UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées Département de Génie Electrique



Mémoire MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies Filière : Electrotechnique Spécialité : Machines électriques Présenté par :

MAHAMMEDI MOHAMMED

DEGLA BACHIR

Thème:

Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque

à base d'hétérojonction de structure HIT :

a-Si:H (n) / a-Si:H (i) / c-Si (p)

Soutenu publiquement Le : 07 / 07 / 2019 Devant le jury :

MCA

MCB

MAA

M^r Amieur toufik M^r Benmir Abdelkader M^r Kouras Sid Ali Président L Encadreur/rapporteur L Examinateur L

UKM Ouargla UKM Ouargla UKM Ouargla

Année universitaire 2018/2019

Dédicace

Tout d'abord je tiens à remercier le bon dieu qui ma amené jusqu'à la fin de mes études. Je dédie ce travail : À mes chers parents, mes chers frères. À ma chère mère qui m'a tout donné pour que je suis tel que je sois. À tout les personne qui mon aider par ses conseils ou bien Ses poussées.

DEGLA BACHIR

Dédicace

Je dédie ce travail en signe de respect et de reconnaissance : À mes parents. À toute ma famille sans exception. À tous mes ami (es). À ceux qui ont m'aidé de loin ou de prés durant ma carrière.

MAHAMMEDI MOHAMMED

Remerciements

Nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la santé et la patience de mener à terme ce présent travail.

Nous exprimons toute nos profonde gratitude, nos profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à M. BENMIR Abdelkader pour nous avoir encadré tout le long de notre travail, qui par ses conseils a été un guide précieux dans l'élaboration de ce mémoire.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail.

Introduction générale1
Chapitre I
Généralité sur les cellules solaires photovoltaïques
I.1. Introduction
I.2. Historique
I.3. Rayonnement solaire
I. 4. Spectre solaire4
I.5. Définition d'une cellule solaire PV5
I. 6. Matériaux Semi-conducteurs5
I. 6. 1. Semi-conducteurs intrinsèques
I. 6. 2. Semi-conducteurs extrinsèques
I.7. Dopage7
I.7.1. Dopage N7
I.7.2. Dopage P7
I.8. Jonction P-N
I.9. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque
I. 10. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque
I. 10.1. Modèle mathématique et circuit équivalent d'une cellule solaire réelle9
I.10.2. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque10
I.10.3. Caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque10
a. Courant de court-circuit11
b.Tension de circuit ouvert11
c. Puissance maximale11
d. Facteur de forme FF11
e. Le rendement11
I.11. Différents types de cellules solaires photovoltaïques12
I. 12. Avantages et inconvénients
I. 12.1. Avantage
I. 12.2. Inconvénients
I.13. Conclusion

Sommaire

Chapitre II

Cellules solaires	photovoltaïques à	hétérojonction :	a-Si:H(n)/c-Si(p)
--------------------------	-------------------	------------------	-------------------

II.1. Introduction
II.2. Historique des cellules à hétérojonction14
II. 3. Principe de l'hétérojonction a-Si: H/c-Si15
II.3.1. Différents types d'hétérojonctions16
II.3.2. Modèle d'Anderson16
II.4. Hétérojonction a-Si : H(n)/c-Si(p)17
II.5. Fonctionnement physique d'une hétérojonction19
II.5.1. Hétérojonction à l'équilibre thermodynamique19
II. 6. Les cellules solaires à hétérojonctions a-Si : H / c-Si20
II.6.1. Structure
II.6.2. Les deux semi-conducteurs de base
a. Le silicium cristallin21
b. Le silicium amorphe22
II.7. Composants d'une cellule de silicium à hétérojonctions
II.7.1. L'oxyde transparent conducteur (TCO)
II.7.2. L'émetteur
II. 7.3. Le BSF
II.7.4. Les contacts
II.8. Contact Métal-Semiconducteur (M-SC)
II.8.1. Contact ohmique
II.8.2. Contact Schottky27
II. 9. Avantages des cellules à hétérojonction
II.10. Critères pour l'optimisation des cellules à hétérojonction en silicium
II.11. Conclusion
Chapitre III
Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p)
III.1. Introduction
III.2. Définition de la simulation
III.3. Equations de base de la modélisation
III.3.1. Équation de Poisson
III.3.2. Equations de continuité
III.3.3. Equations de transport

III.4. Simulation d'une cellule solaire PV à hétérojonction : a-Si:H (n) /c-Si (p)	34
III.4.1. Paramètres à simuler	34
III.4.2. Structure de la cellule photovoltaïque à simuler	34
III.4.3. Paramètre de la cellule photovoltaïque à simuler	35
III.5. Résultats et discussions	36
III.5.1. Structure cellule1	36
a. Influence du travail de sortie du contact avant	36
b. Influence de travail de sortie contact arrière	37
c. Influence du dopage N_d de la couche émetteur a-Si:H(n)	38
d. Influence du dopage N_a de la couche absorbeur c-Si (p)	38
III.5.2. Structure cellule2	40
a.Influence de l'épaisseur Wi de la couche tampon a-Si:H(i)	40
III.5.3. Structure cellule3	41
a. Influence d'épaisseur de la couche arrière a-Si (p+) avec l'existence de couche intrinsèque	41
III 6 Conclusion	42
	42
Conclusion generale	43

Listes des figures

Figure I.1	Différents air masses	4
Figure I.2	Spectre solaire	5
Figure I.3	Cellule solaire PV comme dispositif de conversion de l'énergie solaire	5
Figure I.4	Matériaux Semi-conducteur	6
Figure I.5	Dopage de type N : le phosphore possède un électron de plus que le silicium	7
Figure I.6	Dopage de type P : le bore possède un électron de moins que le silicium	7
Figure I.7	Structure de la jonction P-N	8
Figure I.8	principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	9
Figure I.9	Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	9
FigureI.10	Caractéristiques courant tension	10
Figure II.1	Schéma de la première cellule solaire à simple hétérojonction de l'entreprise Sanyo	14
Figure II.2	Représentation des paramètres électroniques de deux Matériaux isolés	15
Figure II.3	Diagrammes schématiques montrant les types différents d'hétérojonction	16
Figure II.4	Diagrammes des bandes pour des hétérojonctions de silicium	17
Figure II.5	Diagramme de bandes de la face avant des cellules: Hétérojonction a-Si: H (n+) / c-Si(p).	18
Figure II.6	Diagramme de bandes de la face arrière des cellules:Hétérojonction c-Si(p) /a-Si :H (p+)	19
Figure II.7	Structure d'une cellule hétérojonctions	21
Figure II.8	Structure du silicium amorphe : a) a-Si sans hydrogène ; b) a-Si avec Hydrogène (a-Si: H)	23
Figure II.9	Contact ohmique entre un métal et un SC (À gauche cas d'un SC-p, à droite d'un SC-n)	27
Figure II.10	Contact Schottky entre un SC et un métal (à gauche cas d'un SC-p, à droite d'un SC-n)	27
Figure III.1	Structures de la cellule photovoltaïque à simuler	34
Figure III.2	Variation du Vco, Jsc, FF et η pour différents valeurs de travail de sortie contact avant	36
Figure III.3	Variation du Vco, Jsc, FF et η pour différents valeurs de travail de sortie contact arrière	37
Figure III.4	Variation du Vco, Jsc, FF et η pour différents valeurs de N_d	38
Figure III.5	Variation du Vco, Jsc, FF et η pour différents valeurs de N_a	39
Figure III.6	Variation du Vco, Jsc, FF et η pour différents valeurs de Wi	40
Figure III.7	Variation du Vco, Jsc, FF et η pour différents valeurs de Wp+	41

Liste des symboles

un nan nan nan nan nan nan nan nan

RANNAR MARINARA MARINARA MARINARA MARINARA MARINA MARINA MARINA MARINA MARINA MARINA MARINA MARINA MARINA MARIN

E	Energie
E(x)	Champ électrique
Eg	Largeur de la bande interdite (gap)
ρ(x)	Densité de charges électriques
n . p	Concentration des électrons et des trous respectivement
$n_0 \cdot p_0$	Concentration des électrons et des trous à l'équilibre respectivement
jn . jp	Densité de courant des électrons et des trous respectivement
\mathbf{J}_{ph}	Densité de courant de photo génération
J	Densité de courant de sortie de la cellule
Jse	Densité de courant de court circuit
Na . Nd	Concentration des atomes accepteurs et des atomes sonneurs respectivement
τ_n , τ_p	Durée de vie des électrons et des trous respectivement
μn . μp	Mobilité des électrons et des trous respectivement
Dn .Dp	Constante de diffusion des électrons et des trous respectivement
Ln . Lp	Longueur de diffusion des électrons et des trous respectivement
Lc	Longueur de collection effective
Un . Up	Taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement
Т	Température de la cellule
Q	Facteur de qualité
ni	Concentration intrinsèque
Sn . Sp	Vitesse de recombinaison des électrons et des trous à la surface
E E E	respectivement
Rs	Résistance série
Rsh	Résistance parallèle
a	Charge de l'électron
ч Ut-KT/a	Potentiel de thermodynamique
Vd	Potentiel de diffusion
V	Tension de sortie de la cellule
$\Phi_{\rm E}$	Travail de sortie du contact avant
Φ _B	Travail de sortie du contact arrière
Vco	Tension de circuit ouvert

Introduction générale

Introduction générale

La recherche de sources d'énergies renouvelables et non polluantes constitue un des enjeux technologiques majeurs du XXIème siècle, étant donné l'épuisement progressif des réserves des énergies fossiles, les problèmes d'environnement croissants liés à l'utilisation de ces énergies et l'augmentation des coûts d'exploitation.

Dès lors, la solution à ces problèmes réside en la maîtrise des énergies renouvelables et parmi elles, l'énergie solaire à conversion photovoltaïque, inépuisable et propre, occupe une place prépondérante.

Cette forme d'énergie est une transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique. Elle est assurée fondamentalement par des cellules solaires au silicium, dont la fabrication est de plus en plus maîtrisée. Le principal facteur qui freine encore l'utilisation massive de ce procédé de production d'énergie propre concerne les coûts de fabrication jugés excessifs face aux énergies fossiles ou nucléaires. A cet effet le défi auquel doit répondre l'industrie photovoltaïque est d'augmenter le rendement rapport physique/rendement économique des cellules solaires, par l'introduction de moyens technologiques permettant d'améliorer le rendement de conversion, en utilisant de nouveaux matériaux et structures qui peuvent augmenter les performances des dispositifs photovoltaïques tout en réduisant les coûts de fabrication par des techniques de mise en oeuvre faciles et peu coûteuses. Les cellules photovoltaïques à hétérojonctions sont obtenues par la mise en contact de matériaux d'énergie de gap différente.

L'hétérojonction en silicium 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 est en effet plus élevée que celle du c-Si. À la différence des cellules à homojonctions classiques, les zones dopées et la passivation de surface sont ici réalisées par un unique dépôt de silicium amorphe hydrogéné. Celui-ci possède en effet de bonnes qualités de passivation de surface, et l'on peut changer ses propriétés électriques par l'insertion d'impuretés dopantes.

Dans cet ordre d'idées, nous sommes intéressés à l'optimisation par simulation (à l'aide du logiciel AFORS-HET) des paramètres de différents couches constituant une cellule photovoltaïque à hétérojonction à partir d'un substrat de silicium cristallin et un émetteur formé par le silicium amorphe sans et avec un couche tampon en silicium amorphe intrinsèque.

Pour mener à bien notre étude nous avons structuré ce travail en quatre chapitres.

Le premier chapitre partagé en trois parties, nous a permis en premier lieu de définir le rayonnement solaire. En second lieu nous avons donné un rappel sur les semi-conducteurs et la jonction P-N. Et en dernier lieu nous avons présenté un aperçue sur l'historique de l'énergie photovoltaïque, le principe de base de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Le deuxième chapitre est consacrée à l'étude de la cellule solaire à hétérojonction en général et à l'hétérojonction a-Si:H/c-Si en particulier.

Dans le troisième chapitre, nous présentons notre contribution consistant en une simulation numérique des différents paramètres de la cellule solaire à hétérojonction : a-Si:H/c-Si en utilisant le logiciel AFORS- HET. L'interprétation des résultats obtenus par la simulation sont présentés dans ce chapitre.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale où sont résumés les principaux résultats obtenus et les perspectives projetées.

Chapitre I

Généralité sur les cellules solaires photovoltaïques

I.1. Introduction

Ce chapitre est considéré comme une base des notions fondamentales de cellules solaires photovoltaïques. Après une bref historique et définition des cellules solaires, nous décrirons le rayonnement solaire, la jonction PN et le principe de fonctionnement de ces cellules. Le modèle mathématique et électrique d'une cellule solaire est donné par la suite ainsi que ses différentes caractéristiques photovoltaïques. On termine par une brève description des différentes filières technologiques existantes ainsi que les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

I.2. Historique

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte pour la première fois par Antoine Becquerel en 1839 [1].

C'était qu'en 1958 où le premier engin spatial alimenté par énergie photovoltaïque a été lancé dans l'espace. Jusqu'à maintenant, l'énergie solaire photovoltaïque est le seule type d'énergie d'alimentation des satellites [1].

Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware. La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie. En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés au Japon et en Allemagne et ils se généralisent depuis 2001 [1].

Depuis le début des années 80, la quantité de modules photovoltaïques expédiés par an (mesurés en MW-Crêtes) a augmenté et le prix des modules (par Watt-Crête) diminuait au fur et à mesure que le nombre de modules fabriqués augmentait. Bien que le prix se soit quelque peu stabilisé, la quantité de modules photovoltaïques expédiés chaque année continue d'augmenter.

I.3. Rayonnement solaire

La distance de la terre au soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est de 3×10^8 m/s, les rayons du soleil mettent donc environ 8 min à nous parvenir.

Le rayonnement reçu par la terre en incidence normale avoisine les 1400 W/m² avant d'aborder la couche atmosphérique.

Pour tenir compte de l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire incident (Figure I.1), on introduit un coefficient appelé nombre de masse (AM) défini par :

$$AM = 1/\cos(\theta)$$
 (I. 1)

Où θ est l'angle que fait le soleil avec son zénith. Par définition, AMO correspond aux conditions hors atmosphère.

Quand le soleil fait un angle de 48° par rapport au zénith, la lumière incidente est dite AM1.5. Le nombre de masse d'air caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire et de plus, sert de standard pour quantifier les performances de nouveaux dispositifs photovoltaïques.

Les conditions standard de caractérisation sont définies par les normes IEC-60904 de l'International Electrotechnical Commission (IEC) selon une distribution spectrale AM1.5G global (somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité 100 mW/cm² et pour une température de cellule de 25°C [2].

La Figure (I.1) montre les différents airs masses [2].



Figure I.1. Différents air masses

I. 4. Spectre solaire

Le spectre solaire c'est sa décomposition en longueurs d'onde ou "couleurs". La lumière solaire est en effet composée de touts sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, elles sont porteuses d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation :

$$E = h.\nu = \frac{h.c}{\lambda} \tag{I. 2}$$

Une courbe standard, de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par les satellites [2]. Sa distribution en énergie est répartie comme il est indiqué sur (Figure I.2).



Figure I.2. Spectre solaire

I.5. Définition d'une cellule solaire PV

Une cellule solaire PV est un dispositif qui convertit directement une énergie électromagnétique (rayonnement solaire) en énergie électrique continue directement utilisable.



Figure I.3. Cellule solaire PV comme dispositif de conversion de l'énergie solaire

I. 6. Matériaux Semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux (conducteur).

Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semiconducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du gap Eg en électronvolts (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur. Elle varie de 1,0 à 1,8 eV pour les applications photovoltaïques [3].

Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera à travers de l'épaisseur de la cellule.

Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie du band gap vont libérer un électron négatif, laissant un « trou » positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique E de part et d'autre de la cellule [3].

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du « dopage » par des impuretés.



Figure I.4. Matériaux Semi-conducteur.

I. 6. 1. Semi-conducteurs intrinsèques

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge.

Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon). Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal [4].

I. 6. 2. Semi-conducteurs extrinsèques

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

I.7. Dopage

Le dopage d'un matériau consiste à introduire dans sa matrice des atomes d'un autre matériau; ces atomes vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous. Les atomes de matériau dopant sont également appelés impuretés, et sont en phase diluée : leur concentration reste négligeable devant celle des atomes du matériau initial. Dans un semi-conducteur intrinsèque, ou pur, il n'y a aucun atome dopant. Tous les électrons présents dans la bande de conduction proviennent donc de la bande de valence.

Il y a donc autant d'électrons que de trous : n = p = ni ; ni est la concentration intrinsèque. Tout dopage sert à modifier cet équilibre entre les électrons et les trous, pour favoriser la conduction électrique par l'un des deux types de porteurs.

Il existe deux types de dopage :

I.7.1. Dopage N: consiste à produire un excès d'électrons qui sont négativement chargés



Figure I.5. Dopage de type N : le phosphore possède un électron de plus que le silicium

I.7.2. Dopage P: consiste à produire une carence en électrons, donc un excès de trous, considérés comme positivement chargés.



Figure I.6. Dopage de type P : le bore possède un électron de moins que le silicium

I.8. Jonction P-N

Parmi tous les dispositifs à semi conducteur, la jonction P-N est un composant essentiel à la fois pour ses applications directes et parce que la compréhension de sa physique permet la compréhension de nombreux autres dispositifs. Une jonction P-N est constituée par un cristal semi-conducteur dont la concentration en impuretés profondes varie avec x pour passer d'une région de type P à une région de type N.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction (dite P-N) a été formée. La zone où la charge n'est pas nulle porte le nom de zone de charge d'espace (ZCE) (Figure. I.7).

En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue.



Figure I.7. Structure d'une jonction P-N

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

L'énergie solaire est une énergie propre permettant de produire de l'électricité. La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique est basée sur les trois mécanismes suivants (figure. I.8):

•Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau Constituant le dispositif ;

•Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;

• Collecte des particules générées dans le dispositif.



Figure I.8. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I. 10. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

I. 10.1. Modèle mathématique et circuit équivalent d'une cellule solaire réelle

Une cellule photovoltaïque est modélisée électriquement comme un générateur de courant shunté par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série et shunt comme le montre le schéma électrique équivalent de la figure (I.9) [5].



Figure I.9. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière. La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule. Elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule.

Une cellule photovoltaïque est modélisée mathématiquement par l'équation suivante [6] :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{(V+R_S I)}{V_T}} - 1 \right] - \frac{(V+R_S I)}{R_{sh}}$$
(I. 3)

I.10.2. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes.

Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension. Tout dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension, qui lui est propre.

Une cellule photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension, ainsi qu'illustré ci-dessous :



Figure I.10. Caractéristiques courant tension

Cette caractéristique courant-tension est une relation entre la tension et le courant délivrés par la cellule photovoltaïque.

I.10.3. Caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque

Ces caractéristiques peuvent être déterminées à partir des courbes I-V, ou de l'équation caractéristique (I.2) :

a. Courant de court-circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (nulle, infinie), ce courant se confond avec le photo courant I_{ph} .

b.Tension de circuit ouvert

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV). Son expression est déduite de l'équation suivante :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V_{co}}{V_T}} - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_{sh}}$$
(I. 4)

Dans le cas idéal (Rs $\rightarrow 0$, $\rightarrow R_{sh}=\infty$) on obtient :

$$V_{co} = V_T ln(\frac{l_{ph}}{l_o} + 1)$$
 (I. 5)

c. Puissance maximale

La puissance utile maximale s'obtient en optimisant le produit courant tension, soit :

$$P_m = (V.I)_{max} \tag{I.6}$$

d. Facteur de forme FF

La forme FF, dit aussi facteur de remplissage, ou (fil factor), il est défini par:

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}}$$
(I. 7)

Ce facteur montre la déviation de la courbe I = f (V) par rapport à un rectangle (de longueur V_{co} et largeur I_{cc}) qui correspond à la photopile idéale.

La puissance des modules photovoltaïques s'exprime en Watts – crête. Cette dernière représente la puissance que peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement de 1000 W/m² et à une température de 25 °C.

e. Le rendement

La puissance P = I.V est nulle en court-circuit et en circuit ouvert. Elle passe par un maximum quand on parcourt la caractéristique I-V.

Le rendement est donné par:

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} \tag{I.8}$$

 $O\dot{u}$: P_i est la puissance incidente.

I.11. Différents types de cellules solaires photovoltaïques

La plupart des panneaux photovoltaïques vendus actuellement sont issus de la filière silicium cristallin massif, dont les prix et les rendements varient selon les procédés de fabrication utilisés. Cette filière est divisée en deux groupes :

Les matériaux polycristallins qui représentent près de 50 % du marché mondial et indiquent des rendements modules compris entre 12 et 17 %, et les matériaux monocristallins (c-Si) qui constituent 30 % de la production de modules et affichent des rendements modules compris entre 14 et 20 % (mais coûtent plus cher à produire) [7].

Enfin, les hétérostructures de silicium, combinant silicium monocristallin et silicium amorphe hydrogéné (structure HIT, pour Hétérojonction with Intrinsic Thin layer, voir chapitre 2) ont montré leur fort potentiel, affichant un rendement laboratoire de 23 % pour une surface de 100 cm² [7]. C'est à cette dernière filière que nous allons nous intéresser dans cette mémoire, car celle-ci permet d'atteindre des rendements élevés sur de grandes surfaces tout en ayant l'avantage de pouvoir réaliser une partie du procédé de fabrication à basse température, contrairement à la filière classique.

D'autres filières, basées sur des matériaux semi-conducteurs autres que le silicium, existent aussi à l'étape industrielle comme les cellules CIGS (alliage Cuivre, Indium, Gallium et Sélénium), les CdTe (Tellure de Cadmium) et les cellules organiques [7].

I. 12. Avantages et inconvénients

I. 12.1. Avantage

•D'abord, une haute fiabilité – elle ne comporte pas de pièces mobiles – qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux

•Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt ;

•Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé ;

• Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I. 12.2. Inconvénients

•La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologique et requiert des investissements d'un coût élevé ;

•Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%)

•Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée ;

• Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

I.13. Conclusion

Ce chapitre servira d'un point de départ afin de se familiariser sur le domaine photovoltaïque. Où il est nécessaire de connaitre la définition d'une cellule solaire PV et l'historique des cellules solaires PVs. Sans rayonnement solaire la cellule ne sert à rien, c'est pourquoi, le rayonnement solaire est un paramètre aussi important de le savoir. La compréhension du principe de fonctionnement de la cellule PV est aussi très intéressante à le détaillé. Juste après, la caractéristique d'une cellule photovoltaïque a été présentée. Puis, les différents types de cellules solaires photovoltaïques ont été également présentés. Enfin, nous avons cité les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Chapitre II

Cellules solaires photovoltaïques à hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p)

.

II.1. Introduction

Les travaux de recherche continuent afin d'améliorer le rendement des cellules. Parmi les structures innovantes, les cellules à hétérojonctions de silicium présentent des caractéristiques intéressantes puisque le record de la filière silicium est actuellement détenu par une cellule à hétérojonction. Dans ce chapitre, nous approfondirons dans un premier temps la structure d'une cellule à hétérojonctions. Nous étudierons ensuite les propriétés physiques du silicium cristallin et du silicium amorphe hydrogéné.

II.2. Historique des cellules à hétérojonction

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 [8], 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 µm) 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 [9]. Sanyo a utilisé du c-Si de type n donc du a-Si:H dopé p (pour réaliser une jonction). On peut voir sur la figure II.1 la première réalisation de Sanyo. TCO signifie Transparent Conducteur Oxyde.



Figure II.1. Schéma de la première cellule solaire à simple hétérojonction de l'entreprise Sanyo.

Sanyo a réussi avec cette nouvelle technologie à prendre 5% (2002) puis même 8 % d'un marché pourtant très concurrentiel [10].

II. 3. Principe de l'hétérojonction a-Si: H/c-Si

Une hétérojonction est une jonction entre deux semi-conducteurs de gaps différents, si les deux semi-conducteurs sont de même type on dit que l'hétérojonction est isotype et s'ils sont différents on dit qu'elle est anisotype.

L'hétérojonction de silicium a-Si:H/c-Si résulte de la mise en contact des deux matériaux, par dépôt de silicium amorphe hydrogéné sur le substrat cristallin. Lorsque deux matériaux semi-conducteurs sont en contact, il se produit un échange de charges qui fait tendre le système vers l'équilibre thermodynamique. L'émetteur qui est la zone fortement dopée dans le cas d'une homojonction est remplacé par un matériau à grand gap (ici le silicium amorphe, a-Si:H). Ce matériau à grand gap doit satisfaire certaines conditions comme avoir une faible absorption et avoir une faible recombinaison [11]. Le diagramme de bande dépend des paramètres suivants: le gap (Eg1 et Eg2), l'affinité électronique ($\chi 1$ et $\chi 2$) et le niveau de dopage ($\delta 1$ et $\delta 2$) de ces deux matériaux en contact.



Figure II.2. Représentation des paramètres électroniques de deux Matériaux isolés.

Le niveau du vide est le niveau de référence.

Pour les hétérojonctions, le modèle de base est le modèle d'Anderson qui est sans états d'interface. Ce modèle de base est incomplet car le transport de charge dans les dispositifs à hétérojonction peut être dominé par les phénomènes de piégeage au niveau des états d'interface. Il existe des modèles introduisant des états d'interface chargés et des dipôles qui influent sur le diagramme de bande en engendrant des recombinaisons.

II.3.1. Différents types d'hétérojonctions

Selon les matériaux les semi-conducteurs utilisés, on peut distinguer trois types d'hétérojonctions [12]. Le schéma de la (figure II.3) donne une description schématique des décalages de bandes de conduction et de valence pour trois types d'hétérojonction [12].

- **Type I** : La bande interdite E_q^B est entièrement dans E_q^A .
- **Type II** : Une des discontinuités est plus grande que $E_g^A E_g^B$ mais inférieure à E_g^A .
- **Type III** : Une des discontinuités est supérieure $\& E_q^A$.



Figure II.3. Diagrammes schématiques montrant les différents types d'hétérojonction.

II.3.2. Modèle d'Anderson

Le modèle d'Anderson est le modèle de base pour décrire les conditions de mise en contact de deux matériaux semi-conducteurs. [13] Ce modèle est basé sur les propriétés électroniques des matériaux que sont le gap Eg, la permittivité électrique ε , l'affinité électronique χ et le niveau de dopage δ . Lors du raccordement des bandes de conduction et de valence, la différence entre les gaps et les affinités électroniques sont à l'origine des discontinuités. La figure II. 2 représentent les diagrammes de bande d'une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p) et a-Si:H(p)/c-Si(n) respectivement. Dans ce modèle on considère que le transport de charges se fait par injection dans les régions quasi-neutres et aussi par les phénomènes de génération/recombinaison dans la zone de charge d'espace.

Le raccordement des bandes de conduction et de valence se fait en respectant les relations suivantes :

Le désaccord de la bande de conduction :

$$\Delta EC = q \left(\chi 2 - \chi 1 \right) \tag{II.1}$$

Le désaccord de la bande de valence :

$$\Delta EV = q (\chi 2 - \chi 1) + Eg1 - Eg2 \qquad (II .2)$$

La tension de diffusion :

$$q\mathrm{Vd} = q \left(\Phi 2 - \Phi 1\right) \tag{II.3}$$



(1) Silicium amorphe hydrogéné de type p et cristallin de type n.



(2) Silicium amorphe hydrogéné de type n et cristallin de type p.

Figure II.4. Diagrammes des bandes pour des hétérojonctions de silicium

II.4. Hétérojonction a-Si : H(n)/c-Si(p)

L'hétérojonction a-Si :H/c-Si est utilisée essentiellement pour réaliser des cellules photovoltaïques. C'est une hétérojonction entre un matériau amorphe (donc de gap direct) et un matériau cristallin de gap indirect.

Nous présentons un exemple de diagramme de bandes pour les deux hétérojonctions des cellules photovoltaïques : Celle en face avant et celle en face arrière. Les V_{di} sont les potentiels de diffusion dans le semi-conducteur A et B. Leur somme est égale au potentiel interne soit :

$$V_{dA} + V_{db} = V_{bi} \tag{II.4}$$

La différence entre le niveau de Fermi et le bord de bande (le plus proche) est aussi notée δ_i dans le matériau i. Par convention, les δ sont toujours positifs.

Pour une hétérojonction A/B on peut estimer le potentiel interne V_{bi} par l'une de ces deux équations simples (et équivalentes) :

$$V_{bi} = E_{g-\delta_A-\delta_B-\Delta E_{\nu}}^A \tag{II.5}$$

Ou :

$$V_{bi} = E_{g-\delta_A-\delta_B+\Delta E_c}^B \tag{II.6}$$

Rappelons qu'un potentiel interne important est essentiel pour avoir un bon Vco mais que ce lien n'est pas linéaire. Des simulations montrent qu'à partir d'un certain seuil, le potentiel interne augmente sans permettre d'augmenter plus le Vco.

Concernant les schémas, en face avant, il s'agit de a-Si:H (n+) sur c-Si (p) comme sur la (figure.II-5). En face arrière, l'hétérojonction est c-Si de type p puis a-Si:H (p+) (figure.II-6).

On remarque que les deux hétérojonctions sont ici de type II.



Figure II.5. Diagramme de bandes de la face avant des cellules: hétérojonction a-Si:H (n+) / c-Si(p).



Figure II.6. Diagramme de bandes de la face arrière des cellules : hétérojonction c-Si(p) / a-Si:H (p+)

II.5. Fonctionnement physique d'une hétérojonction

II.5.1. Hétérojonction à l'équilibre thermodynamique

Considérons l'hétérojonction formée en mettant deux semi-conducteurs de type et de gap différent. Supposons que chacun de ces deux morceaux semi-conducteurs est homogène.

Soient N_a et N_d les concentrations d'accepteurs et de donneurs dans les semi-conducteurs de type p et n respectivement. Lors de la mise en contact des deux semi-conducteurs, des électrons vont diffuser du semiconducteur de type n vers celui de type p et des trous diffusent dans le sens inverse. Cette diffusion de porteurs de charge est une conséquence des concentrations très différentes de porteurs de charge dans les deux semi-conducteurs. Il en résulte un courant électrique de porteurs majoritaires, Il est appelé courant de diffusion.

Les électrons qui arrivent du côté p se recombinent avec des trous justes après la jonction. Ainsi, dans une région proche de la jonction, les trous libres disparaissent et il reste des accepteurs ionisés (charges négatives). De la même manière, les électrons libres disparaissent du côté n près de la jonction, et il reste des donneurs ionisés (charges positives).

.

On obtient finalement une zone avec des charges fixes (les impuretés ionisées) non compensées autour de la jonction. Cette zone s'appelle la zone de déplétion. Plus loin de la jonction, le semi-conducteur garde ses propriétés non perturbées et reste en particulier électriquement neutre.Un champ électrique apparaît, dirigé des charges + vers les charges - c'est-à dire du semiconducteur n vers le semiconducteur p. Ce champ électrique doit donc être localisé près de la jonction : il ne peut pas exister dans les régions où il y a des charges libres. Au fur et à mesure que la diffusion progresse, le champ électrique autour de la jonction augmente.

Comme il s'oppose au passage des trous de p vers n et des électrons de n vers p, il en résulte une diminution de l'intensité du courant de diffusion. Un électron libre qui suite à la génération d'une paire électron-trou- arriverait dans la partie p près de la jonction (porteur minoritaire) sera accéléré vers n par le champ électrique. De la même manière, un trou arrivant près de la zone de déplétion dans la région n, sera accéléré vers la région p. Il en résulte un courant de porteurs minoritaires (qui s'ajoutent aux porteurs majoritaires une fois qu'ils ont traversé la jonction), appelé courant de dérive. Ce courant circule dans le sens opposé au courant de diffusion. Le courant de dérive est relativement indépendant du champ électrique à l'interface. En effet, il est limité par la génération de porteurs minoritaires minoritaires et atteint donc la valeur de saturation pour des champs relativement faibles.

A l'équilibre, le champ électrique s'établit à une valeur telle que le courant de diffusion est égal et opposé au courant de dérive.

II. 6. Les cellules solaires à hétérojonctions a-Si : H / c-Si

II.6.1. Structure

La figure II.6 représente la structure conventionnelle d'une cellule silicium à hétérojonctions où les contacts sont placés sur les deux faces de la structure. Sur un substrat de silicium cristallin, sont déposées sur les deux faces de la couche de silicium amorphe hydrogéné qui vont créé des hétérojonctions 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 couche de a-Si:H déposée sur la face arrière est du même type de dopage que le substrat et est appelée BSF (**B**ack **S**urface **F**ield). Au dessus de l'émetteur est ensuite déposé un oxyde transparent conducteur. Les contacts métalliques sont enfin placés sur les deux faces de la cellule.



Figure II.7. Structure d'une cellule à hétérojonctions

II.6.2. Les deux semi-conducteurs de base

a. Le silicium cristallin

On distingue deux catégories selon la technologie employée.

Le silicium monocristallin : C'est le matériau le plus abondant. Il présente un bon rendement à fort et moyen éclairement. Il est constitué d'un seul cristal ordonné. Les photopiles à base de silicium monocristallin sont parmi les plus performantes (après celles à l'arséniure de gallium).

Le silicium multicristallin : Il est constitué de cristaux assemblés appelé grains. Il est un peu moins performant que le précédent et aussi moins onéreux.

Les atomes du silicium cristallin sont régulièrement disposés et fermement liés les uns aux autres. Chacun est lié à 4 atomes voisins avec lesquels il partage les quatre électrons de sa couche M. La répartition étant régulière on peut considérer qu'un atome est au centre d'un tétraèdre et que ses 4 voisins sont placés au sommet de ce tétraèdre. On dit que le silicium a une structure tétraédrique.

.

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer des cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzeux (dioxyde de silicium). Celui-ci est chauffé dans un four électrique à haute température. Divers traitements du sable permettent de le purifier. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement. Il est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme liquide, puis coulé sous forme de lingot suivant le processus pour la cristallisation du silicium, et découpé sous forme de fines plaquettes. Par la suite, ce silicium pur va être enrichi en éléments dopants (P, As,Sb ou B) afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur de type P ou N.

Les cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin occupaient 67 % du marché de la production mondiale des modules photovoltaïques en 2008 [14]. L'intérêt de ce semiconducteur est multiple : abondant dans la nature, non toxique, son dopage est assez facile avec du bore ou du phosphore. Le silicium bénéficie aussi de son implantation dans l'industrie de la microélectronique.

Cette industrie utilise du silicium cristallin de très bonne qualité (grande pureté) et chimiquement stable dans le temps. Ainsi, des techniques de croissance ont été développées pour obtenir cette pureté notamment en réduisant les défauts (dislocations) dans le matériau.

Les rendements obtenus avec des cellules photovoltaïques à base de silicium monocristallin sont plus importantes. Mais, il faut signaler que les techniques d'élaboration utilisées pour obtenir du silicium monocristallin sont très couteuses. Le silicium multi cristallin a donc l'avantage d'être moins couteux que le silicium monocristallin. Cela explique la prédominance des cellules à base de silicium multicristallin dans l'industrie photovoltaïque.

b. Le silicium amorphe

Le silicium amorphe (a-Si), à la différence du silicium cristallin (c-Si), ne possède pas d'organisation atomique régulière, du moins à longue distance. En fait, un ordre local est préservé dans le silicium amorphe, les liaisons chimiques entre un atome Si et ses plus proches voisins satisfont la configuration tétraédrique où chaque atome est lié à ses 4 voisins (distants de 0.23 nm) par une liaison covalente Si-Si (Figure II.9). Dans les composés covalents et les chalcogénures amorphes, la longueur des liaisons interatomiques et les angles de ces liaisons varient légèrement autour des valeurs moyennes qui sont celles

du cristal. Cette dispersion augmente avec la distance, de sorte que dès que la distance à un atome donné dépasse 4 à 5 distances interatomiques, les positions sont aléatoirement distribuées et une fraction importante des liaisons de covalence sont coupées, donc des électrons sont non appariés. On dit de tels atomes qu'ils présentent une liaison pendante ("dangling bond").

Cette liaison pendante conditionne l'essentiel du comportement du matériau. Un second électron peut aisément s'y fixer, créant un centre chargé négativement ; l'électron célibataire peut au contraire s'échapper, laissant un centre chargé positivement. On dit que la liaison brisée présente un caractère amphotère.



Figure II.8. Structure du silicium amorphe : a) a-Si sans hydrogène ; b) a-Si avec Hydrogène (a-Si:H)

Le silicium amorphe a-Si produit sous vide ou par des méthodes de pulvérisation cathodique contient tellement de défauts que les états localisés dans la bande interdite interdisent son dopage. Des films minces au silicium amorphe ont été réalisés dès 1989 par la méthode de "Glow discharge". Dans le procédé de décharge électroluminescente, la présente de 5 à 15 % d'hydrogène permet, grâce à sa petite taille, de saturer les liaisons non satisfaites, réduisant par la même la densité d'états localisés dans la bande interdite [15].

Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) s'est fait connaître par l'annonce de W.E. Spear et P.E. Lecomber de l'Université de Dundee suivant laquelle il était possible de contrôler le dopage n ou p à condition d'ajouter de l'hydrogène pendant le dépôt. Dès 1977, David Carlson et l'équipe de RCA proclamaient qu'une cellule solaire de 5.5 % avait été réalisée avec un matériau extrêmement économique (dans la mesure où son coefficient d'absorption de la lumière était 10 fois plus élevé que celui du silicium cristallin) [16].

II.7. Composants d'une cellule de silicium à hétérojonctions

II.7.1. L'oxyde transparent conducteur (TCO)

Dans la structure standard d'une cellule photovoltaïque, un oxyde transparent conducteur est placé sur la face avant (face éclairée) de la cellule. Le TCO doit avoir certaines propriétés :

• Il doit être avoir une excellente transparence optique. Etant placé sur la face avant, cette condition est nécessaire pour avoir le maximum de lumière qui pénètre dans la cellule pour générer des paires électron-trou.

- Il doit avoir une bonne conductivité pour assurer la collecte des porteurs.
- Il doit aussi avoir une bonne adhérence sur une variété de substrats.

Les oxydes transparents conducteurs sont des matériaux à grand gap. Il existe une grande variété d'oxydes transparents conducteurs possibles. Nous avons les oxydes de zinc, les oxydes d'étain et les oxydes d'indium qui peuvent être dopés avec un grand nombre d'éléments atomiques (selon les cas : Al, In, Ga, F, Sn).

L'oxyde d'indium dopé à l'étain nommé ITO (Indium Tin Oxide) est l'oxyde transparent conducteur le plus connu et aussi le plus utilisé. L'ITO possède en effet d'excellents propriétés : transparence supérieure à 80 % voire 90 % sur le spectre visible, résistivité faible de $10^{-4} \Omega$ cm à $5.10^{-4} \Omega$ cm pour les meilleurs ITO mais pouvant excéder $5.10^{-3} \Omega$ cm pour des ITO médiocres, et une très bonne adhérence sur une multitude de substrats [17].

Pour les cellules à contact arrière, les TCO en face avant sont remplacés par des matériaux qui joueront à la fois le rôle de couche antireflet et de couche de passivation de la surface du substrat c-Si. Le nitrure de silicium (SiN_x) est généralement utilisé pour ce type de structure.

II.7.2. L'émetteur

L'émetteur est constitué par une fine couche de silicium amorphe hydrogéné de dopage opposé au substrat ou du c-Si fortement dopé dans le cas d'une homojonction.

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.

Toutefois, 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].

II. 7.3. Le BSF

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 [18].

II.7.4. Les contacts

Les contacts métalliques sont placés sur les deux faces de la cellule pour les structures standards. Ces contacts permettent de collecter le courant photogénéré. 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 coté 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 [18].

II.8. Contact Métal-Semiconducteur (M-SC)

Un métal est caractérisé par son travail de sortie (ϕ_M), qui est l'énergie nécessaire pour arracher un électron de la bande permise du métal. Le travail de sortie du métal est lié au niveau de Fermi du Métal E_{FM} par :

$$\varphi_{\rm M} = {\rm Evide} - {\rm E}_{\rm FM} \tag{II. 4}$$

Pour un semiconducteur, le travail de sortie (φ_{SC}), est défini par :

$$\varphi_{SC} = Evide - E_{FSC}$$
(II. 5)

Le niveau de Fermi E_{FSC-p} d'un semiconducteur de type p est situé juste au dessus de sa bande de valence (BV) et le niveau de Fermi E_{FSC-n} d'un semiconducteur de type n est lui situé juste en dessous de sa bande de conduction (BC).

L'affinité électronique du semiconducteur, est la différence d'énergie entre le vide et le bas de la bande de conduction du semiconducteur (Ec).

II.8.1. Contact ohmique

Le contact Métal-Semiconducteur est ohmique si sa résistance est négligeable devant celle du volume du semiconducteur lui-même.

Le contact ohmique agit comme un réservoir de charges et la conduction des porteurs de charges est contrôlée par l'impédance du semi-conducteur et limitée par son volume, un semiconducteur de type p peut former un contact ohmique avec un métal lorsque le travail de sortie du SC (φ_{SC}) est inférieur au travail de sortie du métal (φ_{M}).

Après la mise en contact, les électrons diffusent de la BV du SC vers le métal jusqu'à l'égalisation des niveaux de Fermi. Le SC s'enrichit en porteurs majoritaires (trous) à l'interface avec le métal. Le SC se charge positivement et le métal se charge négativement. Comme les charges stockées sont mobiles, la zone d'accumulation dans le SC est de faible épaisseur. Il n'existe pas de barrière de potentiel entre le SC et le métal, et le courant passe dans les deux. Le contact M- SC de type n, peut être ohmique, quand le travail de sortie du SC φ_{SC} est supérieur au travail de sortie φ_M du métal. Il n'y a pas de formation de zone de charges d'espace, les électrons doivent être transférés du métal vers le SC pour équilibrer les niveaux de Fermi [19].



Figure II.9. Contact ohmique entre un métal et un SC (À gauche cas d'un SC-p, à droite d'un SC-n)

II.8.2. Contact Schottky

Le contact Schottky est caractérisé par l'existence d'une zone de déplétion des porteurs majoritaires (zone d'accumulation des porteurs minoritaires) dans la zone de charge d'espace du semi-conducteur. Le contact M-SC est Schottky lorsque :

• Pour un semi-conducteur de type p : si le travail de sortie du SC (φ_{SC}) est supérieur à celui de métal φ_M , le courbure des bandes vers le bas d'où l'existence d'une zone de déplétion des porteurs majoritaires comme présenter sur le diagramme des bandes.

•Pour un semi-conducteur de type n : si φ_{SC} est inférieur à φ_M , le courbure des bandes vers le haut d'où l'existence d'une zone de déplétion des porteurs majoritaires comme présenter sur le diagramme des bandes.



Figure II.10. Contact Schottky entre un SC et un métal (à gauche cas d'un SC-p, à droite d'un SC-n)

Donc en conclusion :

• Si $\phi_M > \phi_{SC}$: Le contact métal/semi-conducteur de type n est Schottky

Le contact métal/semi-conducteur de type p est ohmique

• Si $\phi_M < \phi_{SC}$: Le contact métal/semi-conducteur de type n est ohmique.

Le contact métal/semi-conducteur de type p est Schottky.

II. 9. Avantages des cellules à hétérojonction

Les cellules solaires à hétérojonctions a-Si:H/c- Si possèdent de nombreux avantages à la fois pour diminuer les coûts et augmenter les rendements.

L'avantage principal est que le dépôt de a-Si:H permet de réaliser simultanément la passivation (du c-Si) et la jonction p-n (en l'occurrence une hétérojonction p-n).

L'excellence de la passivation s'explique à la fois par les qualités « intrinsèques » du a-Si:H et par les hétérojonctions (existence de discontinuités de bande). D'autre part, l'intégralité du procédé est à basse température (< 250 °C voire 200 °C). C'est un triple avantage :

•On prévient toute dégradation (notamment pour les substrats de moins bonne qualité mais moins chers) ;

•On diminue le budget thermique (plus rentable écologiquement et économiquement);

•On peut utiliser plus facilement des substrats de faible épaisseur. En effet, actuellement, un verrou technique est la courbure des cellules fines à cause des contraintes créées par la métallisation aluminium pleine plaque en face arrière et du cycle à haute température. [20] Or, l'amincissement des substrats est la voie principale à moyen terme pour diminuer le coût des panneaux photovoltaïques en c-Si ou mc-Si. L'épaisseur moyenne actuelle est de 300 µm, des épaisseurs de 200 µm voire moins sont envisagées. Il est essentiel de noter qu'avec la réduction de l'épaisseur des substrats, la passivation des surfaces va devenir encore plus primordiale. Or, les cellules à hétérojonctions ont des meilleures passivations (à même rendement) que les cellules à homojonction classiques.

Cet avantage s'affirmera donc d'autant plus que l'épaisseur des substrats sera réduite. Par exemple, pour des substrats multicristallins de qualité moyenne, une réduction de l'épaisseur du substrat peut entraîner une augmentation du rendement si la passivation est

.

excellente. Ajoutons aussi que, comparé aux autres technologies de la filière c-Si, le procédé cellules à hétérojonctions est simple et sa mise à l'échelle est facile. Un dernier avantage des cellules à hétérojonctions est revendiqué par Sanyo. Il s'agit du meilleur comportement thermique que des cellules solaires à homojonction classiques. Cela implique plus d'énergie générée pour un même rendement de conversion nominal. Des mesures en extérieur ont montré que les cellules photovoltaïques à hétérojonctions avaient un coefficient de variation du rendement en fonction de la température d'environ -0,33 %/°C. Or, en conditions normales [9]. La température à la surface de la cellule est souvent supérieure à 25°C. Sanyo a mesuré un gain en énergie de 9 % pour des cellules à hétérojonctions affichant un rendement de conversion identique à des cellules classiques le choix du c-Si de type p peut sembler étonnant mais ce substrat reste la norme dans l'industrie photovoltaïque, c'est pourquoi de nombreux laboratoires européens l'ont choisi pour leurs cellules à hétérojonctions. Sanyo a toutefois réussi à assurer une filière propre en c- Si de type n [21].

II.10. Critères pour l'optimisation des cellules à hétérojonction en silicium

Il est possible de définir différents critères permettant la fabrication de cellules Si-HJ à hauts rendements. Ces dispositifs doivent être optimisés en fonction de plusieurs exigences:

•Une densité d'états d'interface minimale est nécessaire. Pour cela, le nettoyage de la surface est une étape cruciale afin d'éviter toute contamination avant le dépôt des couches a-Si:H.

•Le dopage des couches a-Si:H(n) et (p) doit être suffisant pour assurer un champ électrique élevé ainsi qu'un bon contact.

• Dans la mesure où les couches dopées sont très défectueuses, il est nécessaire d'insérer une couche de passivation à l'interface. Cette couche tampon ou « buffer » doit permettre la diminution des recombinaisons de surface, tout en ne gênant pas la conduction des charges.

• Les valeurs des discontinuités de bandes doivent être contrôlées dans la mesure du possible pour trouver un compromis entre propriétés de passivation (forte discontinuité) et de conduction (faible discontinuité).

.

•Les couches TCOs ainsi que les électrodes métalliques sont soumises à un compromis entre propriétés optiques (réflectivité, absorption, ombrage) et propriétés électriques (conductivité).

Pour conclure cette partie, il est important de souligner que l'effet Staebler-Wronski constaté sur les cellules p-i-n n'est pas visible sur les cellules Si-HJ. Les performances de ces cellules sont en effet stables quel que soit le type de c-Si après exposition à la lumière ainsi qu'à des températures de fonctionnement réelles [22].

II.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détails la définition, le principe de fonctionnement et les caractéristiques d'une cellule solaire à hétérojonction. Les paramètres principaux ainsi que la structure d'une cellule solaire à hétérojonction a-Si : H/c-Si sont également abordés avec le diagramme de bande correspondant.

Chapitre III

Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p)

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons intéresser à l'optimisation par simulation de certains paramètres des matériaux constituant la cellule solaire à hétérojonction de type : a-Si:H(n)/c-Si(p) afin d'obtenir un rendement maximal. Pour cela nous avons utilisé le logiciel de simulation AFORS-HET (Automate **FOR** simulation of **HET**erostructure).

Dans un premier lieu, nous présentons les équations de base de la modélisation des cellules solaires. Par la suite, nous présentons les structures de la cellule à simuler ainsi que les paramètres utilisés dans la simulation. Et après, nous présentons les résultats obtenus avec leurs discussions.

III.2. Définition de la simulation

La simulation est un outil utilisé par le chercheur pour étudier les résultats d'une action sur un élément sans réaliser l'expérience sur l'élément réel. En faisant varier les paramètres un à un et en recommençant avec les mêmes conditions initiales. Lorsque l'outil de simulation utilise un ordinateur on parle de simulation numérique. Il a également existé des simulateurs analogiques et il a été envisagé dans les années 1970 d'en construire des stochastiques. Le moyen le plus simple serait de tenter l'expérience, c'est-à-dire d'exercer l'action souhaitée sur l'élément en cause pour pouvoir observer ou mesurer le résultat. Dans de nombreux cas l'expérience est irréalisable, trop chère ou contraire à l'éthique. On a alors recours à la simulation : rechercher un élément qui réagit d'une manière semblable à celui que l'on veut étudier et qui permettra de déduire les résultats [23].

III.3. Equations de base de la modélisation

Les équations de base sont l'équation de Poisson, les deux équations de courant et les deux équations de continuité. L'équation de Poisson relie les variations du potentiel électrostatique aux densités locales de charge. Les équations de continuité et de transport décrivent la façon dont les densités d'électrons et de trous évoluent en fonction des mécanismes de transport, de génération et de recombinaison. La résolution de ces équations de base permet de trouver simultanément les distributions d'électrons, de trous, de potentiel et de la charge d'espace. Ce système de cinq équations de base peut être ramené à un système de trois équations car les deux équations de courant sont en effet incluses dans les deux équations fondamentales qui régissent le transport de charge dans les

semi-conducteurs : équation de Poisson et équations de continuité pour les électrons et les trous [24].

III.3.1. Équation de Poisson

L'équation de Poisson est définie ci-dessous [2] :

$$div(\varepsilon \nabla \varphi) = -\rho_{\nu}(\overline{r})$$
(III. 1)

Où φ est le potentiel électrostatique, $\nabla(.) = \overline{grad(.)}$ est le vecteur gradient, ε est la permittivité locale du milieu, \vec{r} est la vecteur position et ρ_{ν} est la densité volumique de charge.

Le champ électrique est déduit du gradient du potentiel électrostatique par $\vec{E} = -\nabla \varphi$.

III.3.2. Equations de continuité

Les équations de continuité des porteurs de charge décrivent l'évolution de la concentration des électrons et des trous en fonction du temps. La variation de la concentration locale d'un porteur (électron ou trou) peut avoir différentes origines :

La largeur de la bande interdite d'un semiconducteur peut être suffisamment faible pour permettre la transition directe d'électrons et de trous entre la bande de conduction et la bande de valence, ou entre ces bandes et les niveaux d'énergie créés par des défauts ou impuretés situés à l'intérieur de la bande interdite. Ces phénomènes de génération et de recombinaison peuvent être d'origine interne (agitation thermique) ou externe (source extérieure). Une source extérieure de génération de porteurs peut provoquer une augmentation de la concentration locale en électrons ou en trous. Un exemple typique de génération de porteurs par une source extérieure est la création de paires électron-trou sous l'influence de la lumière.

Les phénomènes de transport avec la présence des courants de conduction ou de diffusion. Les équations de continuité pour les électrons et les trous sont données par les expressions suivantes [24] :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} di \nu \vec{J}_n(\vec{r}, t) + G_n(\vec{r}) - R_n(\vec{r})$$
(III. 2)

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} di \nu \vec{J}_p(\vec{r}, t) + G_p(\vec{r}) - R_p(\vec{r})$$
(III. 3)

Où : q est la valeur absolue de la charge électronique élémentaire, n et p sont les concentrations d'électrons et de trous. $\vec{J_n}(\vec{r},t)$ et $\vec{J_p}(\vec{r},t)$ sont les densités de courant

d'électrons et de trous, $G_n(\vec{r})$ et $G_p(\vec{r})$ sont les taux de génération des électrons et des trous, $R_n(\vec{r})$ et $R_p(\vec{r})$ sont les taux de recombinaison des électrons et des trous.

Dans la physique des semiconducteurs, la génération et la recombinaison des porteurs sont des mécanismes à travers lesquels sont créés et éliminés des électrons et des trous mobiles. Ces mécanismes sont primordiaux dans le fonctionnement des dispositifs à base de semiconducteurs.

Si nous nous plaçons en régime stationnaire, les équations se simplifient :

 $\frac{\partial_n}{\partial_t} = 0$ et $\frac{\partial_p}{\partial_t} = 0$, ce qui signifie que les concentrations de porteurs ne sont plus fonction que de la position.

III.3.3. Equations de transport

Les équations de base donnent un cadre général mais il est nécessaire de disposer d'équations secondaires qui permettront de déterminer les modèles physiques particuliers pour les variables suivantes $:\vec{J_n}, \vec{J_p}, G_n, G_p, R_n R_p$. L'existence de courants électriques dans un semi-conducteur s'explique par la présence de champ électrique et aussi par d'un gradient de concentration des porteurs de charge dans le semi-conducteur.

Les courants induits par le champ électrique sont les courants de dérive et les courants induits par le gradient de concentration de porteurs sont appelés courants de diffusion. Le modèle de dérive-diffusion est le plus couramment utilisé pour décrire le transport de charge dans un semi-conducteur. Ainsi, les densités de courant $\vec{J_n} et \vec{J_p}$ des équations de continuité peuvent être approximées à l'aide de la théorie de transport de Boltzmann par le modèle de dérive diffusion. En utilisant les quasi-niveaux de Fermi des électrons et des trous ($E_{Fn} et E_{Fp}$) leurs expressions sont [24] :

$$\vec{J}_n = q\mu_n n \vec{\nabla} E_{Fn}$$
(III. 4)

$$\vec{J}_p = \mathbf{q}\mu_p \mathbf{p} \vec{\nabla} \mathbf{E}_{\mathbf{F}\mathbf{p}} \tag{III. 5}$$

Où μ_n et μ_p sont les mobilités des électrons et des trous, E_{Fn} et E_{Fp} sont les quasiniveaux de Fermi des électrons et des trous.

III.4. Simulation d'une cellule solaire PV à hétérojonction : a-Si:H (n) /c-Si (p)

III.4.1. Paramètres à simuler

- Influence du travail de sortie du contact avant : Où le travail de sortie ϕ_F varie de 3.5 à 5.5 eV.
- Influence du travail de sortie du contact arrière :

Où le travail de sortie ϕ_B varie de 5 à 6 eV.

- Influence du dopage N_d de la couche émetteur a-Si:H(n) : Où le dopage varie de 10^{14} à 10^{20} cm⁻³.
- Influence du dopage N_a de la couche absorbeur c-Si (p) : Où le dopage varie de 10^{14} à 10^{20} cm⁻³.
- Influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque a-Si: H (i) : Où l'épaisseur varie de 1 à 7 nm.
- Influence de l'épaisseur de la couche de silicium a-Si (p+):
 Où l'épaisseur varie de 1 à 7 nm

III.4.2. Structure de la cellule photovoltaïque à simuler

La Figure III.1 indique les trois structures de la cellule à simuler.

ITO	ΙΤΟ	ΙΤΟ
n-type a-Si+H	n-type a-Si:H	n-type a-Si:H
n-type a-51.11	i-type a-Si:H	i-type a-Si:H
base-p type c-Si	base-p type c-Si	base-p type c-Si
		p+ -type a-Si:H
Métal	Métal	Métal
Cellule1	Cellule2	Cellule3

Figure III.1. Structures de la cellule photovoltaïque à simuler

III.4.3. Paramètre de la cellule photovoltaïque à simuler

L'ensemble des paramètres des couches utilisés dans la simulation sont résumés dans le tableau (III.1).

Paramètres	тсо	a-Si:H(n)	a-Si:H(i)	c-Si(p)	Contact Arrière
Epaisseur de la couche, w (nm) paramètre de base	80	10	(3-7)	3 ×10 ⁵	10
Permittivité relative , ε_r		11.9	11.9	11.9	
Affinité électronique, χ (ev)		3.9	3.9	4.05	
Energie du gap, Eg (eV), paramètre de base		1.72	1.72	1.12	
Densité effective des états dans la bande de conduction, Nc (cm ⁻³)		1×10 ²⁰	1×10 ²⁰	2.8×10 ¹⁹	
Densité effective des états dans la bande de valence, Nv (cm ⁻³)		1×10 ²⁰	1×10 ²⁰	2.6×10 ¹⁹	
Mobilité des électrons, µn(Cm ² /V.s)		20	20	1041	
Mobilité des trous, µp(Cm ² / V.s)		5	5	413	
Concentration des atomes accepteurs, $N_a(cm^{-3})$, paramètre de base		0	0	10 ¹⁴ -10 ²⁰	
Concentration des atomes donneurs, N_d (cm ⁻³), paramètre de base		10 ¹⁴ -10 ²⁰	1×10 ²⁰	0	
Vitesse thermique des électrons (cm/s)		1×10 ⁷	1×10 ⁶	1×10 ⁷	
Vitesse thermique des trous (cm/s)		1×10 ⁷	1×10 ⁶	1×10 ⁷	
Coefficient de recombinaison (Auger) pour électrons (cm6 s-1)				2.2×10 ⁻³¹	
Coefficient de recombinaison (Auger) pour trous				9.9×10 ⁻³²	

Tableau III.1. Valeurs des paramètres des couches utilisés dans la simulation

III.5. Résultats et discussions

III.5.1. Structure cellule1

a. Influence du travail de sortie du contact avant

La figure III.2 représente l'influence du travail de sortie du contact avant ϕ_F sur les performances de la cellule pour : $N_d = 10^{20}$ cm⁻³, $N_a = 10^{17}$ cm⁻³, $\phi_B = 5.3$ eV.

On observe une diminution des performances de cellule avec l'augmentation du travail de sortie.

D'après la figure III.2, on remarque que le rendement diminue à partir d'une valeur optimale du travail de sortie égale 4.5 eV. Ce qui signifie qu'il faut choisir un métal dont le travail de sortie est inferieur au travail de sortie du semiconducteur de type n a-Si:H(n) pour que le contact devient ohmique.



Figure III.2. Variation du Vco, Jsc, FF et η pour différents valeurs du travail de sortie du contact avant

b. Influence de travail de sortie contact arrière

La figure III.3 représente l'influence du travail de sortie du contact arrière sur les performances de la cellule pour : $N_d = 10^{20}$ cm⁻³, $N_a = 10^{17}$ cm⁻³, $\phi_F = 4.5$ eV.

Il est remarquable d'après la figure III.3, que le rendement augmente tant que le travail de sortie ϕ_B ne dépasse pas une valeur optimale de 5.3 eV. Mais dès que ϕ_B dépasse cette valeur le rendement est invariable. Ce qui signifie qu'il faut choisir comme contact arrière tous métal dont le travail soit supérieur au travail de sortie du semiconducteur type p c-Si:(p) pour que le contact devient ohmique.



Figure III.3. Variation du Vco, Jsc, FF et η pour différents valeurs du travail de sortie du contact arrière

c. Influence du dopage N_d de la couche émetteur a-Si:H(n)

La figure III.4 présente les performances de la cellule en fonction du dopage Nd de la couche émetteur en a-Si:H de type N pour $N_a = 10^{17}$ cm⁻³, $\phi_B = 5.3$ eV, $\phi_F = 4.5$ eV.

On remarque que l'augmentation du dopage N_d entraine une amélioration des performances de la cellule, car si N_d augmente, la zone de charge d'espace s'étale dans la couche c-Si(p) ce qui permet d'augmenter le champ électrique dans le cette couche et par conséquent, la collection des porteurs de charge sera grande. Donc, la valeur optimale de N_d est 10^{20} cm⁻³ et un rendement de conversion η de 22 % est obtenu.



Figure III.4. Variation du Vco, Jsc, FF et n pour différents valeurs de Nd

d. Influence du dopage Na de la couche absorbeur c-Si (p)

La figure III.5 présente les performances de la cellule en fonction de dopage N_a de la couche absorbeur en c-Si (p) de type P pour N_d = 10^{20} cm⁻³, ϕ_B = 5.3 eV , ϕ_F =4.5 eV.

On observe une augmentation du dopage N_a induit une diminution du rendement, de la tension de circuit ouvert et courant de court circuit jusqu'à $N_a = 10^{17}$ cm⁻³, D'autre par une diminution de facteur de forme FF jusqu'à $N_a = 10^{19}$ cm⁻³.

On remarque l'augmentation du dopage N_a de la couche c-Si entraine une amélioration des paramètres électriques des cellules simulées par la diminution des pertes résistives. En effet, d'un côté l'augmentation de la concentration des atomes dopants dans le substrat induit une augmentation de sa conductivité et donc une amélioration de ses propriétés électriques qui se reflètent par l'amélioration des performances photovoltaïques de la cellule. Mais, d'un autre côté, l'augmentation de N_a permet de diminuer la largeur de la zone de charge d'espace dans la couche absorbeur, ce qui diminue les performances. D'où, une valeur optimale du dopage, $N_a = 10^{17}$ cm⁻³ donnant un rendement de 22%.



Figure III.5. Variation du Vco, Jsc, FF et η pour différents valeurs de Na

III.5.2. Structure cellule2

a.Influence de l'épaisseur Wi de la couche tampon a-Si:H(i)

On insert au structure cellule 01 une couche tampon en a-Si:H(i) entre la couche a-Si:H(n) et la couche c-Si(p). En fixant les différents paramètres optimisés précédemment. C'est-à-dire : $\phi_B = 5.3 \text{ eV}$, $\phi_F = 4.5 \text{ eV}$, $N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_d = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

On remarque d'après la figure III.6, qu'il faut choisir une épaisseur de cette couche la plus faible possible. Le rôle de cette couche est seulement de passivé les états de surface dans l'interface entre la couche a-Si:H(n) et la couche c-Si(p) ce qui diminuer la recombinaison.

Une augmentation du rendement de 22 % pour la cellule 01 à 63.64 % pour la structure cellule 02 pour une valeur optimale de Wi égale à 1 nm.



Figure III.6. Variation du Vco, Jsc, FF et n pour différents valeurs de Wi

III.5.3. Structure cellule3

a. Influence d'épaisseur de la couche arrière a-Si (p+) avec l'existence de couche intrinsèque

On ajoute au structure cellulle2 une couche arrière a-Si:H(p+) derrière la couche c-Si(p). Pour les différents paramètres optimisés précédemment :

 $\phi_B=5.3~eV$, $\phi_F\!=4.5~eV,\,N_a=10^{17}~cm^{-3},\,N_d=10^{20}~cm^{-3}.$

D'après la figure III.6, On remarque une réduction des performances de la cellule avec l'augmentation de cette couche. Donc, il est préférable de choisir cette couche le plus faible possible.

Donc, Par comparaison à la structure Cellule 2, on, n'a pas d'intérêt de l'ajoute de cette couche.



Figure III.7. Variation du Vco, Jsc, FF et n pour différents valeurs de Wp+

III.6. Conclusion

D'après, les résultats obtenus par simulation, et pour avoir des bonnes performances de la cellule, on remarque qu'il faut choisir comme contact avant ou arrière, un métal de travail de sortie formant un contact ohmique avec le semiconducteur.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but de ce travail de mémoire est d'optimiser par simulation du dopage N_d de la couche émetteur a-Si:H(n) et dopage N_a de la couche absorbeur c-Si(p) ainsi que les contacts avant et arrière d'une cellule à hétérojonctions a-Si:H(n) / c-Si(p).

Pour améliorer les performances de cette cellule, nous avons effectué plusieurs simulations à l'aide du logiciel AFORS-HET en variant les paramètres suivants :

- Le travail de sortie du contact avant ϕ_F
- Le travail de sortie du contact arrière ϕ_B
- Le dopage N_d de la couche émetteur a-Si:H(n).
- Le dopage N_a de la couche absorbeur c-Si (p).
- L'épaisseur Wi de la couche tampon a-Si:H(i).
- L'épaisseur de la couche arrière a-Si (p+) avec l'existence de la couche intrinsèque.

Selon nos résultats de simulation :

• La meilleure structure est celle de structure Cell 02 (a-si: H(n) / a-si: H(i) / c-si(p)) donnant un rendement maximal de 63.64 %, comparativement à la cellule de structure Cell 01 ayant un rendement de 22 %. Donc, Le rendement est amélioré après l'insertion la couche tampon en a-Si:H(i) entre la couche a-Si:H(n) et la couche c-Si(p).

•Pour le contact avant, et pour réaliser un contact ohmique, il est préférable de choisir un métal de travail de sortie inférieur ou égale à celui du semiconducteur (couche émetteur) en a-Si:H (n) de $\phi_F = 4.5$ eV comme (As, Zn) pour avoir des meilleures performances.

•Aussi pour le contact arrière, et pour former un contact ohmique, on choisir un métal dont le travail de sortie soit supérieur ou égale à celui du semiconducteur (couche absorbeur) en c-Si (p) de $\phi_B = 5.3$ eV comme (Ir, Pt) pour avoir des meilleures performances.

•À la fin, on peut dire que la structure de la cellule à hétérojonction avec couche tampon et avec les paramètres optimaux suivants : $N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_d = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, Wi = 1nm , ϕ_F avant = 4.5 eV et ϕ_B arrière = 5.3 eV donne un bon rendement de l'ordre de 63.43 %.

Comme perspectives, il serait meilleur de réaliser et de caractériser cette cellule expérimentalement avec ces paramètres optimaux

Annexe-A

Présentation de logiciel de simulation AFORS-HET

.

Annexe-A

Présentation de logiciel de simulation AFORS-HET

Le logiciel AFORS-HET (Automate **FOR S**imulation of **HET** erostructures) est un outil de simulation numérique à une dimension (1D), développé en Allemagne par le laboratoire Helmhlotz-Zentrum Berlin (HZB) [25]. Ce logiciel est particulièrement adapté aux simulations des cellules solaires à hétérojonctions à base de silicium [26].

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 (III-2) :

Première zone : Program control

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

Deuxième zone : External paramètres

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

Troisième zone : Measurements

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

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) :

- 1. Contact avant ;
- 2. Interface (Idéal-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.

Automat FOR Simulatio	n of HETero structures			HZE
AFORS - HET	external para Illumination On spectral spectral file: ASTMG173_AM times [-]: monochromatic	Side Front Back 115.in	Measurement list V I-V <u>Calc I-V</u> 1DM I-V2DNet QE PEL TR-PEL IntTR-PEL	*
Program control Exit Define Structure Settings Spectra Results Parameter Variation	Jemperature		VD-SPV WD-SPV ID-SPV TR-SPV Goodman	E
Parameter Fit / Optimization Set Go Results	device temperature [K] :	300	ADM C-V	
Calculation mode: Eq DC AC (transient)	<u>B</u> oundary zero po	otential at positive pole 👻	C-T QSSPC PMCC EDMR	
Initial values for calculation: Save Load Initialize Calculate	Boundary control DC: ext. Voltage [V] ext. Current [A/cm*	0,00000000E+	EBIC IQEan PMCCan Show only latest graph	

Interface graphique du logiciel de simulation 1D AFORS-HET



Définition de la structure et introduction des paramètres.

Automat FOR Simulation Press F1 for help	of HETero struc	tures external parameters	HZB	
concerning the active window.	Illumination On	Define Structure	I	
	spectral	Structure:	External Circuits:	
AFORS - HET	 spectral file: 	🔻 vecunny'eir	serial:	
v2.5	🛄 times	 Stan_2nO Front flatband contact (lextured, Ref, AbsZnO) 	resistance [Ohm*cm*2]:	
	monochromatic	no interface defects (Schottky S1e7) ▼ 5nm aSi(n) StandardEmitter-E1450meV-dbf	capacitance [pF/cm^2]:	
program control		no interface defects	parallel:	
Exit Define Structure		no interface defects (Schottky S1e7)	no interface defects (Schottky S1e7)	
Settings Spectra Results		Back flatband contact ▼ 11@vm.A/	numerical model:	Defect-properties:
Parameter Variation	Temperature	🔺 vacunuq/lair	MS-Schottky-Contact	
Parameter Fit / Optimization Set Go Results	device temperature		specific model settings	
Calculation	Boundary		Name : no interface defects (Schotky S1e7)	
mode: Eq. DC AC transient		4 III +		
		[note] dick on an item in the list to edit corresponding parameters cont	ac	
Initial values for calculation:	Boundary control	add Layer: conta	ict	
Initialize Colculate	ext. Voltage [V] ext. Current [A/	aptic fram electric optic back		
Initialization Eq finished	P	New Cell Sove Lood	CK Sove Lood	

Choix de l'interface entre deux couches.

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

utomat FOR Simulation	n of HETero structures			HZ
ress F1 for help	external parameters			
AFORS - HET v2.5 program control Exit Define Structure Settings Spectra Results	Illumination ♥ On ♥ spectral ♥ spectral file: ASTMG173_AM15.in	Side Front Back	Measurement list	
Parameter Variation Set Go Parameter Fit / Optimization Set Go Results	Jemperature device temperature [K] :	300	Goodman IMP ADM C-V	
Calculation node: Eg DC AC (transient)	Boundary zero potential a	t positive pole 💌	C-T QSSPC PMCC EDMR	
nitial values for calculation: Save Load Initialize Calculate	Boundary control DC:	0.00000000E+ 0.00000000E+	EBIC IQEan PMCCan	t graph

Calcul des conditions d'équilibre thermodynamique et d'illumination de la cellule

Bibliographie

- LA Lamont, History of Photovoltaics, in Comprehensive Renewable Energy, Elsevier, Volume 1 (2012) 31 - 45.
- [2] Wenham S. R., Green M. A. and Watt M. E, «Applied Photovoltaic», Bridge Printer, Sidney, (1994).2015
- [3] Alain Ricaud. Photopiles solaires, Presses polytechniques et universitaires ramandes, Lausanne, (1997).2017
- [4] H. Mathieu. «Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques», Dunod, Paris, 2009.2017
- [5] S. M. Sze, Physics of semiconductor Devices, second edition, Copyright. C.1981 by John, WILEYAND, SON, INC. 2017
- [6] MORNAY Thomas, « Les cellules photovoltaïques», Institution des Chartreux ,2004.
- [7] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta and E. D. Dunlop, Solar cell efficiency tables (version 45), Progress in Photovoltaics: Research and Applications 23 1–9 (2015).
- [8] W. Fuhs, K. Niemann, and J. Stuke.' Heterojunctions of amorphous silicon and silicon single crystals'. Bull. Am. Phys. Soc., 19 :345–349, (1974).
- [9] Efficiency Large Area (100.5 cm2) HITTM Cell '. Proc. of the 28th IEEE PSC,] H. Sakata, T. Nakai, T. Baba, M. Taguchi, S. Tsuge, K. Uchihashi, and Seiichi Kiyama.' 20.7% Highest
- [10] Trends in photovoltaic applications, (1992-2005). Technical report, IEA Photovoltaic Power Systems Programme, (September 2006).
- [11] Djicknoum DIOUF, « Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière », Thèse doctorat, Université paris 2010.
- [12] Frédéric Fossard «Spectroscopie infrarouge des fils et boîtes quantiques d'InAS/InALS/Inp (001) these présentée pour obtenir le grade de docteur en science.
- [13] Henry Mathieu, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques», Masson, 2ième édition, 1990.
- [14] Trends in photovoltaic applications 1992-2008, Technical report, IEA Photovoltaic Power Systems Programme, September 2009.
- [15] Keck et al., The Review of Scientific Instruments 25, 331 (1954).
- [16] M.F. Thorpe and D. Weaire, Phys. Rev. 26, 1581 (1971).
- [17] P.W. Anderson, Phys. Rev. 109, 1492 (1958).

- [18] Thibaut DESRUES, thèse de doctorat, 2009, développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière, Ecole Doctorale Matériaux de Lyon, Année 2009.
- [19] Moliton A, «In Optoélectronique moléculaire et polymère: des concepts aux composants», Paris, 2003.
- [20] DJERIOUAT Khadidja, « Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions : GaInP/GaAs», magister en microélectronique Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen, 2011
- [21] M. S. Shur, « GaN and related materials for High power applications, in Symposium Proceedings of Material Research Society, Symposium E, Fall »1997.
- [22] MECHERI Abdelssalem, « Mémoire fin d'étude simulation d'une cellule photovoltaïque a base d'hétérojonction», Université KASDI MERBAH, Ouargla, 2015.
- [23] Wikipedia « https://fr.wikipedia.org/wiki/Simulation_de_phenoomen».
- [24] H. Mathieu, H. Fanet ; Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Dunod, Paris (2009)
- [25] http://www.helmholtz-berlin.de/forschung/oe/ee/si-pv/projekte/asicsi/afors-het/ index_en.html
- [26] A. Froitzheim, R. Stangl, L. Elmer, M. Kriegel, W. Fuhs, AFORS-HET: A COMPUTERPROGRAM FOR THE SIMULATION OF HETEROJUNCTION SOLAR CELLS TO BE DISTRIBUTED FOR PUBLIC USE, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion May 11-18 2003 Osaka. Japan, p. 279-282