



Université Saâd Dahlab, Blida-1
Faculté de Technologie
Département des Énergies Renouvelables

Par MEBARKI Youcef

Pour l'obtention du diplôme :
MASTER en Énergies Renouvelables
Option : Conversion Photovoltaïque

Thème :

Influence de la Couche BSF Sur les Performances des Cellules Photovoltaïques (Couches minces)

Soutenu devant le jury composé par :

Mm Mazouz Halima	USDB	Président
Mr Bouzaki Mohammed Moustafa	USDB	Promoteur
Mm Amrouche Badia	USDB	Examineur
Mr AIT Sahed Oussama	USDB	Examineur

Juin 2018

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence de la couche BSF sur les performances des cellules photovoltaïques à base de CIGS et CdTe à l'aide de logiciel SCAPS et logiciel AFORS-HET pour les cellules a-Si/c-Si

D'autre part, une optimisation de différents paramètres de la couche BSF (la concentration de dopage, l'épaisseur et energie de gape) a été traitée.

Mots clés : Cellules photovoltaïque en couches minces, Couche BSF, SCAPS et AFORS-HET, CdTe, CIGS et a-Si/c-Si

ملخص

في هذا العمل ، درسنا تأثير طبقة BSF على أداء الخلايا الكهروضوئية CIGS و CdTe باستخدام برنامج SCAPS ؛ من ناحية أخرى ، تم استخدام برنامج AFORS-HET لعلاج الطبقة نفسها فيما يتعلق بالتبادل اللاصق السيليكوني. في الخطوة الثانية ، تمت معالجة تحسين المعلمات المختلفة لطبقة BSF (تركيز التشبع ، وسماكة الطاقة ، وجاذب الطاقة).

الكلمات المفتاحية: الخلايا الضوئية للأغشية الرقيقة ، طبقة BSF ، SCAPS و AFORS-HET ، CdTe, CIGS et a-Si/c-Si

Abstract

In this work, we studied the influence of the BSF layer on the performance of photovoltaic cells based on CIGS and CdTe using SCAPS software and AFORS-HET software for a-Si / c-Si cells.

On the other hand, optimization of different parameters of the BSF layer (doping concentration, thickness and gape energy) has been processed.

Key words: Thin film photovoltaic cells, BSF layer, SCAPS and AFORS-HET, CdTe, CIGS and a-Si / c-Si

Dédicaces

*A ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour ;
A ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans les moments
les plus difficiles ;
Et ceux à qui je dois tant ;
A mes parents ;
A toute la famille ;
A tous mes amis ;*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, sans
exception à la réalisation de ce travail.*

Remerciements

En l'introduction à ce mémoire je remercie ALLAH Qui m'a aidé et m'a donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

*En second lieu, Je tiens à remercier mon encadreur **Dr Mohammed Moustafa Bouzaki**, Son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail. ;*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner ce travail. Et de l'enrichir par leurs propositions. Et tous mes enseignants del'universite Université SaâdDahlab, Blida-1 durant les années des études.
Merci à tous et à toutes ;*

Nomenclature- Symboles-Acronymes

E_{ph} : énergie de photon
 E_g : énergie de bande interdite
 E_c : énergie de bande de conduction
 E_v : énergie de bande de valence
 ΔE : énergie séparant les deux bandes.
 ΔE_c : désaccord de la bande de conduction
 ΔE_v : désaccord de la bande de valence
PV : photovoltaïque
ZCE : zone de charge d'espace
 E_F : niveau de Fermi
Ph : photon
J : jonction
N : zone n
P : zone p
R : résistance
 I_{ph} : courant photo génère
 I_0 : courant de saturation de la diode
q : la charge de l'électron
k : la constante de Boltzmann
T : la température en Kelvin
 I_{cc} : le courant de court-circuit
 V_{co} : la tension de circuit ouvert
 I_m : le courant au point de puissance maximale
 V_m : la tension au point de puissance maximale
 η : rendement
FF : facteur de forme
c : vitesse de la lumière
 λ : longueur d'onde
eV : électron volte
 B_c : bande de conduction
 B_v : bande de valence
TCO : oxyde transparent conducteur
a-Si : couche en silicium amorphe

c-Si : couche en silicium cristallin

BSF : Back Surface Filed

CdTe : Le tellure de cadmium

CIGS : Le disélénide de cuivre, indium et gallium

T_a : la température absolue.

σ : La conductivité intrinsèque du matériau.

τ : Durée de vie des porteurs.

Fz : la technique Float zone

Cz : la technique Czochralski

mc-Si : Le silicium multi-cristallin.

S_{eff} : surface effective

W_b : l'épaisseur de base.

W_{BSF} : l'épaisseur de la couche BSF.

S_b : la vitesse de recombinaison pour la surface de la face arrière au contact ohmique

N : Dopage type N

P : Dopage type P

J : Densité de courant

K : Le cathode

a : L'anode

e : L'épaisseur

ph : photons

Sommaire

Résumé

Dédicaces

Remerciement

Nomenclature-Symboles-Acronymes

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale 1

Chapitre I : Généralité sur les semi-conducteurs et les cellules

photovoltaïques 1

I.1.Introduction..... 4

I.2. Conducteurs - Isolants - Semi-conducteurs 4

I.3.Semi-conducteurs 5

I.3.1.Structure des semi-conducteurs 5

I.3.2. Conduction par électron et par trou 6

I.4.Semi-conducteurs dopés ou extrinsèques 7

I.4.1.Dopage de type N 7

I.4.2.Dopage de type P 8

I.5. Bandes d'énergie des semi-conducteurs dopés 8

I.5.1.Type N..... 8

I.5.2.Type P 9

I.6.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque..... 9

I.7.Les différents paramètres externes d'une cellule photovoltaïque 11

I.7.1. Le courant de court-circuit I_{cc} 11

I.7.2.La tension de circuit ouvert V_{CO} 11

I.7.3.Le facteur de forme FF..... 11

I.7.4.Le rendement η 11

I.8. Conclusion 11

Chapitre II : cellules photovoltaïques en couches minces.....	
II.1. Introduction.....	12
II.2. Principe de l' hétérojonction	12
II.3.Structure de la cellule en couche mince	12
II.3.1.Les composants de la cellule silicium à hétérojonction.....	12
1.L'oxyde transparent conducteur (TCO).....	13
a.Oxyde de Zinc (ZnO).....	13
b.Propriétés générales du ZnO	13
c.Propriétés électriques du ZnO	14
d. Les couches TCO dans les cellules photovoltaïques	14
2.L'emetteur.....	15
3.L'absorbeur	15
4.BSF (Back Surface Field)	16
Théorie du BSF	16
5.Les contacts	18
II.4. Cellule photovoltaïque à base des couche minces	18
a. Cellules PV à base de CIGS.....	18
b. Cellules PV à base de CdTe.....	19
c. Cellules PV à base de Hétérojonction de silicium.....	19
II.5. Conclusion	20
Chapitre III : Influence de la Couche BSF Sur les Performances des Cellules CIGS, CdTe et a-Si/c-Si	
III.1. Introduction	21
III.2.Modélisation numérique d'une cellule PV à base CIGS	21
III.2.1.Structures et paramètres	22
III.2.2.Résultats et discussion	22
III.2.3.Insertion de la couche BSF dans la structure ZnO/CdS/CIGS	23
III.2.5.1.Influence de La concentration de dopage BSF	24
III.2.5.2.Influence de l'épaisseur de BSF.....	25
III.2.5.3.Energie de gap CIGS.....	25
III.3.Modélisation numérique d'une cellule PV à base CdTe	26
III.3.1Structures et paramètres	26

III.3.2. Résultats et discussion.....	27
III.3.3.Influence de la couche BSF dans la Structure CdTe	27
III.3.3.1.Influence de La concentration de dopage BSF	28
III.3.3.2.Influence de l'épaisseur de BSF.....	29
III.4.Modélisation numérique d'une cellule PV à hétérojonction a-Si/c-Si	30
III.4.1. Structures et paramètres	30
III.4.2.Influence de La concentration de dopant sur les performances de la cellule.....	32
III.4.3.Influence de l'épaisseur sur les performances de la cellule.....	33
III.4.4.Influence de l'énergie de gap sur les performances de la cellule	33
III.5.Conclusion.....	34
Conclusion générale.....	35
Références bibliographiques	36
Annexes.....	40

Liste des figures

Figure 1: Les Différentes de sources de Production d'ER dans le monde en 2010 [1] ...	1
Figure 2: Pénétration des EnR dans la production nationale en TWh .	2
Figure 3: Structure du parc de la production nationale en MW .	3

Chapitre I

Figure I- 1: La structure du diamant.	5
Figure I- 2: plan de structure du diamant.	6
Figure I- 3: Réseau de la déplacement trous et électrons .	7
Figure I- 4: Dopage de Si en utilisant As.	7
Figure I- 5: Structure de bandes dans un semi-conducteur dopé type N, à 0K et à 300K	8
Figure I- 6: Structure de bandes dans un semi-conducteur dopé type P, à 0K et à 300K	9
Figure I- 7: a) Transmission d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} < E_g$ dans un matériau	9
Figure I- 8: Description d'une cellule photovoltaïque.	10

Chapitre II

Figure II- 1: Structure d'une cellule photovoltaïque silicium à hétérojonctions.	12
Figure II- 2: Cellule solaire a champ BSF.	17
Figure II- 3: Diagramme de bandes d'une cellule solaire à BSF.	17
Figure II- 4: Schéma de la première cellule solaire à simple hétérojonction de	19

Chapitre III

Figure III- 1: structure de la cellule étudié (CIGS).	21
Figure III- 2: Caractéristique J-V de la cellule modélisé - CIGS.	22
Figure III- 3: structure ZnO(n)/CdS(n)/CIGS(p)/CIGS(p+)	23
Figure III- 4: Caractéristiques J-V – BSF-CIGS.	23
Figure III- 5: Influence de la concentration de dopage de la couche BSF sur la performance de structure de CIGS.	24
Figure III- 6: Effet de l'épaisseur de la couche BSF sur les performances de structure de CIGS.	25
Figure III- 7: Effet de l'énergie de gape de la couche BSF sur les performances de structure de CIGS.	26
Figure III- 8: Schéma d'une cellule solaire à base de CdTe.	26
Figure III- 9: Caractéristique J-V de la cellule modélisé - CdTe.	27
Figure III- 10: Structure de la cellule photovoltaïque modélisé – CdTe.	28
Figure III- 11: Influence de la concentration de dopage de la couche BSF sur la performance de structure de CdTe.	28
Figure III- 12: Influence de l'épaisseur de la couche BSF sur la performance de structure de CdTe.	29
Figure III- 13: Structure d'une hétérojonction a-Si(p)/c-Si(n).	30

Figure III- 14: Caractéristiques de JV de a-Si (p) / c-Si (n).	30
Figure III- 15: Structure d'une hétérojonction a-Si(p)/c-Si(n)/a-Si(n)	31
Figure III- 16: Effet de la concentration en dopant de la couche de BSF sur la performance de la cellule solaire -HJ.	32
Figure III- 17: Effet de l'épaisseur de la couche de BSF sur la performance de la cellule solaire -HJ.	33
Figure III- 18 : Effet de l'énergie de gape de la couche de BSF sur la performance de la cellule solaire -HJ.	34
Figure A- 1: Interface graphique du logiciel de simulation 1D AFORS-HET	40
Figure A- 2: Définition de la structure et introduction des paramètres.	41
Figure A- 3: Définition de la structure logiciel SCAPS	42

Liste des tableaux

Chapitre I

Table I- 1:Exemples de semi-conducteurs.	5
---	---

Chapitre III

Table III- 1: Paramètres adoptées pour différentes couches – CIGS.	21
Table III- 2:Paramètres de différentes couches de la structure modélisée –CdTe.....	27
Table III- 3:Différents paramètres retenus pour la cellule solaire HET dans la simulation	31

Introduction Générale

Introduction Générale

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. C'est pourquoi l'orientation vers des alternatives durables aux énergies fossiles est plus que jamais d'actualité. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés. Ces ressources étant limitées, leur raréfaction provoquera une augmentation importante de leur prix, déjà visible aujourd'hui. Les sources énergétiques renouvelables, telles que l'hydroélectricité, la biomasse, l'éolien et le solaire, sont donc appelées à se développer largement dans les prochaines années.

Dans ce contexte, certains pays industrialisés comme les pays de l'Union européenne et la Suisse, certains organismes et individus tentent de développer la conscience énergétique des populations ainsi que de promouvoir les énergies renouvelables dont fait partie le photovoltaïque.

EUROSTAT a fait un point le 13 juillet 2010 sur l'énergie renouvelable dans son rapport REN 21 (figure 1). Le rapport identifie la maîtrise de la demande énergétique. [1]

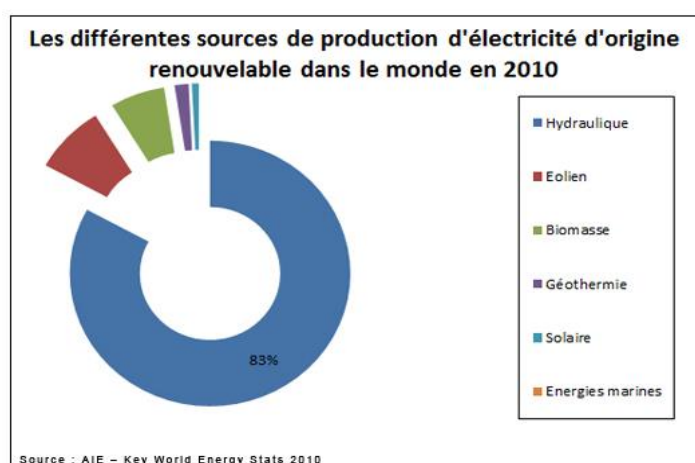


Figure 1: Les Différentes de sources de production d'ER dans le monde en 2010 [1]

L'énergie solaire a l'avantage d'être disponible dans le monde entier en quantité non limitée et les cellules solaires sont un des principaux moyens de récupérer cette énergie puisqu'elles sont capables de convertir directement la lumière du soleil en électricité sans générer de pollution. Les panneaux solaires sont faciles à être intégrés dans le bâtiment et peuvent facilement être raccordés au réseau pour bénéficier du courant qu'ils produisent.

L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable (figure 2) [2].

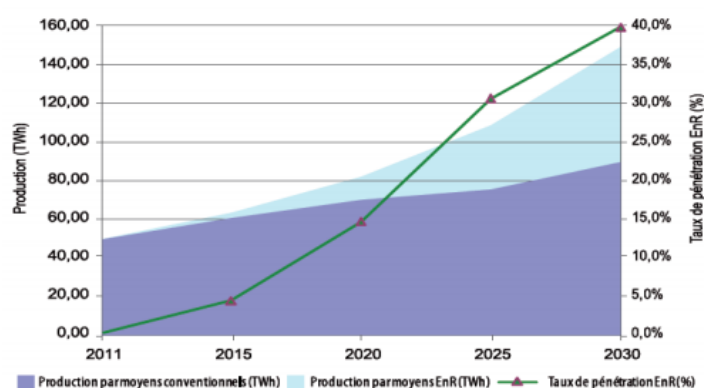


Figure 2: Pénétration des EnR dans la production nationale en TWh [2].

Le programme des énergies renouvelables (figure.2) est défini par le ministère de l'énergie et des mines (Avril 2011) pour les différentes phases [2] :

- D'ici 2020, il est attendu l'installation d'une puissance totale d'environ 2 600 MW pour le marché national et une possibilité d'exportation de l'ordre de 2 000 MW.
- D'ici 2030, il est prévu l'installation d'une puissance de près de 12 000 MW pour le marché national ainsi qu'une possibilité d'exportation allant jusqu'à 10 000 MW.

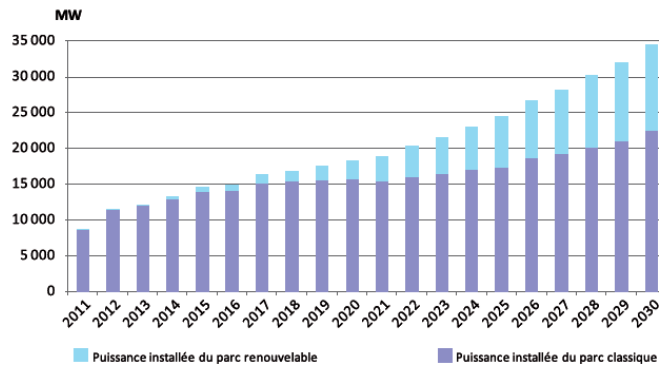


Figure 3: Structure du parc de la production nationale en MW [2].

Par ailleurs, l'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie non polluante, modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture. [3]

- Dans le premier chapitre, nous présentons les notions fondamentales sur les cellules solaires (Les matériaux semi-conducteur, Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, Compositions d'une cellule couche mince et les différentes caractéristique d'une cellule solaire).
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons les différents couches des cellules photovoltaïques en couches minces.
- Dans le troisième chapitre, l'influence d'insertion de la couche BSF sur les performances des cellules photovoltaïques à base de CIGS, CdTe et a-Si/c-Si sera abordée.

Chapitre I : Les semi-conducteurs et l'énergie photovoltaïque

I.1. Introduction

Les cellules photovoltaïques (PV) sont des composants optoélectroniques capables de convertir directement la lumière en électricité, en utilisant l'interaction de la lumière avec certains matériaux semi-conducteurs. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque fait appel aux propriétés du rayonnement solaire et celles des semi-conducteurs. [4]

Dans ce chapitre on fait appel à quelques bases indispensables dans le domaine photovoltaïque. Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur les notions fondamentales sur les cellules solaires (Les matériaux semi-conducteur, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et les compositions d'une cellule couche mince).

I.2. Conducteurs - Isolants - Semi-conducteurs

Par leurs propriétés électriques, les matériaux peuvent être classés en trois groupes : les conducteurs, les semi-conducteurs et les isolants.

Les matériaux ayant la plus faible résistivité à température ambiante, typiquement inférieure à $10^{-5}\Omega\text{cm}$, sont les métaux (cuivre, or, argent, aluminium...). La conduction électrique s'effectue essentiellement par les électrons libres dont la concentration diffère peu d'un métal à l'autre (de 10^{22} à 10^{23}cm^{-3}) quelle que soit sa pureté. Une augmentation de la température provoque une légère augmentation de la résistivité, pouvant s'expliquer par le fait que les électrons libres sont gênés dans leur déplacement par les vibrations (croissantes avec la température) des atomes du métal. [5]

Les matériaux dont la résistivité est typiquement supérieure à $10^8\Omega\text{cm}$ sont considérés comme isolants ; c'est le cas pour le verre, le mica, la silice (SiO_2), le carbone (diamant). Cette fois l'augmentation de la température peut provoquer la libération d'électrons (ainsi que de "trous") qui peuvent participer à la conduction électrique, ce qui provoque une baisse de la résistivité avec la température. [5]

Entre les métaux et les isolants se trouvent les semi-conducteurs (SC) dont la résistivité varie de 10^{-3} à $10^4\Omega\text{cm}$ (ou plus). La conduction électrique se fait par les électrons et les trous, ou de façon préférentielle par l'un ou l'autre type de porteurs. Un semi-conducteur peut être soit pur auquel cas il est dit "intrinsèque", soit dopé par des impuretés (qui permettent de contrôler sa résistivité) auquel cas il est dit "extrinsèque". Si on prend, par

exemple, du Silicium assez pur et qu'on lui ajoute un atome de Bore ou de Phosphore pour 10^5 atomes de Silicium, sa résistivité passe de 10^3 à environ $10^{-2} \Omega \text{cm}$. [5]

Le tableau I.1 donne des exemples de matériaux ou de composés semi-conducteurs en fonction des éléments qui les constituent et de la position de ces éléments dans le tableau de Mendeleïev. [5]

Table I- 1:Exemples de semi-conducteurs.

Colonne	Semi-conducteur
IV	Ge, Si
III-V	Binaire GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb
	ternaire $Al_x Ga_{1-x} As, GaAs_y . P_{1-y}$
	Quaternaire $Al_x Ga_{1-x} As_y P_{1-y}$
II-VI	binaire CdS, HgTe, CdTe, ZnTe, ZnS
	Ternaire $Cd_x Hg_{1-x} Te$

I.3. Semi-conducteurs

I.3.1. Structure des semi-conducteurs

La structure du silicium et du germanium est la même que celle du diamant. Chaque atome est lié à 4 voisins placés aux sommets d'un tétraèdre par une liaison covalente : Ces éléments sont « tétravalents ».

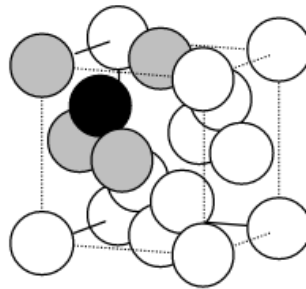


Figure I- 1:La structure du diamant.

La figure I.2 correspond à une représentation sur un plan de la structure. Les traits figurent les électrons de valence.

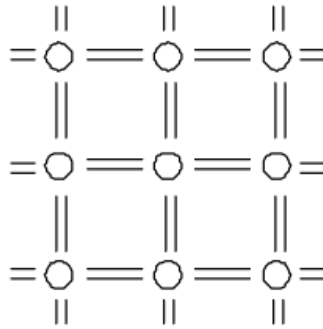


Figure I- 2 :plan de structure du diamant

La théorie des bandes appliquée aux semi-conducteurs amène à considérer une bande de valence entièrement pleine qui est séparée d'une bande de conduction par une bande interdite distante de l'énergie ΔE .

Si on apporte une énergie thermique ou lumineuse suffisante à un électron, il peut passer de la bande de valence à la bande de conduction avec une probabilité P proportionnelle à :

$$P \propto \exp(-\Delta E / kT) \dots \dots \dots (I.1)$$

ΔE : est l'écart en énergie séparant les deux bandes (Diamant $\Delta E=7eV$; Silicium $\Delta E=1,12eV$; Germanium $\Delta E=0,7eV$)

T : la température absolue.

$k=1,38.10^{-23}JK^{-1}$ est la constante de Boltzmann (Pour $T=300$, $kT=0,0025eV$)

Dans un semi-conducteur, ΔE est assez faible pour autoriser, à température ambiante, le passage d'un petit nombre d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction.

[6]

I.3.2. Conduction par électron et par trou

Si une liaison de valence est brisée (agitation thermique, photon...) l'électron devient mobile : il laisse un excès de charge positive le «trou» (symbolisé par un + dans un carré). Cette lacune va être comblée par un électron voisin libéré par agitation thermique et qui va à son tour laisser un trou :ceux-ci semblent se déplacer dans le réseau (figure I.3). Aux électrons (masse positive, charge négative) correspondent des trous (masse négative, charge positive). Le déplacement des trous étant un processus à deux étapes, leur mobilité dans le réseau est plus faible que celle des électrons.

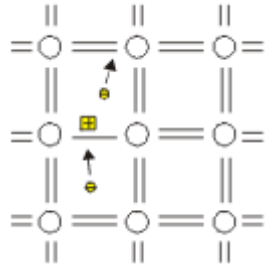


Figure I- 3 :Réseau du déplacement trous et électrons.

Trous et électrons constituent les porteurs libres intrinsèques dont le nombre est fonction de la température. La neutralité électrique du matériau impose que les trous et les électrons soient en nombres identiques (n_i et p_i).

Pour le silicium pur à 300K, on mesure : $n_i=p_i=1,5.10^{10}.cm^{-3}$. Ce nombre est très faible si on le compare au nombre des atomes.

Toujours pour le silicium pur à 300 K, les mobilités sont :

$$\mu_n=12.10^6.m^2V^{-1}s^{-1} \text{ et } \mu_p=5.10^6.m^2V^{-1}s^{-1}.$$

La conductivité intrinsèque du matériau $\sigma=e(n_i.\mu_n+p_i.\mu_p)$ est très faible.[6]

I.4. Semi-conducteurs dopés ou extrinsèques

Dans un matériau pur, on introduit des impuretés par dopage. Pour que celui-ci soit contrôlable. [6]

I.4.1. Dopage de type N

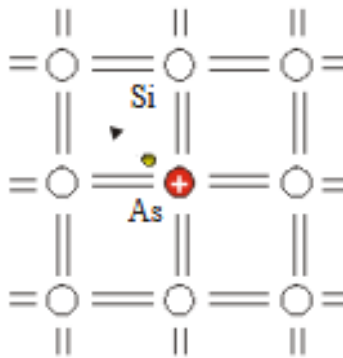


Figure I- 4 Dopage de Si en utilisant As.

On introduit dans la matrice de silicium des atomes d'impuretés pentavalents tels que le phosphore P, l'arsenic As et l'antimoine Sb. [6]

Chaque atome d'impureté amène un électron de valence supplémentaire. Cet électron est peu lié au noyau ($E \approx 0,01eV$) et passe aisément dans la bande de conduction. La conductivité du matériau (conductivité extrinsèque) devient à cause du taux de dopage, très supérieure à celle du matériau pur. Les atomes pentavalents ou donneurs deviennent des

ions positifs après le passage des électrons excédentaires dans la bande de conduction .Les données numériques précédentes montrent que le nombre des électrons dans le matériau, fonction du taux de dopage, est supérieur au nombre des trous, fonction de la température, d'un facteur supérieur à 10^3 . La conduction dite de type N (négative) est assurée par des électrons. Les électrons sont les porteurs majoritaires. [6]

I.4.2. Dopage de Type P

On introduit dans le réseau une impureté trivalente: bore B, aluminium Al, gallium Ga, indium In. Il manque à l'impureté un électron de valence pour assurer les 4 liaisons avec les atomes de silicium voisins. Un faible apport d'énergie ($\approx 0,05\text{eV}$) suffit pour qu'un électron d'un silicium voisin soit capté par l'impureté: il y a formation d'un trou peu lié et donc mobile. Les atomes trivalents (accepteurs) deviennent des ions négatifs par capture d'un électron. Compte tenu des taux de dopage, ces trous sont beaucoup plus nombreux que les porteurs intrinsèques du cristal pur. La conduction de type P(positive) est assurée par des trous. Les trous sont les porteurs majoritaires. [6]

I.5. Bandes d'énergie des semi-conducteurs dopés :

I.5.1. Type N

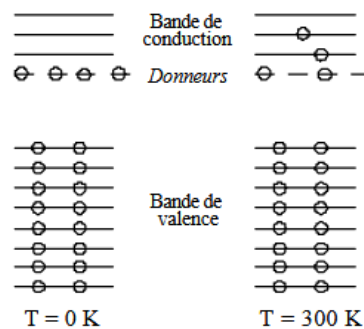


Figure I- 5: Structure de bandes dans un semi-conducteur dopé type N, à 0K et à 300K.

Les atomes de pentavalents (donneurs) introduisent des charges positives dans le réseau, charges qui attirent les électrons en créant ainsi de nouveaux niveaux dont l'énergie est légèrement inférieure à ceux de la bande de conduction du matériau pur. Si on élève la température, ces électrons peuvent passer dans la bande de conduction. [6]

I.5.2. Type P

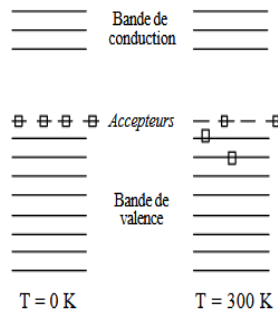


Figure I- 6: Structure de bandes dans un semi-conducteur dopé type P, à 0K et à 300K.

Les atomes de trivalentes (accepteurs), introduisent des trous dans la bande de valence. Si on élève la température, ces trous se comportent comme des charges positives libres. [6]

I.6. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

La production d'énergie photovoltaïque est basée sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. En effet, ces derniers sont capables d'absorber des photons dont l'énergie $E_{\text{photon}} = h\nu$ est supérieure à la largeur de bande interdite $E_g = E_c - E_v$. L'énergie du photon est absorbée par un électron de la bande de valence, qui est transféré dans la bande de conduction. Son absence dans la bande valence est modélisée par un trou, porteur de charge positive. L'absorption du photon génère ainsi une paire électron-trou. La figure I.7montre les différentes interactions entre un photon et un semi-conducteur. Dans le cas où l'énergie du photon est supérieure à celle de la bande interdite du matériau, l'excès d'énergie est libéré par l'électron sous forme de phonons et donc de chaleur (thermalisation). Cependant, un matériau semi-conducteur seul ne permet pas de générer de courant électrique. En effet, les paires électron-trou ne sont pas collectées et elles se recombinent donc toutes au bout d'un temps caractéristique τ (temps de vie des porteurs).

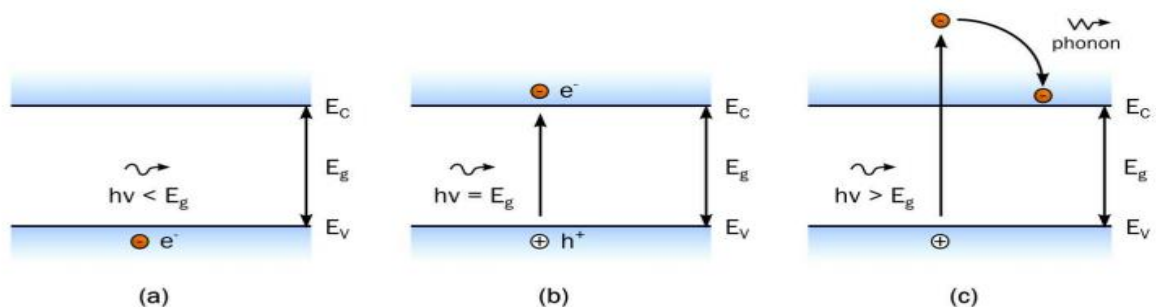


Figure I- 7:a) Transmission d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} < E_g$ dans un matériau Semi-conducteur. b) Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} = E_g$ et formation d'une paire électron-trou. c) Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} > E_g$, formation d'une paireélectron-trou et thermalisation de l'électron par émission de chaleur (phonon)[7].

L'une des étapes clés du fonctionnement d'une cellule PV est la séparation des électrons et des trous avant qu'ils ne se recombinent au sein du matériau. Cette séparation électrons/trous peut être obtenue par une différence de potentiel réalisée par la mise en contact de deux semi-conducteurs, un de type p et un de type n, créant une jonction p-n. Sous l'effet du gradient de concentration, les porteurs majoritaires, les trous dans le semi-conducteur de type p et les électrons dans le semi-conducteur de type n vont diffuser au travers de l'interface p/n.

Ces porteurs vont alors se recombiner. La zone sans porteur mobile (atomes ionisés) ainsi créée est appelée zone de charge d'espace (ZCE) ou zone de déplétion. Il y a ainsi création d'un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires. Ce champ électrique permet la migration des trous vers la zone dopée p dans le sens du champ et les électrons vers la zone dopée n en sens inverse au champ. L'alignement du niveau de Fermi E_F induit une courbure des bandes ainsi qu'une barrière de potentiel V_D .

Sous éclairage, les électrons générés par des photons vont immédiatement être dirigés vers la zone chargée n et les trous vers la zone p. Des conducteurs métalliques permettent de collecter ces électrons et trous et de récupérer le courant généré par la cellule solaire.

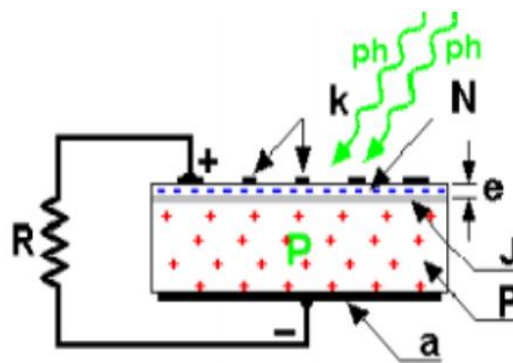


Figure I- 8:Description d'une cellule photovoltaïque [8].

I.7. Les différents paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

I.7.1. Le Courant de court -circuit I_{sc} (A/cm²)

Le courant de court circuit est le courant débuté par la cellule sous éclairement en court-circuit la sortie. C'est-à-dire que : $I_{sc}=I(V= 0)$ Pour une cellule solaire idéale le courant de court circuit est égal au courant photovoltaïque I_{ph} .

I.7.2. La Tension de circuit ouvert V_{co} (v)

La tension de circuit ouvert est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert. C'est à dire : $V_{co} = V(I = 0)$;

Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donné ;

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \approx \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \dots\dots\dots (I.2)$$

I.7.3. Le Facteur de forme FF (%)

Le point de fonctionnement usuel d'une cellule solaire est un point de la courbe I(V) qui correspond à une puissance maximale dissipée par la charge. On appelle facteur de forme FF (Fill Factor), la quantité :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co}I_{cc}} = \frac{V_{max}I_{max}}{V_{co}I_{cc}} \dots\dots\dots (I.3)$$

I.7.4. Le rendement η (%)

Il est défini par le rapport entre l'énergie maximale délivrée par la cellule, P_M , et l'énergie lumineuse incidente, P_0 :

$$\eta = \frac{P_M}{P_0} = \frac{FF * I_{cc} * V_{co}}{P_0} \dots\dots\dots (I.4)$$

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions fondamentales sur les cellules solaires (Les matériaux semi-conducteur, Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, Compositions d'une cellule couche mince) et structure de Semi-conducteur (dopage, bonde d'énergie) ainsi les différentes caractéristiques d'une cellule solaire.

Chapitre I : Les semi-conducteurs et l'énergie photovoltaïque

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, la filière photovoltaïque en couche minces, ses structures et le rôle de chaque couche et aussi les différentes cellules de cette filière seront présentés.

II.2. Principe de l'hétérojonction

Lorsque deux matériaux métal/semi-conducteur, semi-conducteur/semi-conducteur, isolant/semi-conducteur entrent en contact, il s'établit un échange de façon à faire tendre le système vers un équilibre thermodynamique. Pour une hétérojonction, la zone fortement dopée constituant l'émetteur dans une homo-jonction et remplacée par un matériau de grande largeur de bande interdite. On dit alors que la vitesse de recombinaison de surface avant est remplacée par une vitesse de recombinaison d'interface soit inférieure de plusieurs ordres de grandeur, à condition que le matériau de grande largeur de bande interdite soit passif (absorption faible, recombinaisons quasi-nulles). La structure de bandes finales dépend de plusieurs paramètres des deux matériaux en contact : la valeur des largeurs des bandes interdites E_{g1} et E_{g2} , des affinités électroniques χ_1 et χ_2 , et des niveaux de dopage δ_n et δ_p . [8]

II.3. Structure de la cellule en couche minces

II.3.1. Les composants de la cellule silicium à hétérojonctions :

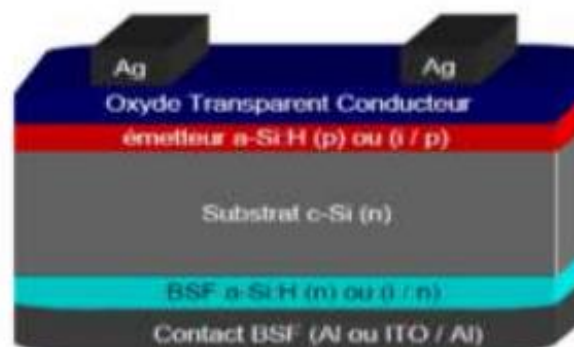


Figure II- 1: Structure d'une cellule photovoltaïque silicium à hétérojonctions.

1 L'oxyde transparent conducteur (TCO)

La première couche pour une structure d'une cellule photovoltaïque à base des couches minces est la couche TCO (couche fenêtre)

Un excellent matériau pour former une couche TCO est défini par une forte conductivité électrique combinée avec une faible absorption dans le visible. En général, ces deux caractéristiques sont liées à l'épaisseur de la couche déposée. Par exemple, elles dépendent de la taille des grains, qui, usuellement croît avec l'épaisseur du film.

Les TCO les plus connus sont les oxydes d'indium, de cadmium, d'étain, de zinc et de gallium [9]. Couramment, les oxydes sont dopés par un métal. Cependant ce dopant métallique n'est actif que lorsqu'il se substitue au métal primaire. La bande de conduction est alors, fortement perturbée par chaque atome dopant, la diffusion des électrons de conduction est alors accrue, et la mobilité et en conséquence la conduction chute. C'est pourquoi certains oxydes sont dopés avec du fluor, qui, lorsqu'il se substitue à l'oxygène, engendre une perturbation de la bande de valence, ce qui minimise la diffusion des électrons de conduction [9].

a. Oxyde de Zinc (ZnO)

Pendant de nombreuses années, les principales applications de l'oxyde de zinc se sont situées dans les domaines de l'industrie chimique et pharmaceutique. Actuellement de nouvelles voies de recherches en optoélectronique suscitent un très vif intérêt pour ce matériau car ses propriétés sont multiples : grande conductivité thermique, grande capacité calorifique, constante diélectrique moyenne, haute résistivité, faible absorption d'eau. Il est important de noter que sous sa forme pigmentaire, il diffuse et absorbe fortement les rayonnements ultraviolets [10].

b. Propriétés générales du ZnO

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

photoluminescence, électroluminescence, comme capteur de produit chimique dans les couches minces [11-12].

c. Propriétés électriques du ZnO

C'est un semi-conducteur dégénéré de type n, La grande conductivité des couches d'oxydes purs est due à la forte concentration en porteurs libres (électrons), étant donné que la mobilité dans ces couches est considérablement plus faible que celle en volume du matériau correspondant. La forte concentration en électrons est attribuée à la déviation par rapport à la stoechiométrie (ou défauts dans la structure).

Il y a une certaine anomalie dans la littérature concernant l'énergie du gap. Srikant et Clarke [13] annoncent que le gap d'énergie du ZnO à la température ambiante est de 3,3 eV, tandis qu'une bande de valence à la transition de niveau de donneur à 3,15 eV explique le fait qu'une plus petite valeur (typiquement 3,2 eV) est souvent rapportée. Ainsi, le gap à température ambiante du ZnO est compris entre 3,2 et 3,3 eV.

Une conductivité élevée ($>5.10^3 \Omega^{-1}.cm^{-1}$) est possible dans le ZnO de type n, en raison des défauts intrinsèques, des dopants (Al, In, Ga, B, F) ou en combinaison [14]. Les mobilités des électrons dans des couches minces de ZnO rapportées, sont typiquement de l'ordre de 20 à 30 $cm^2/V.S$. En outre, la mobilité maximale obtenue dans les cristaux simples de ZnO est de l'ordre de $\sim 200 cm^2/V.S$.

Nous notons que ce matériau peut être comme semi-conducteur dont les porteurs majoritaires sont des trous (type p). La conductivité de type p a été obtenue pour la première fois en 2001 par Aoki et al [15].

d. Les couches TCO dans les cellules photovoltaïques:

Les TCO dans les cellules solaires sont employés comme électrodes transparentes. Ils doivent nécessairement avoir une haute transmission optique afin de permettre un transport efficace des photons jusqu'à la couche active et également une bonne conductivité électrique qui est requise pour obtenir le moins de pertes de transport des charges photo-générées.

Ces deux propriétés sont liées à la concentration n_V : la transmission est inversement proportionnelle et la conductivité est proportionnelle. Une concentration élevée, par exemple, augmente la conductivité électrique mais diminue aussi la transmission dans le domaine du visible et du proche infrarouge. Ceci est dû à une absorption et une réflexion

des charges libres. La valeur optimale de n_V dépend du rendement quantique de la couche active.

La tenue du matériau est aussi un élément clé pour une cellule performante. Concernant les cellules en silicium amorphe, par exemple, le TCO doit être inerte au flux d'hydrogène présent dans la phase de dépôt du silicium. En sa présence, l'ITO peut se brunir et perdre de sa transparence sous de telle condition, contrairement à une couche mince de ZnO qui reste stable [16]. De plus, la couche doit être stable dans le but de maintenir ces propriétés optico-électriques pendant au moins quinze ans.

Les TCO se trouvent dans différents types de cellules solaires. Ils peuvent être utilisés dans tous les types de cellules telles que a-Si:H, poly-Si:H, CIGS, polymères, etc. Avec leurs propriétés qui diffèrent d'un TCO à l'autre, chacun sera plus ou moins efficace dans un type de cellule précis. Fortunado et al. Dressent un panorama des différentes utilisations des TCO pour les cellules solaires transparentes [17]. Principalement deux types de structures sont déposés :

- L'homo-jonction : deux couches distinctes en contact.
- L'hétéro-jonction : un réseau interpénétré de donneurs et d'accepteurs.

2 L'émetteur

L'émetteur permet d'avoir une jonction (p-n) afin de séparer les paires électron-trou photogénérés. Il doit être pris très mince pour minimiser l'absorption dans cette couche. Toute fois, c'est une couche qui a une résistance carrée importante d'où la nécessité de la couvrir d'un excellent conducteur (métal ou oxyde transparent conducteur) pour assurer la collecte des porteurs. [18]

3 L'absorbeur

L'absorbeur est la partie de la cellule dans laquelle les photons vont être convertis en paires électrons-trous. Dans le cas présent, il s'agit d'un semi-conducteur de type P de la famille I-III-VI, dont les différentes variantes déjà étudiées conduisent à la formule générale suivante : $(\text{Cu,Ag})(\text{In,Ga,Al})(\text{Se,S,Te})_2$. La substitution du Cu par de l'argent, de l'indium par du gallium ou de l'aluminium, du sélénium par du soufre ou du tellure, permet de modifier les propriétés du matériau comme sa largeur de bande interdite. Les composés les plus développés en recherche et en industrie sont le $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ et le

Cu(In,Ga)(Se,S)₂. L'élaboration du matériau CIS a été accomplie au sein de laboratoire LMESM et sera utilisé dans le présent travail comme couche absorbeur.[19]

Une couche absorbante doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, il est donc préférable que celui-ci ait une bande interdite directe, dont la valeur soit de l'ordre de 1,1 à 1,7 eV. Sa conductivité des de l'ordre de $1 \cdot 10^{-2}(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ et de type p. [20]

4 BSF (Back Surface Field)

Le BSF est une couche qui crée un champ électrique arrière et qui permet également de passiver la face arrière de la cellule. Le BSF est une couche fortement dopé (p+ ou n+) avec le même type de dopage que le substrat. Avec une jonction p+-p ou n+-n, une barrière de potentiel est induite par la différence de niveau de dopage entre le substrat et le BSF.

Cette barrière de potentiel sur la face arrière de la structure permet de confiner les porteurs minoritaires dans le substrat et ainsi d'éviter qu'ils ne se recombinent sur la face arrière de la cellule. La structure BSF permet de réduire les recombinaisons sur la face arrière et d'assurer une meilleure collecte des porteurs majoritaires [21].

Donc l'ajout d'un champ électrique à la surface arrière au voisinage du contact ohmique fait, que les porteurs minoritaires vont être repoussés vers la zone de charge d'espace pour une meilleure collection [22].

Théorie du BSF

Les pertes dues aux défauts et aux contacts ohmiques des deux surfaces de la cellule solaire est modélisé par une recombinaison en surface ayant une vitesse, qui caractérise la qualité des surfaces. Pour le cas du contact ohmique idéal, la vitesse de recombinaison doit être infinie $S = \infty$ [23], c.à.d.tous les porteurs de charge près proches de cette surface, seront recombinaison. Pour l'autre cas de la surface idéale la vitesse S doit être nulle pour l'objectif d'avoir une surface qui ne représente aucun facteur de détournement des porteurs. Pour résoudre ce problème les recherches ont adopté une structure de cellule solaire qui minimise ces pertes [24], la structure la plus simple de ce type des photopiles est représentée sur la figure (II -2).

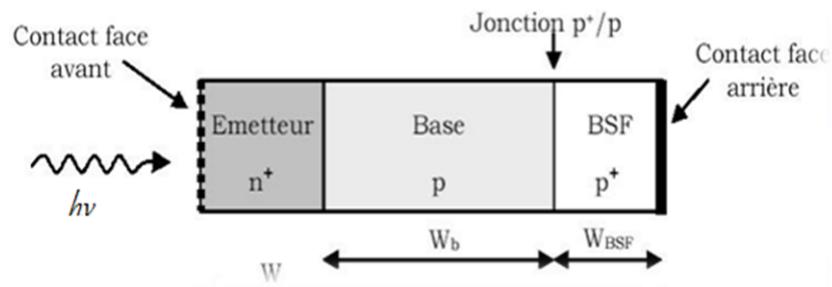


Figure II- 2: Cellule solaire a champ BSF.

La base de cellule solaire est constituée de deux régions, la base proprement dite et une zone fortement dopée au voisinage du contact arrière, une telle constitution entraîne deux conséquences : La création d'une petite barrière supplémentaire d'énergie et le confinement des porteurs minoritaires dans la base. De cette façon, on récupère les porteurs de charge créés à l'arrière de la base au voisinage du contact ohmique qui sont normalement perdus dans les cellules simples.

Godlewski a présenté la première étude sur la structure n+-p-p+ qui modélise les résultats de la présence de la jonction p-p+ ou bien Low-High jonction.

La figure (II .2) montre les différentes couches de la structure BSF et la figure (II.3) montre la structure énergétique de la cellule solaire BSF avec le confinement des porteurs minoritaires.

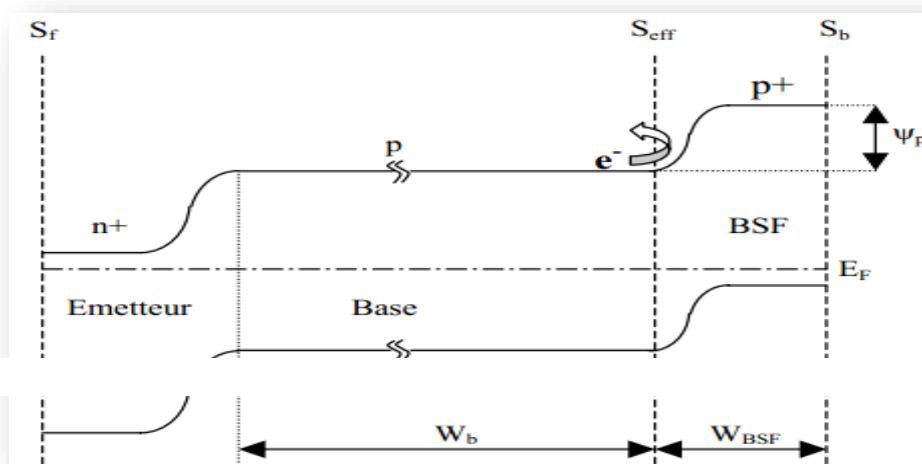


Figure II- 3 : Diagramme de bandes d'une cellule solaire à BSF

5 Les contacts

Les contacts métalliques sont placés sur les deux faces de la cellule pour les structures standards représentées dans la figure II.6. Ces contacts permettent de collecter le courant photo-généré. Les contacts métalliques de type ohmique constituent un cas idéal car le maximum de courant sera collecté avec ce type de contact. Outre un choix de métal donnant des contacts ohmiques, il est aussi important d'avoir des résistances de contact le plus faible possible.

La métallisation de la face avant résulte d'un compromis entre taux d'ombrage et résistances série. En effet, diminuer le taux d'ombrage se traduit par un courant élevé puisque plus de photons pénètrent dans la cellule mais cela suppose d'un autre côté d'avoir des doigts de métallisation moins larges et donc une augmentation des résistances série.

Pour réaliser les contacts métalliques, nous avons principalement les techniques suivantes :

- L'électrolyse : faible coût, bonne résistivité mais nécessite de nombreuses étapes
- L'évaporation : excellente résistivité et résistance de contact mais plus chère et avec un faible rendement d'utilisation du métal
- La sérigraphie : faible coût, simple, adaptée à de gros volumes mais technologie développée à haute température.

La sérigraphie constitue la solution la plus compatible avec les standards industriels et est de plus en plus utilisée. Elle permet en une seule étape de réaliser les doigts et les bus des métallisations pour un coût raisonnable et selon un procédé facilement automatisable [25].

II.4. Cellules photovoltaïques à base des couches minces :

a. Cellules PV à base de CIGS :

Le CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium) désigne à la fois :

- ✓ Une technique d'élaboration des cellules photovoltaïques à couches minces et hautes performances.
- ✓ Le matériau semi-conducteur fait d'un alliage permettant de réaliser ces cellules [26]
- ✓ Le matériau à la base du CIGS est le CIS (CuInSe_2). C'est un semi-conducteur I-III-VI₂ qui possède une structure cristalline chalcopyrite [27]
- ✓ La couche de CIGS sert d'absorbeur avec une largeur de bande interdite comprise entre 1,02 eV (CuInSe_2) et 1,65 eV (CuGaSe_2). [28]

b. Cellules PV à base de CdTe :

Les couches minces au tellure de cadmium CdTe :C'est la technologie en couches minces leader de l'industrie photovoltaïque. Sa production représente 46 % du marché des couches minces en 2012, et devrait atteindre 77 % en 2015 [29]. L'entreprise First Solar produit annuellement plus de 1 GW de modules, avec un coût de production en dessous de 1 \$/Wc (dollar par watt crête), ce qui en fait la technologie la moins chère du marché.

Le rendement est autour de 11% en module (et 17% en laboratoire [30]), mais le cadmium est un métal toxique, ce qui requiert des garanties supplémentaires pour l'environnement et le recyclage. L'acteur principal de cette filière. [31]

c. Cellules PV à hétérojonction de silicium :

Walter Fuhs et al. Ont eu les premiers l'idée de fabriquer des hétérojonctions a-Si:H sur c-Si en tant que composant. Les applications photovoltaïques n'étaient pas mentionnées mais l'idée de réaliser une hétéro-diode a-Si :H/c-Si et sa réalisation effective sont bien dues à l'équipe de Walter Fuhs . Dans la référence [32]-[34], les auteurs ont montré qu'il était possible de déposer du silicium amorphe sur du c-Si et d'obtenir une diode (effet redresseur, courbe I(V) standard). Le silicium amorphe (intrinsèque) était évaporé (épaisseur de 1,5 μ m) sur un silicium cristallin légèrement dopé p.

L'entreprise Sanyo a été la première entité (laboratoire ou entreprise) à appliquer avec succès cette idée pour réaliser des cellules solaires. La première publication date de 1991 et les premiers travaux de la fin des années 1980 [35]. Sanyo a utilisé du cSi de type n donc du a-Si:H dopé p (pour réaliser une jonction).

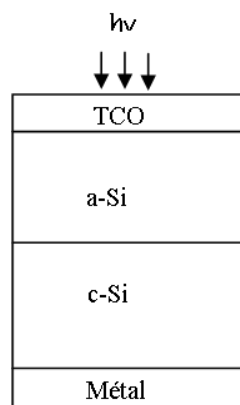


Figure II- 4:Schéma de la première cellule solaire à simple hétérojonction de

Sanyo a réussi avec cette nouvelle technologie à prendre 5% (2002) puis même 8% d'un marché pourtant très concurrentiel.[32]-[34]

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la filière photovoltaïque en couche minces, ses structures et le rôle de chaque couche et aussi les différentes cellules de cette filière.

Dans le troisième chapitre, une étude de l'influence de la couche BSF sur les performances du trois structure CIGS, CdTe et HJ sera analysée et discutée.

***Chapitre III : Influence de la Couche
BSF Sur les Performances des
Cellules CIGS, CdTe et a-Si/c-Si***

III.1. Introduction

Dans ce chapitre on va étudier l'influence de différents paramètres de la couche BSF (l'épaisseur, la concentration de dopage et l'énergie de gap) sur les performances des cellules photovoltaïques à base de CIGS, CdTe et a-Si/c-Si en utilisant les deux logiciels:

- SCAPS pour la modélisation numérique pour des cellules photovoltaïques à base de CdTe et CIGS.
- AFORS-HET pour la modélisation numérique pour des cellules photovoltaïques à hétérojonctions a-Si (p) / c-Si (n).

III.2. Modélisation numérique d'une cellule PV à base CIGS :

III.2.1. Structures et paramètres :

La cellule solaire à base CIGS présentée dans la Figure III.1, est constituée par des couches de ZnO, CdS et CIGS comme des couches TCO, tampon et absorbantes, respectivement.

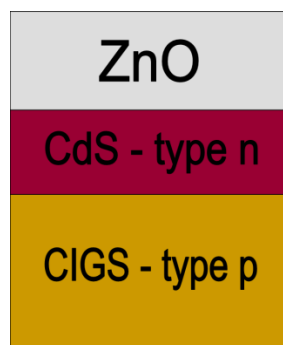


Figure III- 1: structure de la cellule étudiée (CIGS).

Le tableau III.1 montre les paramètres de différentes couches de la cellule PV modélisée.

Table III- 1: Paramètres adoptés pour différentes couches – CIGS.

Paramètre	ZnO	CdS	CIGS
Épaisseur (μm)	0,5	0,05	1
Energie de gap (eV)	3.3	2.4	1.16
Affinité électronique	4.45	4.3	4.5
Permittivité diélectrique	9	10	13.6
Densité efficace des états CB (cm^{-3})	3.10^{18}	2.10^{18}	7.10^{17}

Densité efficace des états VB (cm ⁻³)	1.7.10 ¹⁹	9.1.10 ¹⁹	1.5.10 ¹⁹
Vitesse électronique (cm/s)	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷
Vitesse des trous (cm/s)	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷
Mobilité électronique (cm ² /Vs)	100	72	100
Mobilité des trous (cm ² /Vs)	25	20	12.5
Densité des donateurs ND (cm ⁻³)	10 ¹⁷	10 ¹⁷	/
Densité des accepteurs NA (cm ⁻³)	/	/	10 ¹⁶

III.2.2. Résultats et discussion

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont caractérisées par un certain nombre de paramètres, extraits de la caractéristique courant-tension. Les grandeurs caractéristique principales des cellules solaires sont:

- Le courant de court-circuit,
- La tension en circuit ouvert,
- Le facteur de forme ,
- Le rendement de conversion d'énergie.

Caractéristiques Courant-Tension

La caractéristique J-V de la cellule modélisé est présentée sur la figure III.2

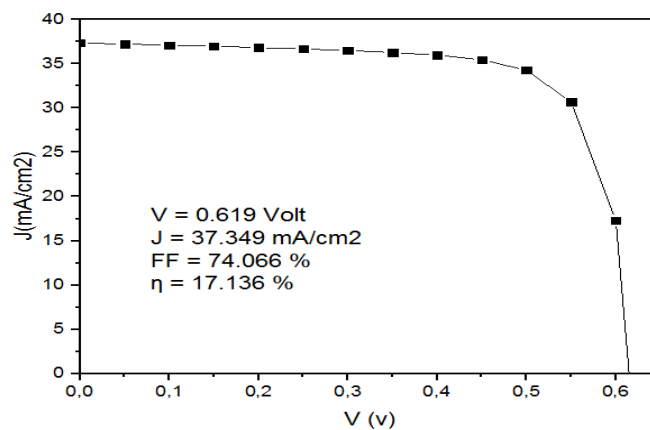


Figure III- 2:Caractéristique J-V de la cellule modélisé - CIGS.

III.2.3. Insertion de la couche BSF dans la structure ZnO/CdS/CIGS :

Une couche BSF (Back Surface Field) à base de CIGS, fortement dopée (p+), sera insérée dans la surface arrière de la couche absorbante de la structure CIGS (figure III.3)

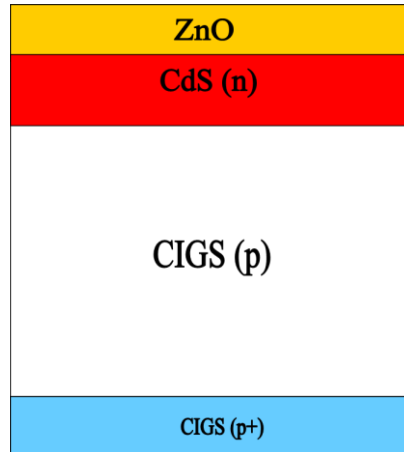


Figure III- 3:structure ZnO(n)/CdS(n)/CIGS(p)/CIGS(p+)

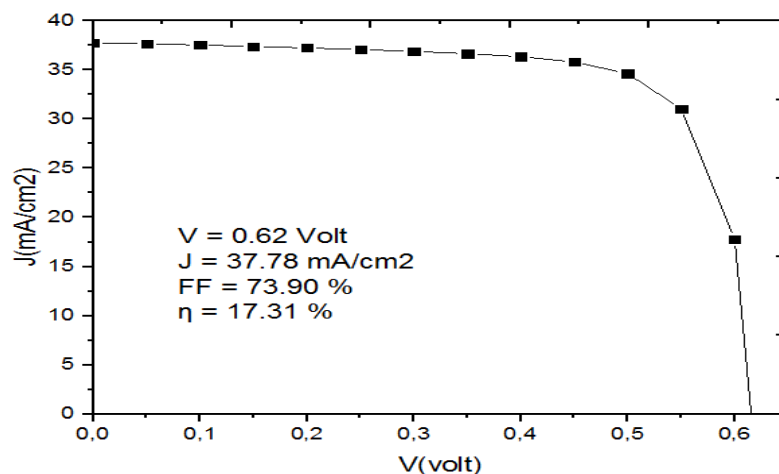


Figure III- 4: Caractéristiques J-V – BSF-CIGS.

Nous constatons que l'insertion de la couche CIGS fortement dopée améliore les performances des cellules simulées. Pour expliquer les résultats observés, nous rappelons que la couche BSF maintient les porteurs minoritaires dans la couche absorbante CIGS loin de la haute recombinaison avec les porteurs du contact arrière. Ainsi, pour les champs de surface arrière, la bande de conduction est à son plus haut niveau, et la bande de valence est à plus bas. Le meilleur rendement de la structure intégrant la couche de BSF est obtenue avec la cellule C-CIGS atteindre 23,33%. [36]

Insertion des paramètres de la couche BSF sur les performances de la cellule CIGS

Nous étudions dans cette section l'influence de la concentration de dopage et de l'épaisseur de la couche CIGS (p^+).

III.2.5.1. Influence de La concentration de dopage de la couche BSF

La variation de V_{OC} , J_{SC} , FF et η en fonction de la concentration de dopage de la couche BSF pour la structure représentée sur la Fig. III.5

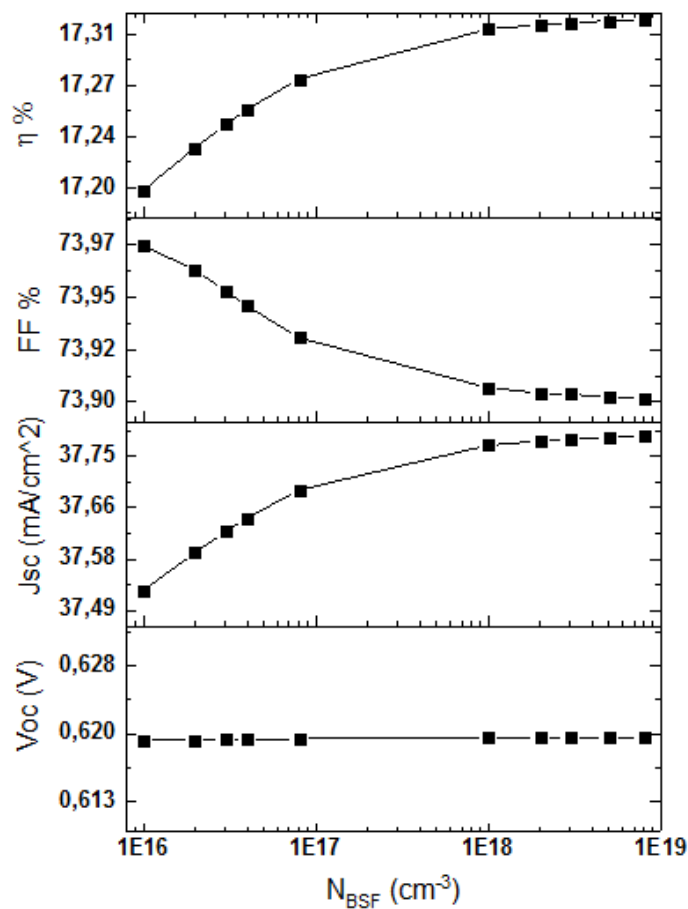


Figure III- 5: Influence de la concentration de dopage de la couche BSF sur la performance de structure de CIGS.

La figure montre que J_{sc} augmente continuellement lorsque le dopage de la couche BSF augmente de $10^{16} cm^{-3}$ à $10^{19} cm^{-3}$ et FF diminue de façon continue. On remarque également une augmentation du rendement η qui augmente de façon continue jusqu'à une valeur maximum lorsque la concentration de dopage de la couche BSF à $10^{19} cm^{-3}$ et reste constante au-dessus. Ce maximum de η est obtenu par la cellule CIGS

atteindre 17,32%. La variation de ces performances est expliquée par l'augmentation de la largeur de la zone de charge d'espace qui réduit la possibilité des collections des porteurs.

III.2.5.2. Influence de l'épaisseur de BSF (Dopage $P^+ = 10^{16}$)

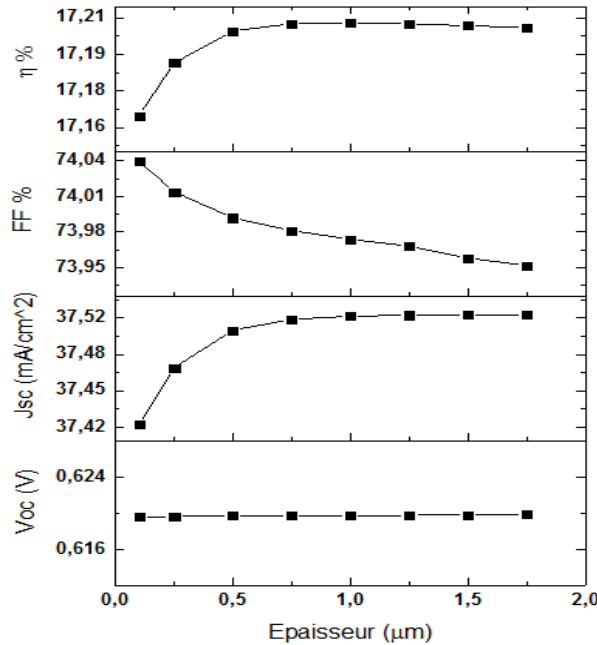


Figure III- 6: Effet de l'épaisseur de la couche BSF sur les performances de structure de CIGS.

La Fig. III.6 montre que lorsqu'on augmente l'épaisseur de la couche BSF, η et J_{sc} augmentent, mais V_{oc} reste constante.

III.2.5.3. Energie de gap CIGS : (épaisseur 1.25 et Dopage $8 \cdot 10^{19}$)

Dans cette partie, l'influence de la variation de l'énergie de gap de la couche CIGS (p^+) sera étudiée.

D'après la Fig.III.7, l'augmentation de l'énergie de gap de la couche BSF conduit à une augmentation de la densité de courant de court-circuit. Cette augmentation est due à la diminution de la recombinaison des porteurs de charge à la jonction arrière.

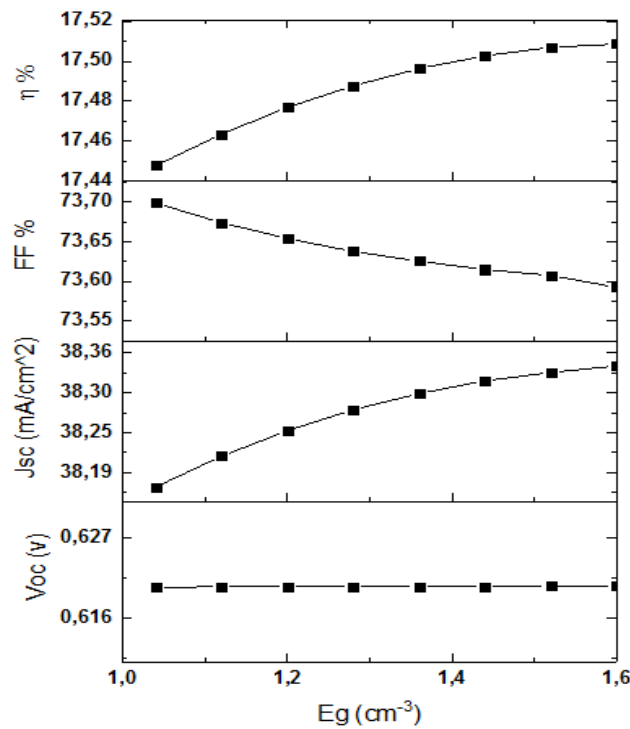


Figure III- 7: Effet de l'énergie de gap de la couche BSF sur les performances de structure de CIGS.

III.3. Modélisation numérique d'une cellule PV à base de CdTe :

III.3.1. Structures et paramètres

Les trois couches qui seront étudiées dans cette simulation sont : SnO, CdS et CdTe.

En intégrant les différents paramètres des matériaux dans le logiciel de simulation SCAPS, les changements dans les valeurs de V_{oc} , J_{sc} , FF et η en fonction de différents paramètres tel que la concentration de dopage, l'épaisseur de chaque couche ainsi que l'effet de la couche BSF seront étudiés.

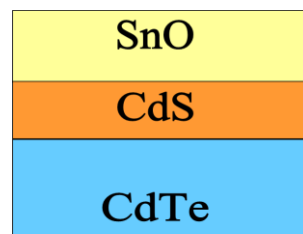


Figure III- 8: Schéma d'une cellule solaire à base de CdTe.

Table III- 2: Paramètres de différentes couches de la structure modélisée –CdTe.

Paramètre	SnO	CdS	CdTe
Épaisseur (pm)	0.05	0.01	2
Energie de gap (eV)	3.6	2.4	1.5
Affinité électronique	4.5	4.5	4.3
Permittivité diélectrique	9	10	9.4
Densité efficace des états CB (cm ⁻³)	2.2E18	2.2E18	8 E17
Densité efficace des états VB (cm ⁻³)	1.8E19	1.8E19	1,8E19
Vitesse Electronique (cm/s)	1E07	1E07	1E07
Vitesse des trous (cm/s)	1E07	1E07	1E07
Mobilité électronique (cm ² /Vs)	100	100	320
La mobilité des trous (cm ² /Vs)	25	25	40
Densité-donateurs N _D (cm ⁻³)	1E19	1E19	0
Densité-accepteur N _A (cm ⁻³)	0	0	2E15

III.3.2. Résultats et discussion

Caractéristiques Courant-Tension

La caractéristique J - V , sous illumination, de notre cellule est représentée dans la figure III.9. (Épaisseur 2 μ m) et (Dopage 2.10¹⁵)

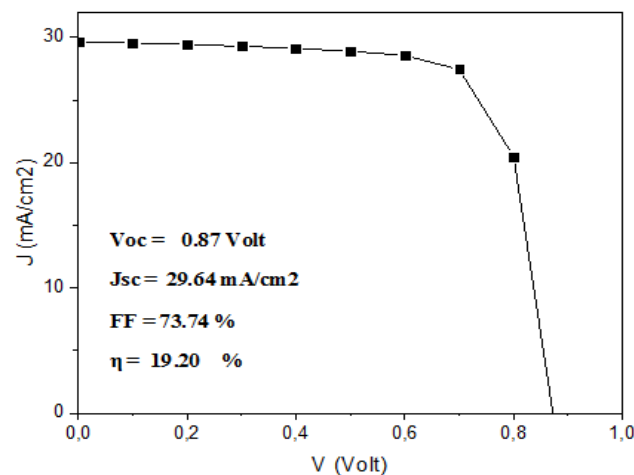


Figure III- 9: Caractéristique J - V de la cellule modélisée - CdTe.

III.3.3. Insertion d'une couche BSF dans la structure de CdTe

Une couche BSF, fortement dopée (p⁺), sera insérée dans la surface arrière de la couche absorbante de la structure CdTe.

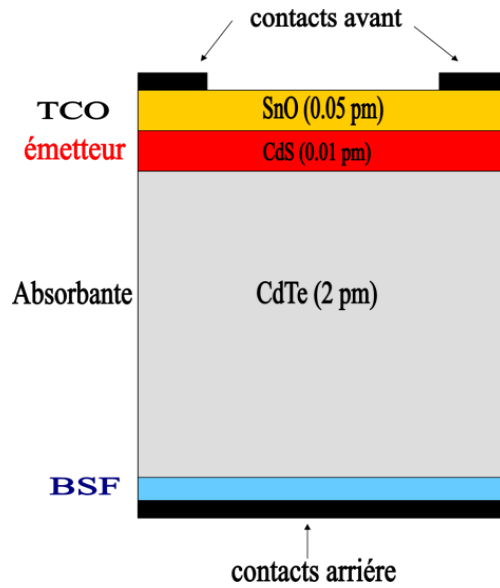


Figure III- 10: Structure de la cellule photovoltaïque modélisé – CdTe.

III.3.3.1. Influence de La concentration de dopage BSF

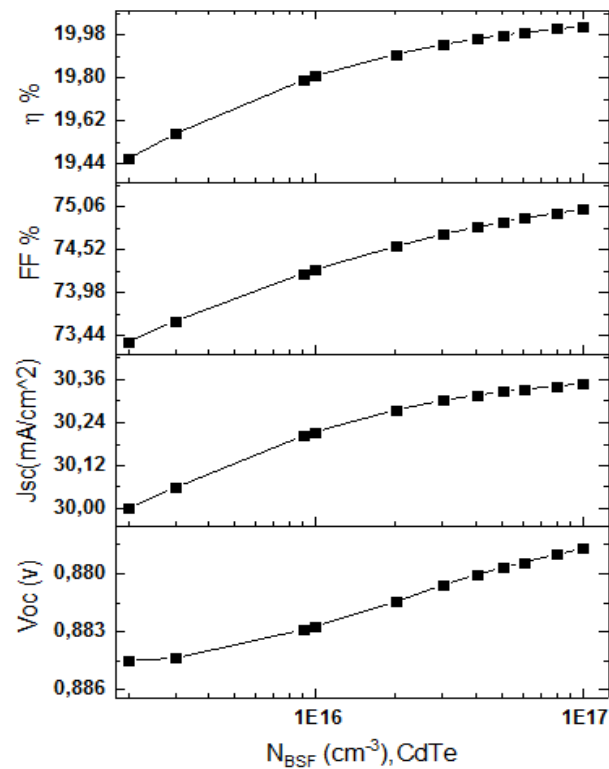


Figure III- 11: Influence de la concentration de dopage de la couche BSF sur la performance de structure de CdTe.

Dans cette figure les quatre performances (V_{CO} , J_{SC} , FF et η) de la cellule PV augmentent quand la concentration de dopage de la couche CdTe augmente de $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

à 10^{17} cm^{-3} . On note que le meilleur rendement obtenu après cette optimisation est de 19,98%.

La concentration de dopage optimale de cette couche est de $8.10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

III.3.3.2. Influence de l'épaisseur de BSF

La Fig. III.12 montre que lorsqu'on augmente l'épaisseur de la couche BSF de la cellule CdTe le rendement η et J_{sc} augmentent, mais V_{oc} reste constante.

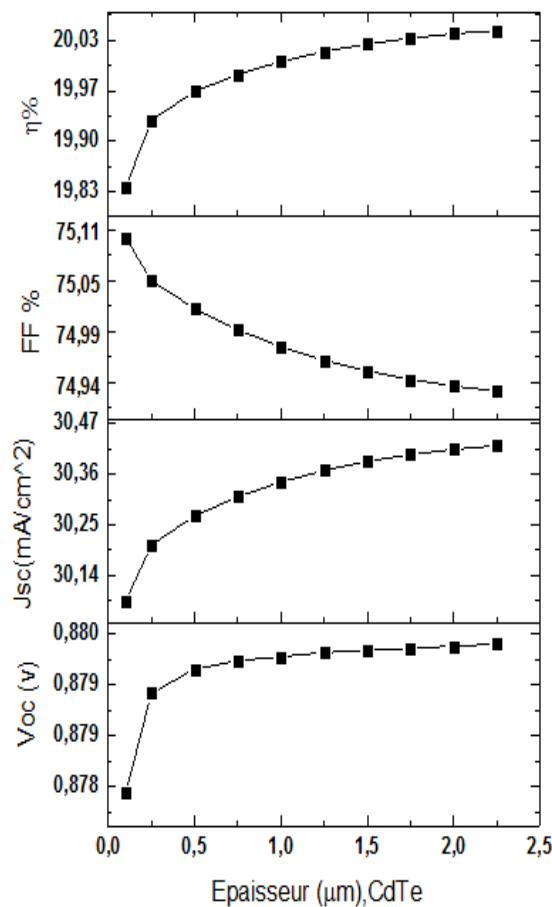


Figure III- 12: Influence de l'épaisseur de la couche BSF sur la performance de structure de CdTe.

Les meilleures performances obtenues pour la cellule CdTe sont :

$V_{oc} = 0.879 \text{ v}$, $J_{sc} = 30.38 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 74.94 \%$ et $\eta = 20.028\%$ en utilisant un épaisseur de $2 \mu\text{m}$

III.4. Les cellules solaires à hétérojonctions a-Si (p) / c-Si (n) / a-Si (n) :

III.4.1. Structure et paramètres

Paramètres de la cellule :

Structure :

La Figure III.13 représente la structure d'une cellule PV à hétérojonctions de silicium. Sur un substrat de silicium cristallin type (n) est déposée une couche de silicium amorphe hydrogéné qui a créé une hétérojonction entre le silicium cristallin et le silicium amorphe.

La couche de a-Si:H déposée sur la face avant (face éclairée) a un dopage différent du substrat c-Si et est appelée émetteur.

La structure de figure III.13, est composée de :

- Couche de type p du silicium amorphe en tant que une couche émettrice.
- Couche de silicium cristallin de type n en tant que une couche absorbante.

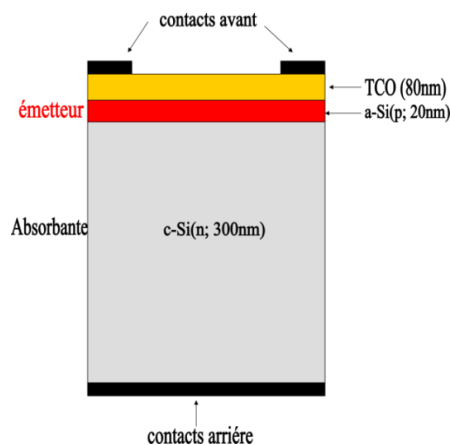


Figure III- 13: Structure d'une hétérojonction a-Si(p)/c-Si(n).

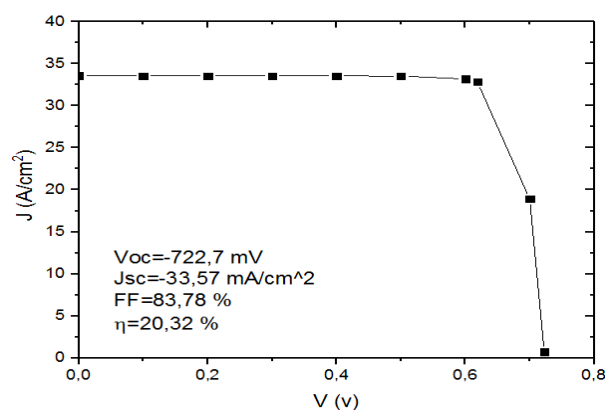


Figure III- 14: Caractéristiques de JV de a-Si (p) / c-Si (n).

Dans cette section on va présenter la structure de la cellule étudiée. La structure initiale définie dans AFORS-HET est constituée des couches suivantes (Fig.III.15) :

Une couche de silicium amorphe de type p (a-Si (p)) « L'émetteur »

Une couche de silicium cristallin de type n (c-Si (n)) « L'absorbeur »

Une couche de silicium amorphe de type n (a-Si (n)) « BSF »

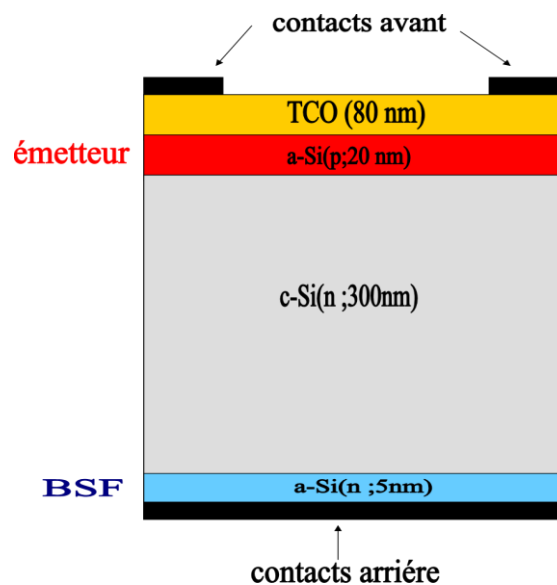


Figure III- 15: Structure d'une hétérojonction a-Si(p)/c-Si(n)/a-Si(n)

Table III- 3: Différents paramètres retenus pour la cellule solaire HET dans la simulation

Paramètres	a-Si (p)	c-Si (n)	a-Si (n)
Epaisseur (nm)	5	0.025	5
Permittivité diélectrique	11,9	11,9	11,9
Affinité électronique (eV)	3,9	4,05	3,9
Energie de gap (eV)	1,72	1,12	1,72
La densité de la bande de conduction efficace (cm ⁻³)	10 ²⁰	2,8x10 ¹⁹	10 ²⁰
La densité de la bande de valence efficace (cm ⁻³)	10 ²⁰	1,04x10 ¹⁹	10 ²⁰
La mobilité d'électrons (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	20	1040	20
Mobilité des trous (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	5	412	5
La concentration des accepteurs (cm ⁻³)	8,1x10 ¹⁹	0	0
Concentration des donneurs (cm ⁻³)	0	2,77x10 ¹⁷	8x10 ¹⁹

La vitesse thermique des électrons (cm s^{-1})	10^7	10^7	10^7
Vitesse thermique des trous (cm s^{-1})	10^7	10^7	10^7
La densité de la couche (g cm^{-3})	2.328	2.328	2.328
Auger coefficient de recombinaison pour électrons ($\text{cm}^6 \text{s}^{-1}$)	0	2.2×10^{-31}	0
Auger coefficient de recombinaison pour le trou ($\text{cm}^6 \text{s}^{-1}$)	0	9.9×10^{-32}	0
Coefficient de bande à bande directe recombinaison ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)	0	1.1×10^{-14}	0

III.4.2. Influence de la concentration de dopant sur les performances de la cellule

L'influence de la concentration en dopage de la couche BSF a-Si (n) sur la performance de la cellule illustrée dans la Fig.III.16.

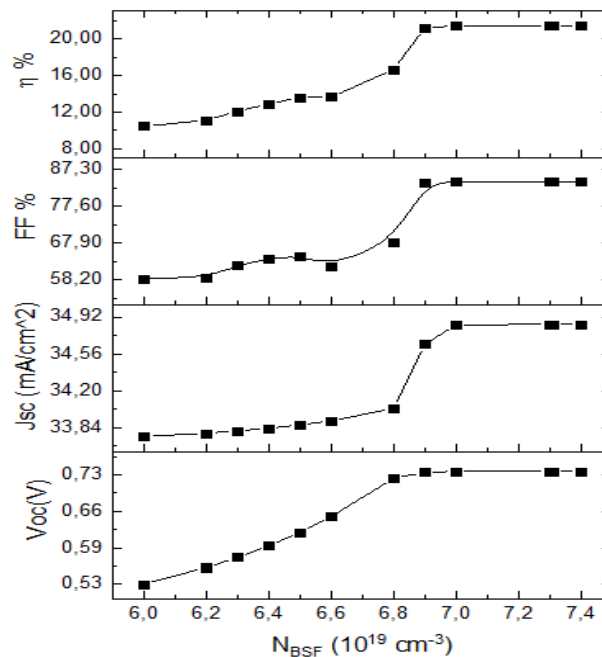


Figure III- 16: Effet de la concentration en dopant de la couche de BSF sur la performance de la cellule solaire -HJ.

Les résultats rapportés dans la Fig.III.16 montrent clairement que l'introduction d'une couche de BSF est une façon d'améliorer les performances de la cellule jusqu'à une valeur de saturation obtenue pour une concentration de dopage égale à 8×10^{19} . Au-dessus de cette valeur, ces paramètres restent constants autour de $V_{oc} = 0,73 \text{ V}$, $J_{sc} = 34,84 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 83,79\%$ et $\eta = 21,42 \%$.

III.4.3. Influence de l'épaisseur sur les performances de la cellule

La variation de VOC, JSC, FF et η en fonction de l'épaisseur de la couche BSF est indiquée sur la Fig.III.17

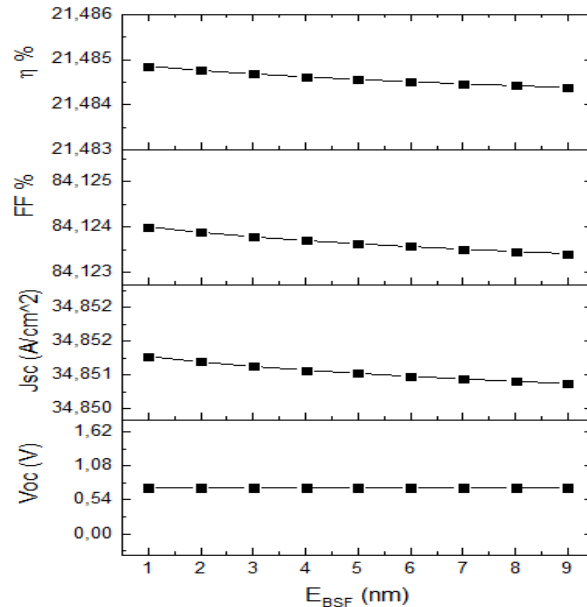


Figure III- 17 :Effet de l'épaisseur de la couche de BSF sur la performance de la cellule solaire -Hj.

Les résultats de simulation sont présentés sur la Fig.III.17 Notez qu'il y a une légère diminution pour J_{sc}, η et FF par rapport à l'augmentation de l'épaisseur de l'épaisseur de 1nm à 9nm .et il y a une stabilité dans la valeur V_{oc} .

III.4.4. Influence de l'énergie de gap sur les performances de la cellule modélisée :

Ce paragraphe va consacrer à un autre paramètre qui a une influence sur le comportement de la cellule PV : l'énergie de gap de la couche BSF.

La Fig.III.18 montre qu'afin d'obtenir des bonnes performances de notre cellule il est nécessaire de bien choisir la qualité de la couche BSF (une énergie de gap élevée).

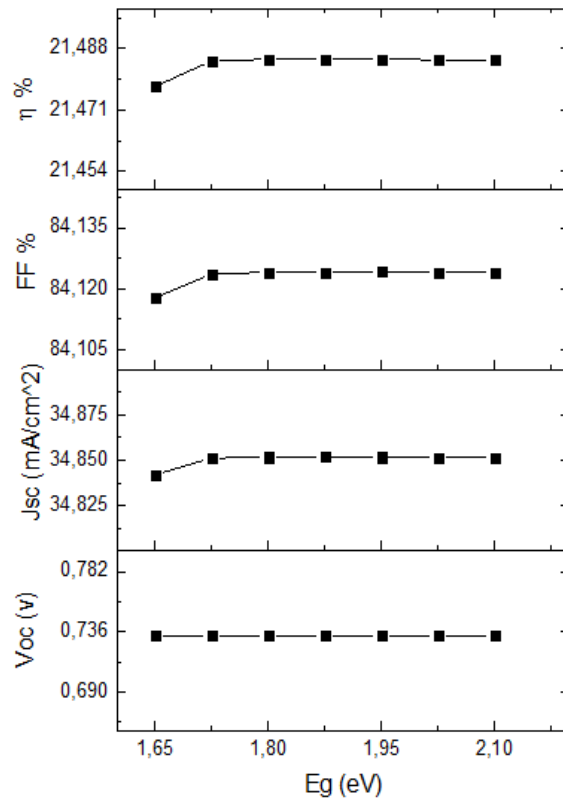


Figure III- 18 : Effet de l'énergie de gap de la couche de BSF sur la performance de la cellule solaire –HJ.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié l'influence de différents paramètres de la couche BSF (l'épaisseur, la concentration de dopage et l'énergie de gap) sur les performances des cellules photovoltaïques à base de CIGS, CdTe et a-Si/c-Si en utilisant les deux logiciels SCAPS et AFORS-HET.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail de fin d'étude est d'étudier l'influence de la Couche BSF Sur les performances des cellules photovoltaïques à base de CIGS, CdTe et de hétérojonction a-Si/c-Si.

Ces performances sont mesurées par les caractéristiques J-V tels que : La tension de circuit ouvert V_{co} , le courant de court-circuit J_{sc} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η .

La modélisation numérique est effectuée à l'aide de deux logiciels spécialisés : AFORS-HET et SCAPS.

Dans le chapitre 1, nous avons présenté les notions fondamentales sur les cellules solaires (Les matériaux semi-conducteur, Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, Compositions d'une cellule couche mince) ainsi les différentes caractéristiques d'une cellule solaire.

Dans Le deuxième chapitre on a présenté la filière photovoltaïque en couche minces, ses structures et le rôle de chaque couche et aussi les différentes cellules de cette filière.

Dans le chapitre 3, l'influence de l'épaisseur et la concentration de dopage sur les performances des différents couches BSF de trois cellules photovoltaïques (CIGS, CdTe et hétérojonction a-Si (p) / c-Si (n)) est étudié.

Les résultats obtenus montrent que :

- **POUR LE STRUCTEUR CELLULE A BASE CIGS :**

Tension de circuit ouvert $V_{co} = 0.620v$ le courant de court-circuit $J_{sc} = 37.78 \text{ mA/cm}^2$ le facteur de forme $FF = 73.90 \%$ le rendement de conversion $\eta = 17.31 \%$.

- **POUR LE STRUCTEUR CELLULE A BASE CdTe :**

Tension de circuit ouvert $V_{co} = 0.879v$ le courant de court-circuit $J_{sc} = 30.269 \text{ mA/cm}^2$ le facteur de forme $FF = 75.019\%$ le rendement de conversion $\eta = 19,98\%$.

- Pour la cellule photovoltaïque à HJ a-Si (p)/c-Si (n) :

Tension de circuit ouvert $V_{co} = 725,8 \text{ mv}$ le courant de court-circuit $J_{sc} = 32,35 \text{ mA/cm}^2$ le facteur de forme $FF = 80,95\%$ le rendement $\eta = 19\%$.

Les résultats obtenus ont montré que la couche BSF est une façon importante pour l'amélioration des performances des cellules photovoltaïques en couches minces.

Bibliographie et Webographie

Bibliographie et Webographie

- [1] https://www.encycloecolo.com/Energies_renouvelables#Les_.C3.A9nergies_renouvelables___en_2010
- [2] Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, le ministère de l'énergie et des mines, mars 2011.
- [3] Mohammed Moustafa Bouzaki , "Études comparées et modélisation des performances des différentes technologies de cellules photovoltaïques en vue du dimensionnement des systèmes et installations photovoltaïques" These doctorat (2017)
- [4] Physique des semi-conducteurs – A Chovet & P. Masson Première année – 2004/2005.
- [5] <https://fr.wikipedia.org-Historique>
- [6] http://www.ccp14.ac.uk/ccp/web-mirrors/j-j-rousseau/enseignements/physique/02/cours_elec/semicon.pdf
- [7] Charles Roger ; « Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats Métalliques » Thèse doctorat, Université Grenoble, Paris, PP 5, 2013.
- [8] W. Shockley , Hans J. Queisser ; « detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells » ; J. APPL. PHYS. 32, 510 (1961); DOI:10.1063/1.1736034. T. Desrues. " Developement des cellules solaires à hétérojonctions " N° d'ordre 2009ISAL0084
- [9] B. Paridaa, S. Iniyamb, R. Goicc "A review of solar photovoltaic technologies " Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 1625–1636
- [10] J.K. Rath "Low temperature polycrystalline silicon: a review on deposition, physical properties and solar cell applications" Solar Energy Materials & Solar Cells 76 (2003) 431–487
- [11] D. Vaufrey, « Réalisation d'OLED à émission par la surface : Optimisation de structures ITO / semi-conducteurs organiques », Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, (2003).
- [12] W. Siefert, Thin Solid Films 121-275, (1984).
- [13] V. Srikant, D.R. Clarke, J. App. Phys., 83, 5447, (1998).
- [14] N. Ito, Y. Sato, P.K. Song, A. Kaijio, K. Inoue, Y. Shigesato, Thin Solid Films 99-496, (2006) .

- [15] T. Aoki, Y. Shimizu, A. Miyake, A. Nakamura, Y. Nakanishi, Y. Hatanaka, *physica status solidi b*, 229, 2, 911 (2001).
- [16] A.F. Aktaruzzaman, G.L. Sharma, L.K. Malhotra, *Thin Solid Films* 198 (1-2), pp. 67-74, (1991).
- [17] E. Fortunato, D. Ginley, H. Hosono, D. C.Paine, *Conducting Oxides for Photovoltaics*, MRS Bulletin, vol. 32, (2007).
- [18] N. Ito, Y. Sato, P.K. Song, A. Kaijio, K. Inoue, Y. Shigesato, *Thin Solid Films* 99-496, (2006) .
- [19] BENHARRAT Lyes “ Élaboration et Caractérisation des Couches Minces Tampon CdS et ZnS préparées par CBD Automatisée pour des Applications aux Cellules Solaires” MEMOIRE de magister Université d’Oran 2014 page23.
- [20] LARBAH YOUSSEF ”Elaboration et caractérisation des couches minces conductrices et transparentes pour les cellules solaire de type TCO/ZnS/CIS”2010/2011 p21.
- [21] : J.J. Liou et al., Comparison and optimization of the performance of Si an GaAs Solar cells’, *Solar energy materials and solar cells*, Vol. 28, pp. 9- 28, 1992.
- [23] M.J. Kerr “Generalized analysis of the il lumination intensity vs open-circuit voltage of solar cells” *Solar Energy* 76 (2004)263 –267
- [24] A. Zerga “Effets de l’ajout d’une couche de SiO₂ à l’interface arrière métal/semiconducteur sur les performances d’une cellule solaire conventionnelle à base de silicium de type n+p“, 0-7803-7117-8/01/ 2001 IEEE
- [25] P. D. DeMoulin “Back Surface Field Design For n+p GaAs Solar Cells “solar cells, 20 (1987) 229-236.
- [26] https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_CIGS#Histoire
- [27] M. Agrawal, C. Bolman, S. Carnahan, B. Merewitz, G. Phipps, M. Rogol, S. Willhaus, and T. Xu, “Solar Annual 2012: The Next Wave.” Photon Consulting, 2012
- [29] Marketbuzz, “Annual World Photovoltaic Market Review,” 2012.]

- [30] Miles, R.W., K.M. Hynes, and I. Forbes, Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2005. 51(1-3): p. 1-42.
- [31] Mezhoud Leila « Etude des caractéristique électriques de cellule solaire à hétérojonction CdS/CIGS» ,2012/2013 :p 3-4.
- [32]MECHERI Abdelssalem ,«Mémoire fin d'étude simulation d'une cellule photovoltaïque a base d'hétérojonction»,Université KASDI MERBAH , Ouargla, Algérie,2014-2015.
- [33]H. Mathieu, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques" ,Dunod , Paris, 2009.
- [34]W. Fuhs, K. Niemann, and J. Stuke, "Heterojunctions of amorphous silicon and silicon single crystals". *Bull. Am. Phys. Soc.*, 19:345–349, (1974).
- [35] H. Sakata, T. Nakai, T. Baba, M. Taguchi, S. Tsuge, K. Uchihashi, and SeiichiKiyama."20.7% Highest Efficiency Large Area (100.5 cm²) HITTM Cell ". *Proc. ofthe28th IEEEPSC*, pages 7–12, (2000).
- [36] http://www.helmholtz-berlin.de/forschung/oe/ee/si-pv/projekte/asicsi/afors-het/index_en.html
- [37] SoltaneZeghina, « Simulation et analyse d'une cellule solaire organique», mémoire magister, Université de Batna, Algérie, 2013.
- [38] Mohammed Ouled Ali, « propriétés optoélectroniques du semi-conducteur Cu(In,Ga)Se₂ appliquée aux cellules photovoltaïques ». Mémoire de magister à l'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran, 2010.

Annexes

Annexes

A. Présentation de logiciel de simulation AFORS-HET

Le logiciel AFORS-HET (Automate FOR Simulation of HETero structures) est un outil de simulation numérique à une dimension (1D), développé en Allemagne par le laboratoire Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) [36]. Ce logiciel est particulièrement adapté aux simulations des cellules solaires à hétérojonctions à base de silicium [37].

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

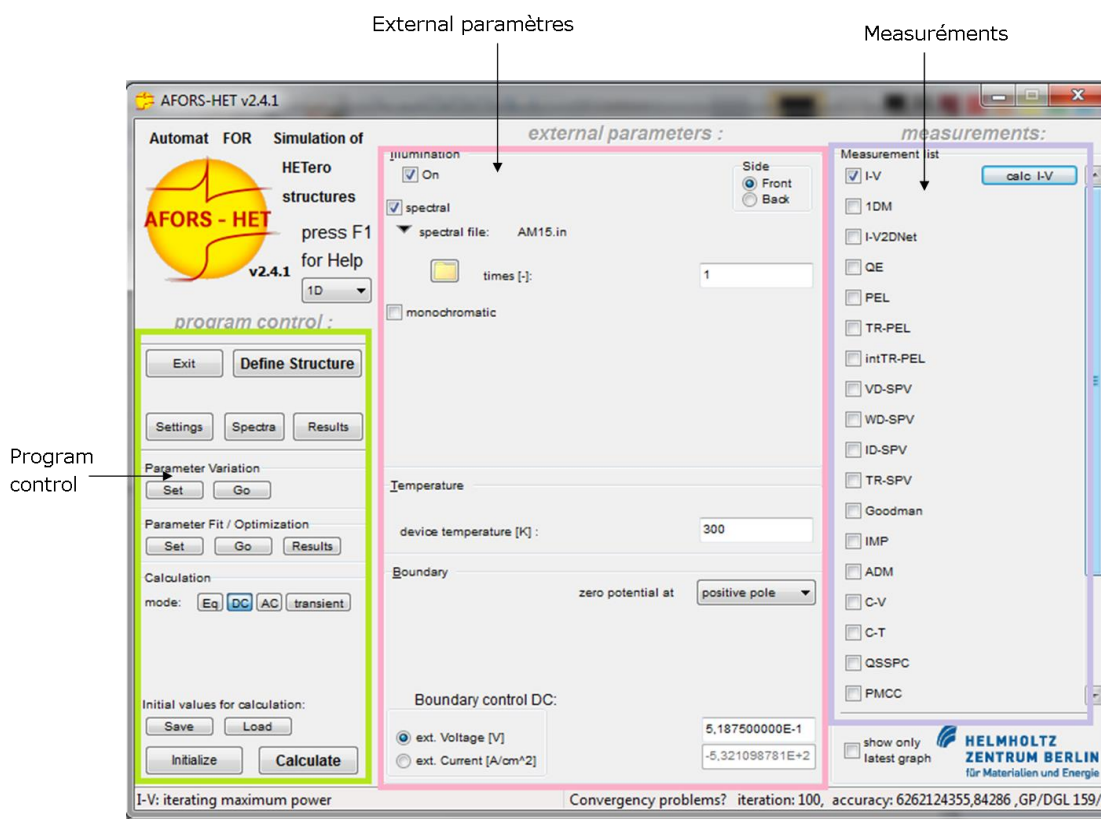


Figure A- 1: Interface graphique du logiciel de simulation 1D AFORS-HET.

Etapes de simulation :

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

1. Contact avant ;
2. Interface(Ideal-Electron-Contact) ;
3. couche de silicium amorphe type (n)a-Si :H (n) ;
4. Interface(drift-diffusion);
5. couche de silicium cristallin type (p)c-Si(p) ;
6. Interface (MS-Schottky-Contact) ;
7. Un contact arrière.

Il est à noter que les modèles numériques à l'interface des couches seront spécifiés lors de la définition de la structure.

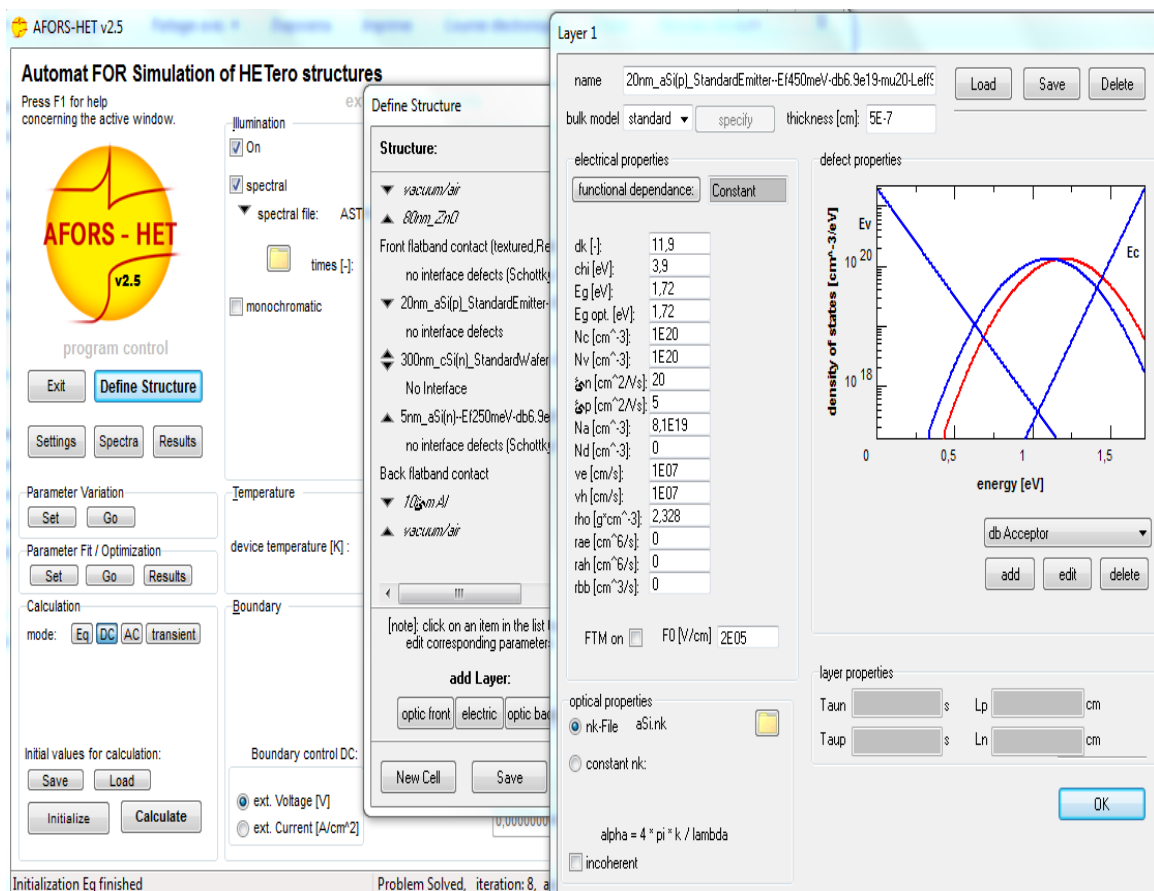


Figure A- 2: Définition de la structure et introduction des paramètres.

B. Présentation de logiciel de simulation SCAPS

SCAPS (SolarCell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique descellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmesélectroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de ce logiciel: Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, StefaanDegrave[38].

SCAPS est développé à l'origine pour des structures des cellules de CuInSe_2 et de CdTe . Cependant, Plusieurs version ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour des cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et des cellules amorphes (a-Si et de Si micro-morphe) .

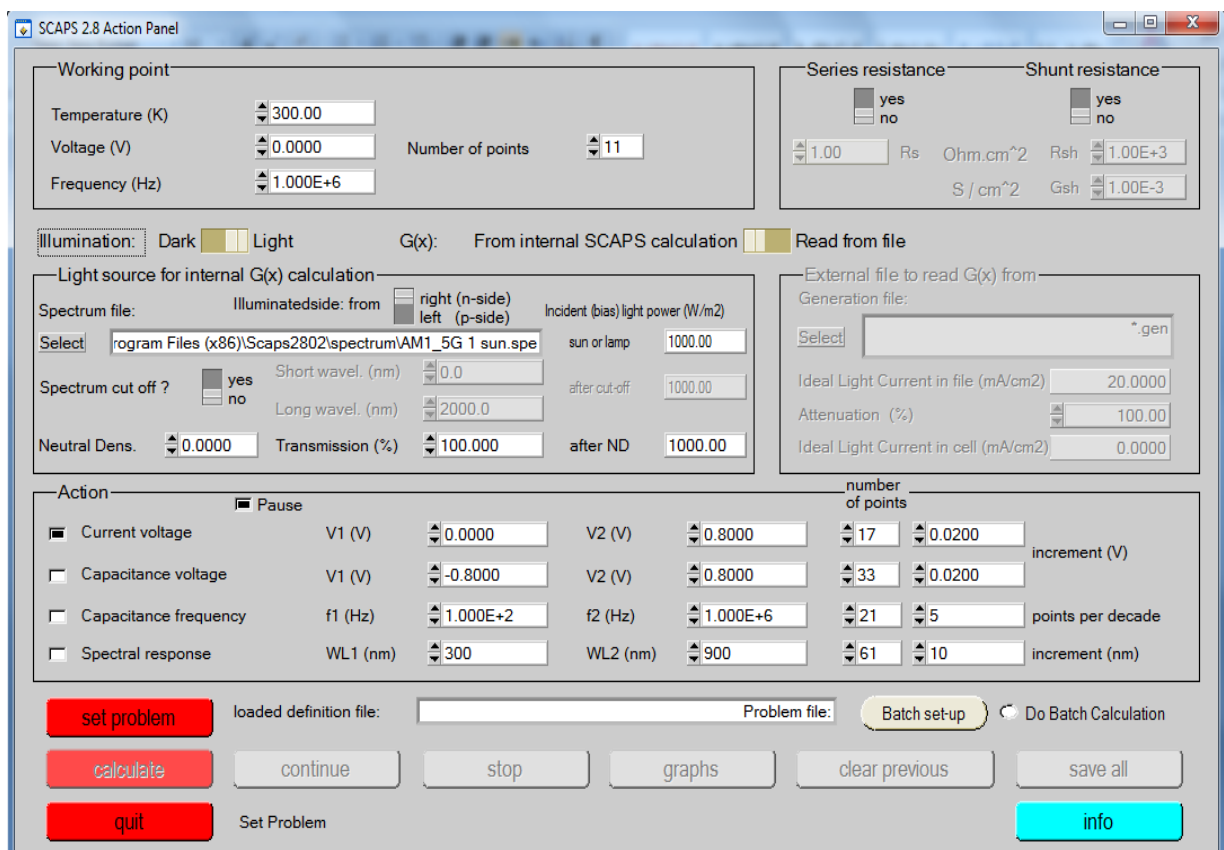


Figure A- 3: Définition de la structure logique SCAPS