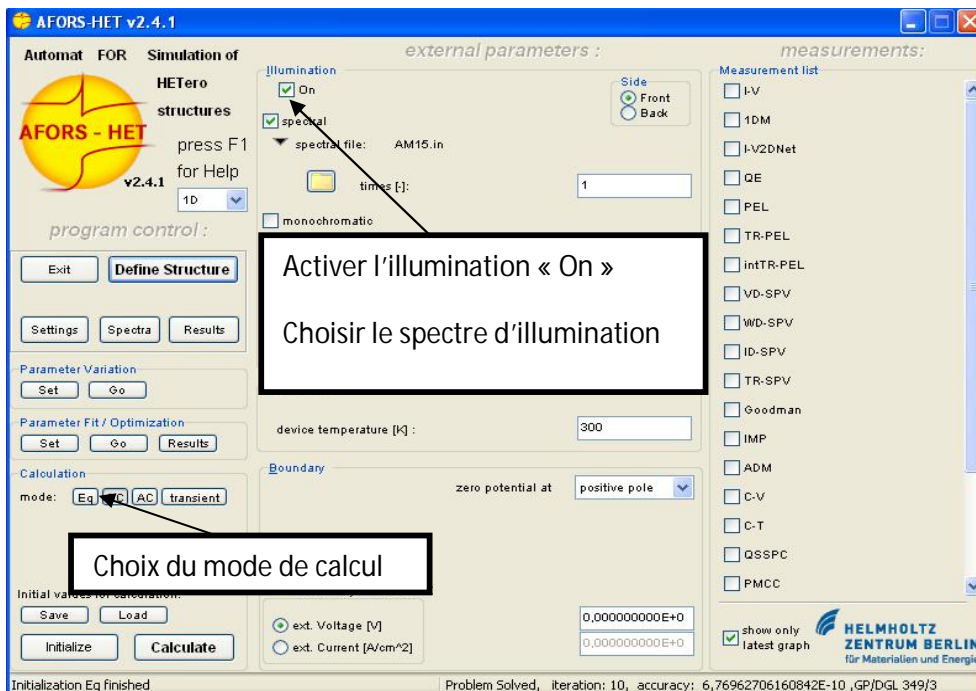


Figure IV.1.c : Mode de calcul et illumination de la cellule.

Ce logiciel AFORS-HET est utilisé par de nombreux chercheurs [2,3] dans la simulation des cellules solaires à hétérojonction et HIT.

II. La structure de la cellule solaire simulée

Les cellules solaires simulées sont constituées d'une couche d'oxyde de zinc ZnO déposée sur du silicium monocristallin de type N (Figure IV.2) munies d'électrodes collectrices, en face avant et arrière, permettant leur connexion au circuit électrique extérieur. La couche de ZnO, en sa qualité de TCO, joue un double rôle ; elle sert d'émetteur et de couche antireflet.

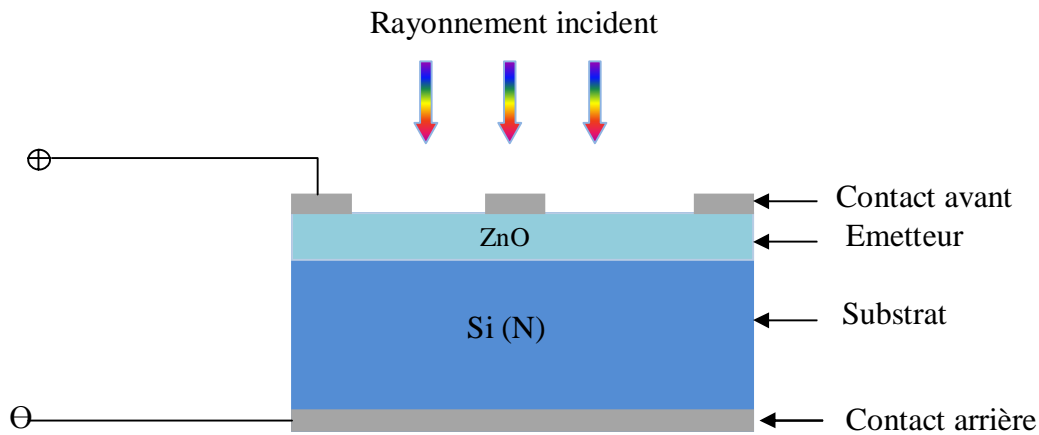


Figure IV.2. Structure de la cellule solaire

III. Paramètres de simulation

Les simulations ont été effectuées sous un spectre solaire AM.1,5 avec $P = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 300 \text{ K}$. Le tableau suivant regroupe les principaux paramètres des couches de silicium et de ZnO utilisés dans la simulation.

	Substrat : Silicium (N)	Emetteur : Oxyde de zinc
Epaisseur		
Travail de sortie	4,05 eV	4,45 eV
Dopage	$1,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	10^{17} cm^{-3}
Concentration en porteurs de charge	$N_c = 2,84 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ $N_v = 2,68 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$N_c = 2,2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ $N_v = 2,8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Vitesse de recombinaison	$V_e = V_h = 10^7 \text{ cm/s}$	
Résistivité	$1,1 \Omega \cdot \text{cm}$	$2 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$

Tableau IV.1: Paramètres de simulation

IV. Résultats de simulation

IV.1 Diagramme des bandes d'énergie

La figure IV.3 représente le diagramme des bandes d'énergie de la structure ZnO/n-Si à l'équilibre thermodynamique.

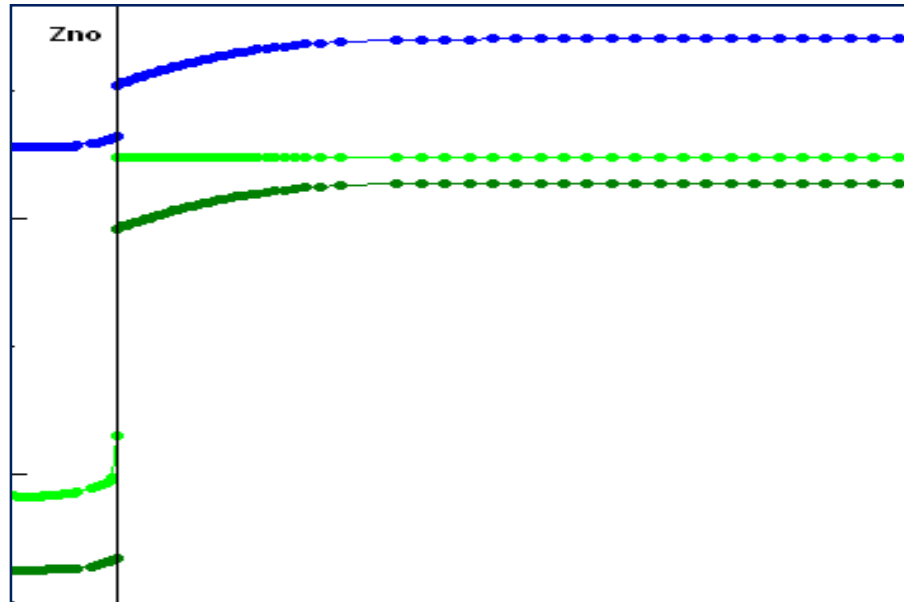


Figure IV.3 Diagramme des bandes d'énergie de la cellule solaire ZnO/n-Si

IV.2 Caractéristique courant-tension de la cellule solaire ZnO/n-Si

La caractéristique J-V de la cellule solaire ZnO/n-Si simulée sous AFORS-HET est représentée sur la figure IV.4. Les paramètres électriques correspondants sont regroupés dans le tableau IV.2.

Paramètres / Structure	V _{co} (mV)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Cellule solaire ZnO/n-Si	621,9	28,4	81,9	14,5

Tableau IV.2 : Paramètres électriques des cellules solaires ZnO/n-Si simulées.

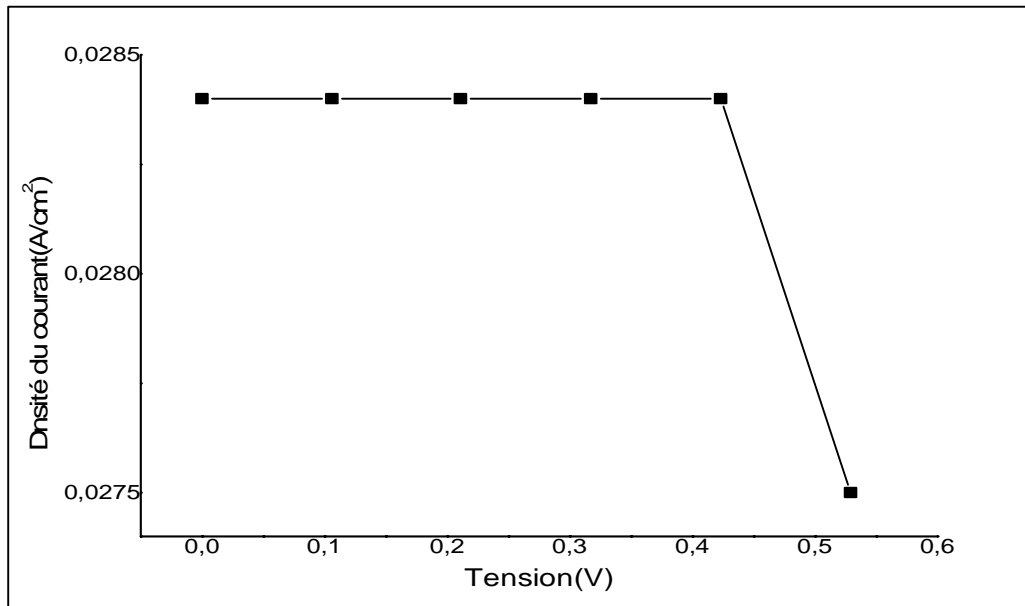


Figure IV.4. Caractéristique J(V) de la cellule solaire ZnO/n-

V. Paramètres influençant les performances des cellules solaires ZnO/n-Si

V.1 Effet de la variation de l'épaisseur du substrat de silicium sur les performance de la cellule solaire ZnO/n-Si

Les figures IV. 5, IV.6, IV.7 et IV.8 représente l'influence de l'épaisseur de la base Si (N) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire simulée : courant de court-circuit, tension de circuit ouvert facteur de forme et rendement, respectivement. Les valeurs numériques de ces paramètres correspondantes à différentes valeurs d'épaisseur de la base sont données en annexe A.

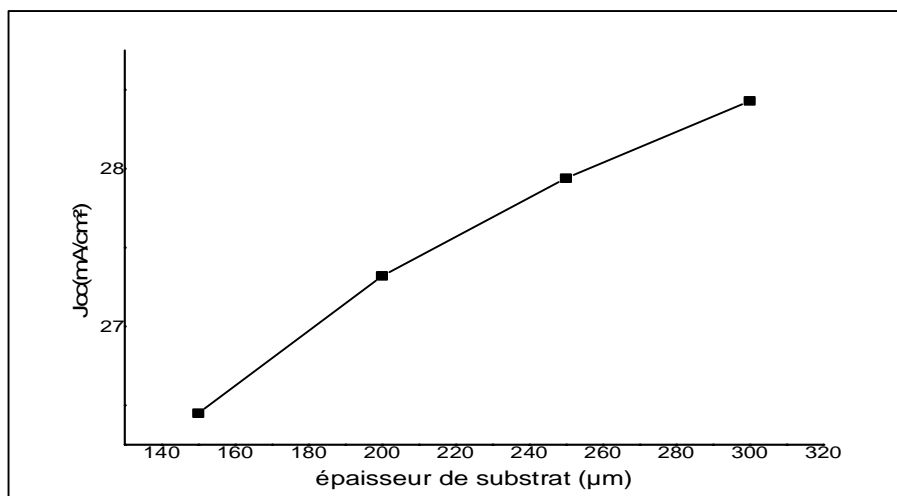


Figure IV.5: Variation de courant de court circuit en fonction de l'épaisseur de substrat.

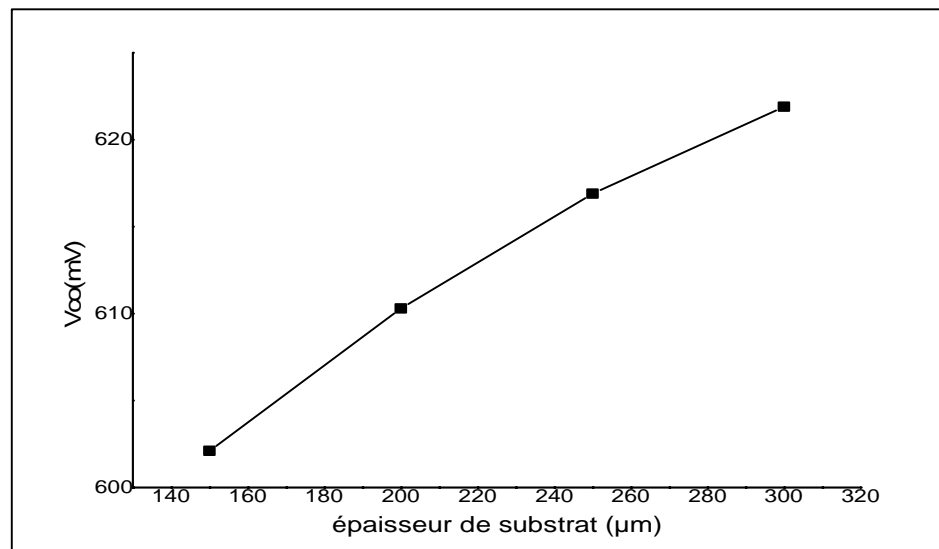


Figure IV.6: Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur du substrat.

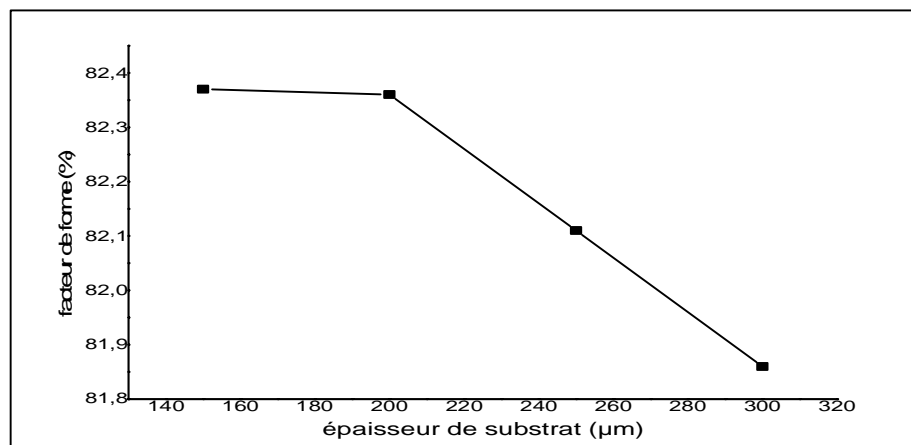


Figure IV.7 : Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de substrat.

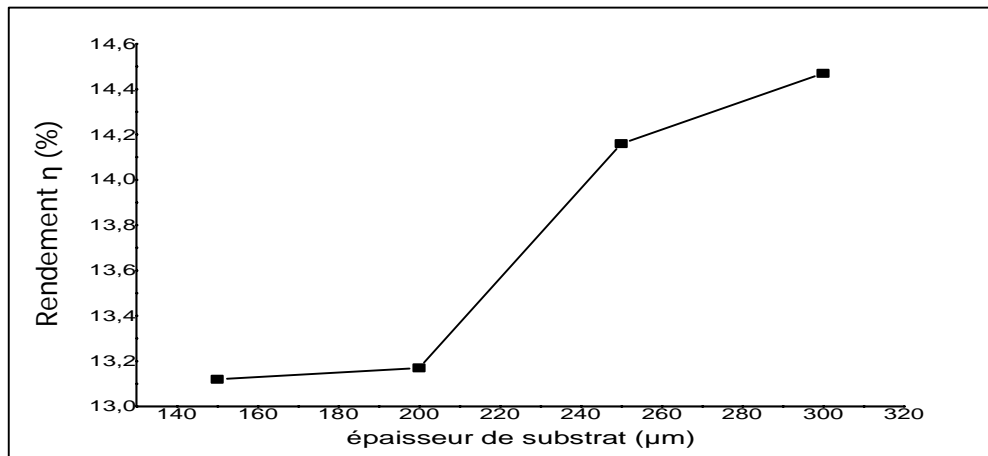


Figure IV.8 : Variation de rendement en fonction de l'épaisseur de substrat.

Comme nous pouvons l'observer sur les figures IV.5, IV.6 et IV.8, l'utilisation d'un substrat épais de 300 μm permet une amélioration du rendement de conversion de la cellule solaire grâce à l'augmentation de la tension de circuit ouvert et du courant de court-circuit comme le montre la relation suivante :

$$\eta = \frac{V_{CO} \cdot I_{CC} \cdot FF}{P_i} \quad \text{IV.1}$$

En effet, l'augmentation de l'épaisseur du substrat permet une meilleure absorption des photons induisant une augmentation des paires électrons-trous photogénérés qui est à l'origine de l'amélioration du courant de court-circuit et par conséquent de la tension de circuit ouvert comme le montre la relation :

$$V_{CO} = \frac{KT}{q} \left(\frac{I_{CC}}{I_0} \right) \quad \text{IV.2}$$

V.2 Influence du dopage du substrat de silicium sur les performances de la cellule solaire ZnO/n-Si

L'effet de la variation de la concentration du dopage du substrat de silicium sur les performances photovoltaïques des cellules solaires ZnO/n-Si est illustré sur les figures IV.9, IV.10, IV.11 et IV.12. Les paramètres électriques correspondants sont donnés en annexe B.

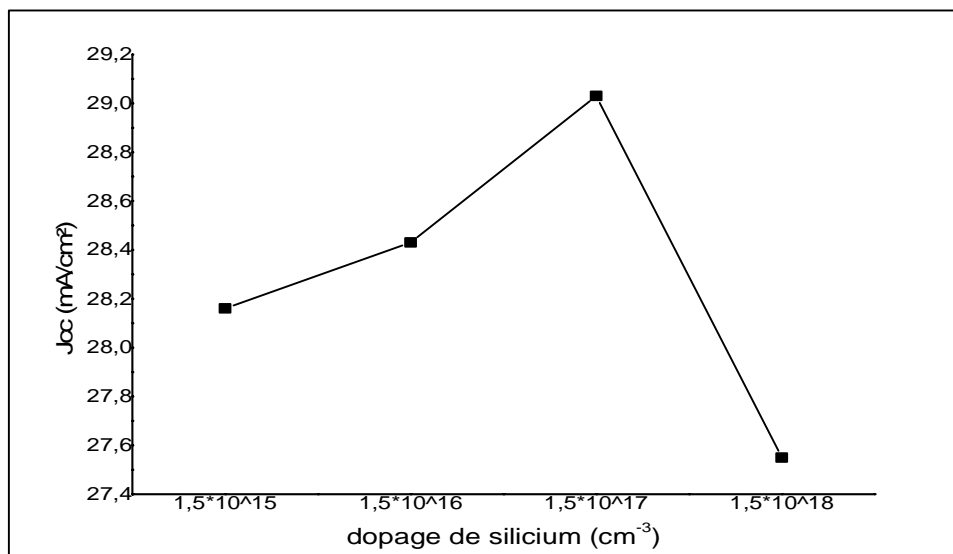


Figure IV.9 : Variation du courant de court-circuit en fonction du dopage de silicium.

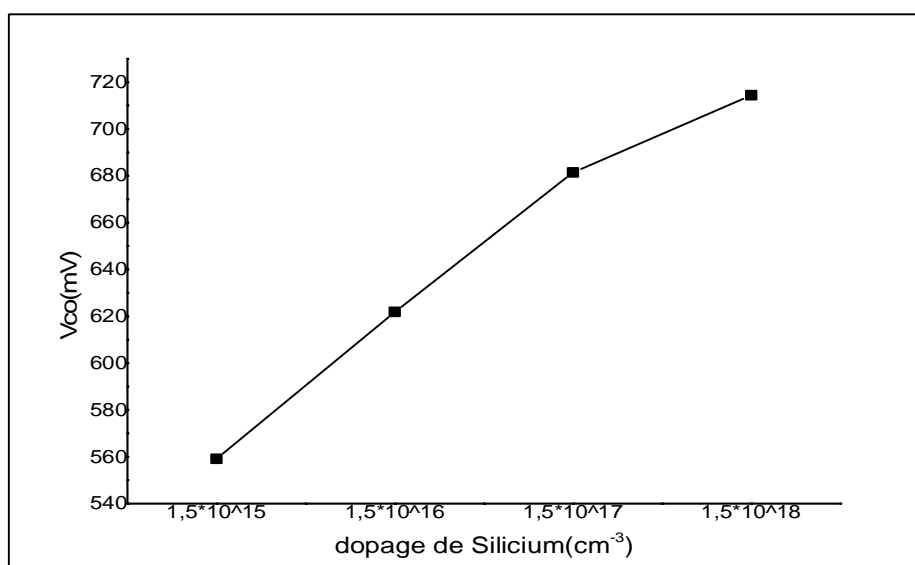


Figure IV.10 : Variation de la tension de circuit ouvert en fonction du dopage de silicium.

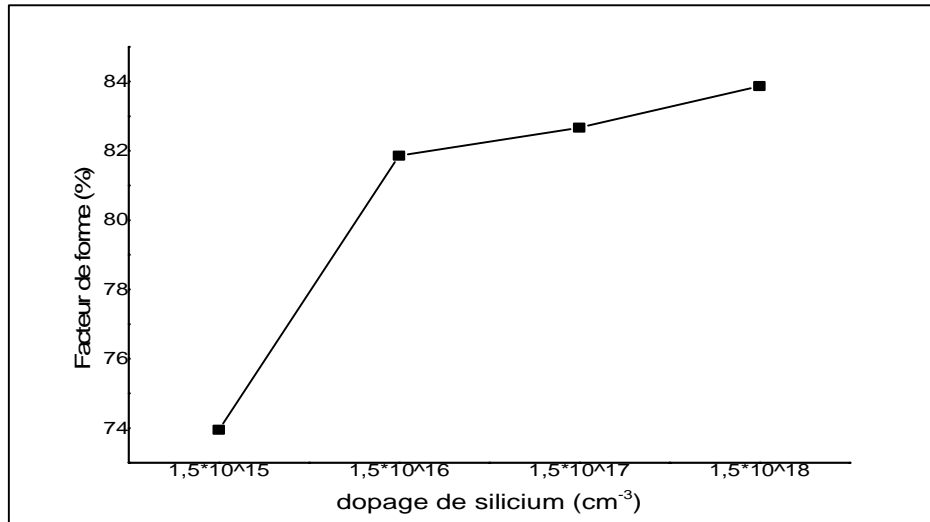


Figure IV.11: Variation du facteur de forme en fonction du dopage de silicium.

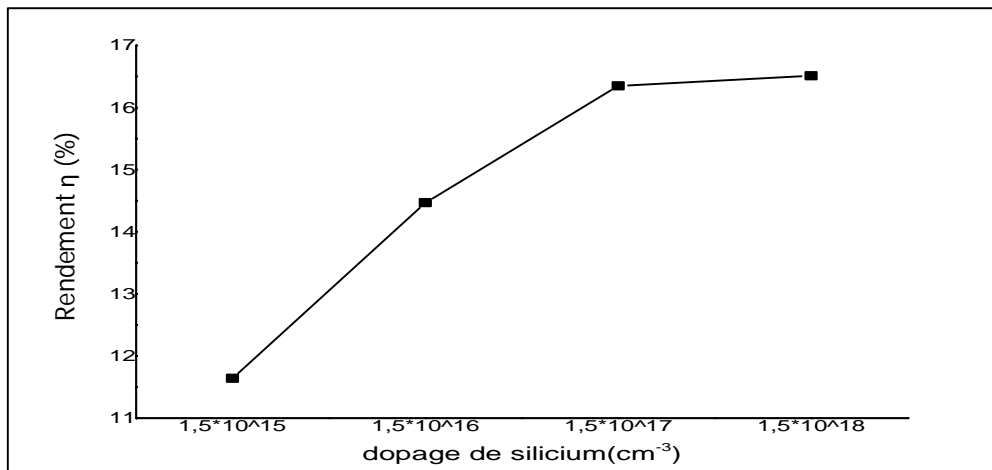


Figure IV.12: Variation du rendement en fonction du dopage de silicium.

A partir de ces figures, nous pouvons conclure que l'utilisation d'un substrat de silicium fortement dopé permet une augmentation considérable du rendement de conversion de la cellule et ce, grâce à l'augmentation de la conductivité du substrat et une diminution des pertes résistives.

V.3 Influence du dopage du ZnO sur les performances de la cellule solaire ZnO/n-Si

L'effet de la variation de la concentration du dopage de l'émetteur ZnO sur les performances des cellules solaires simulées est illustré sur les figures suivantes IV.13, IV.14, IV.15 et IV.16. Les paramètres électriques de ces cellules pour différentes concentrations de dopage sont donnés en annexe C.

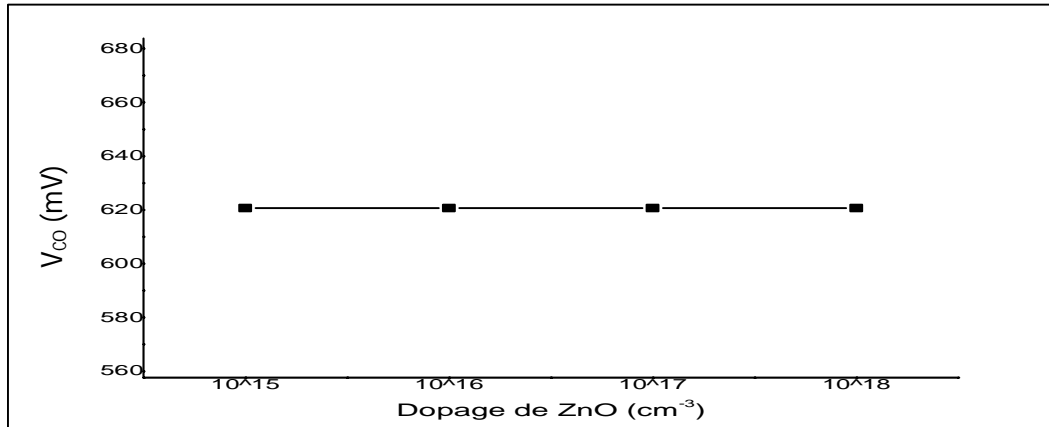


Figure IV.13: Variation de tension de circuit ouvert en fonction du dopage de ZnO.

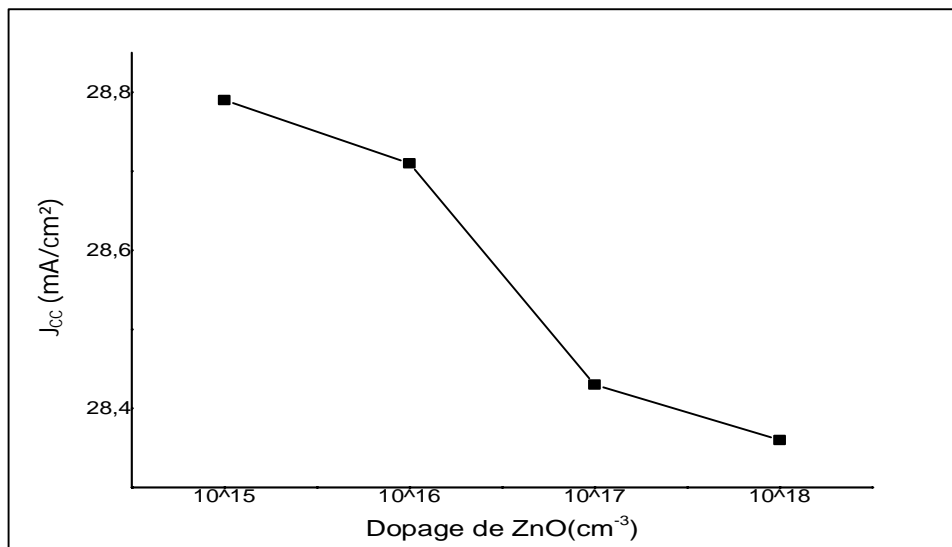


Figure IV.14: Variation de courant de court-circuit en fonction du dopage de ZnO.

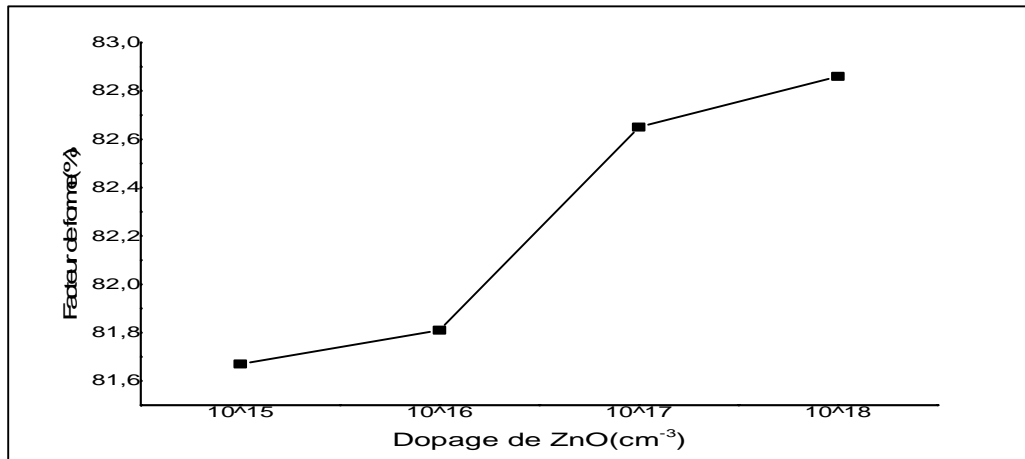


Figure IV.15: Variation du facteur de forme en fonction du dopage de ZnO.

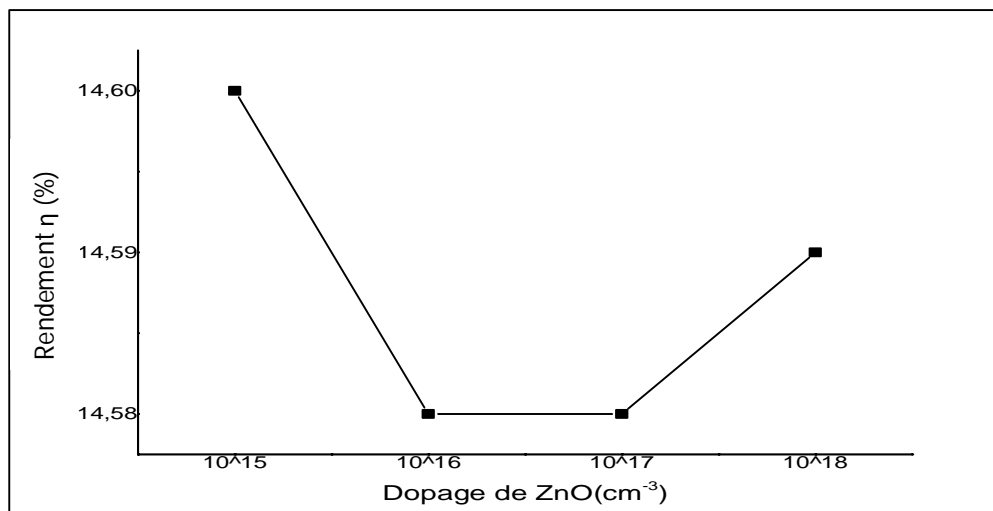


Figure IV.16: Variation du rendement en fonction du dopage de ZnO.

D'après les résultats ci-dessus, la concentration du dopage de l'émetteur ZnO est optimisée à 10^{18} cm^{-3} puisque elle permet d'atteindre un meilleur rendement de conversion qui est dû principalement à l'amélioration de la circulation des porteurs à travers l'émetteur et une réduction de la résistance série.

IV.5 Influence de l'épaisseur de l'émetteur ZnO sur les performances de la cellule solaire ZnO/n-Si

Les figures ci-dessous représentent les variations des paramètres photovoltaïques des cellules solaires simulées en utilisant différentes épaisseurs d'émetteur. Les valeurs numériques correspondantes à ces paramètres sont données en annexe D.

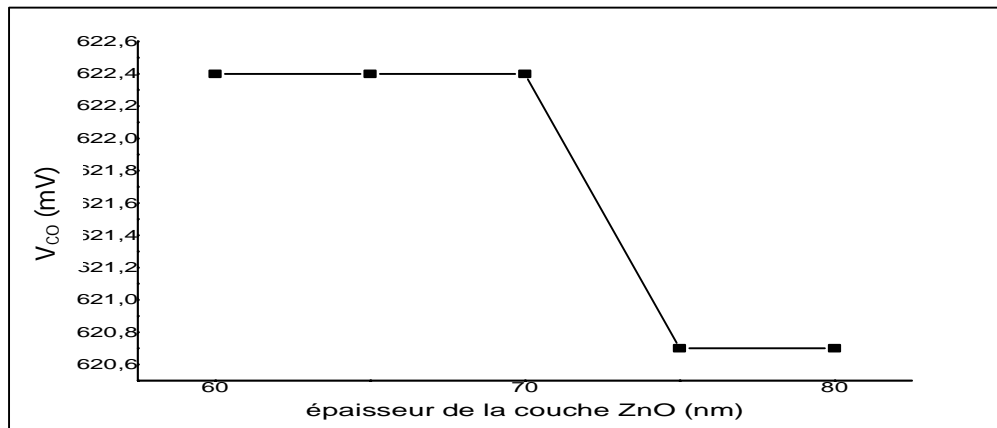


Figure IV.17: Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO.

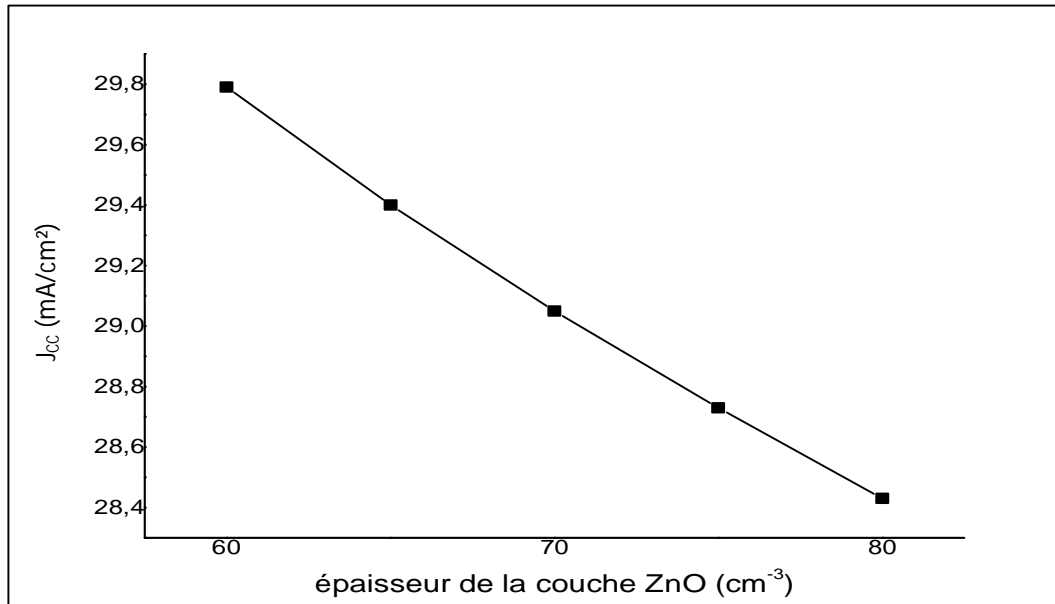


Figure IV.18: Variation du courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO.

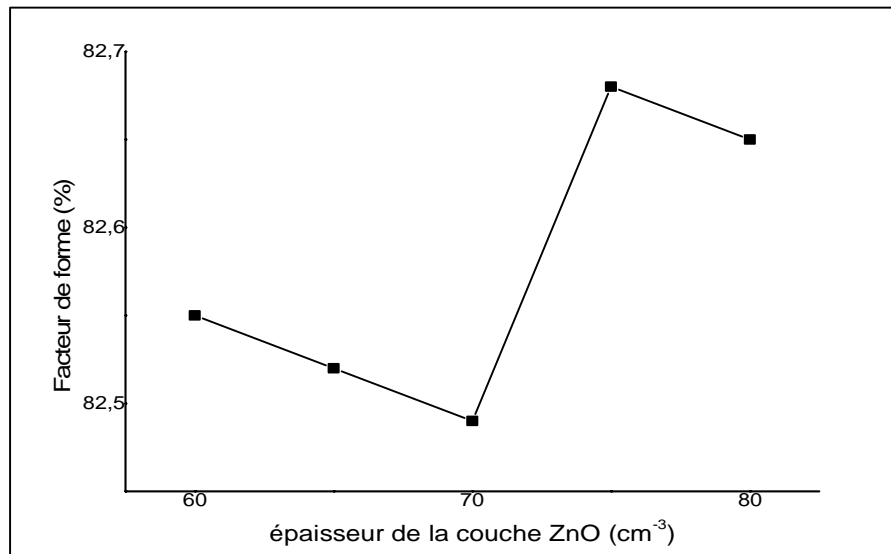


Figure IV.19: Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO.

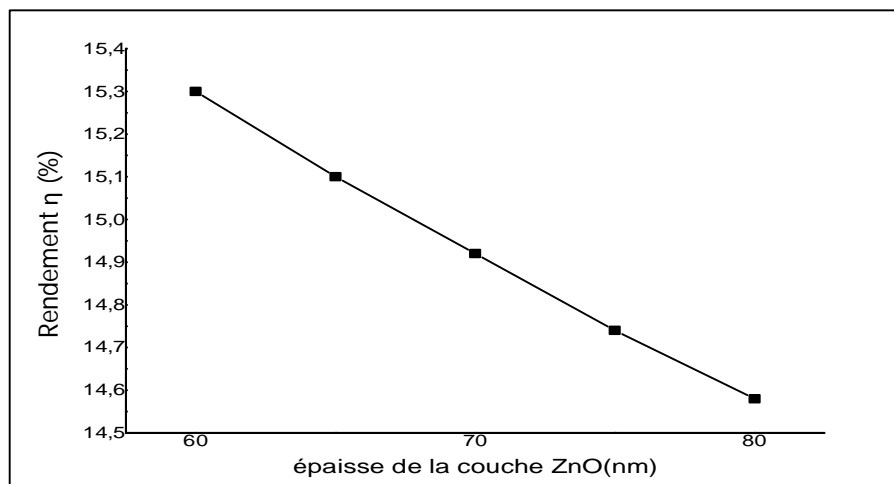


Figure IV.20: Variation de rendement en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO

L'épaisseur de l'émetteur ZnO permettant les meilleures performances photovoltaïques est optimisée à 60 nm. Au-delà de cette valeur, nous observons une chute du rendement de conversion qui peut être expliquée par une réduction de la probabilité de collection des porteurs de charges suite à l'augmentation de la distance à parcourir dans un émetteur plus large.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation des cellules solaires à hétérojonction de type ZnO/n-Si et nous avons étudié l'effet de la variation de plusieurs paramètres structuraux sur leur performances photovoltaïques. D'après ces résultats, nous pouvons conclure que le meilleur rendement de conversion des cellules solaires ZnO/n-Si est obtenu pour un substrat (Si) d'épaisseur 300 μm dopé à $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et un émetteur (ZnO) d'épaisseur 60 nm dopé à $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Références

- [1] W. Favre, "Silicium de type n pour cellules à hétérojonctions : «Caractérisations et modélisations", Thèse doctorat, Université Paris-Sud11, (2011)
- [2] C. Leendertz and R. Stangl, "Modeling an a-Si: H/c-Si Solar cell with Afors-Het", ISBN 978-3-642-2275, (2012)
- [3] U.Gangopadhyay, 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 Cell by the application of passivation layer with different thickness using AFORS-HET and PC1D",IOSR Journal of Engineering(IORJEN) ISSN:2250-3021, (2012),41-48.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude et la simulation d'une cellule solaire à hétérojonction de type ZnO/n-Si. Il s'attache plus particulièrement à l'identification de l'influence de certains paramètres structuraux (dopage, épaisseur de substrat, épaisseur de la couche ZnO) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule, à savoir le courant de court circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement.

Nous avons ainsi montré les potentialités des cellules solaires à hétérojonctions. En effet, 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.

Dans le but de déterminer les paramètres ayant une influence considérable sur les performances des cellules solaires ZnO/n-Si, nous avons réalisé des simulations à l'aide du logiciel AFORS-HET, les résultats obtenus sont satisfaisants démontrant les possibilités d'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque. En effet, l'optimisation des paramètres structuraux de la cellule solaire ZnO/n-Si, permet d'atteindre une tension de circuit ouvert de 0.7 V ; un courant de court-circuit de 27.5 mA/cm², un facteur de forme de 0.83 et un rendement de 16.5%.

En terme de perspectives, il serait intéressant de réaliser d'autres simulations en intégrant une double couche antireflet et une couche d'oxyde interfaciale SiO₂ dans le but d'améliorer davantage les performances de la cellule solaire ZnO/n-Si.

Annexe A

Epaisseur de la base (μm)	Paramètres électriques			
	V_{co} (mV)	J_{cc} (mA/ cm^2)	FF (%)	η (%)
150	602,1	26,45	82,37	13,12
200	610,3	27,32	82,36	13,17
250	616,9	27,94	82,11	14,16
300	621,9	28,43	81,86	14,47

Annexe B

Dopage de la base (cm^{-3})	Paramètres électriques			
	V_{co} (mV)	J_{cc} (mA/ cm^2)	FF (%)	η (%)
$1,5 \cdot 10^{15}$	559,1	28,16	73,95	11,64
$1,5 \cdot 10^{16}$	621,9	28,43	81,86	14,47
$1,5 \cdot 10^{17}$	681,4	29,03	82,67	16,35
$1,5 \cdot 10^{18}$	714,4	27,55	83,87	16,51

Annexe C

Dopage de ZnO (cm^{-3})	Paramètres électriques			
	V_{co} (mV)	J_{cc} (mA/ cm^2)	FF (%)	η (%)
$1 \cdot 10^{15}$	620,7	28,79	81,67	14,60
$1 \cdot 10^{16}$	620,7	28,71	81,81	14,58
$1 \cdot 10^{17}$	620,7	28,43	82,65	14,58
$1 \cdot 10^{18}$	620,7	28,36	82,86	14,59

Annexe D

Epaisseur de la couche ZnO (nm)	Paramètres électriques			
	V_{co} (mV)	J_{cc} (mA/ cm^2)	FF (%)	η (%)
60	622,4	29,79	82,55	15,30
65	622,4	29,40	82,52	15,10
70	622,4	29,05	82,49	14,92
75	620,7	28,73	82,68	14,74
80	620,7	28,43	82,65	14,58