



**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

Faculté Des Sciences Exactes et de l'Informatique

Domaine des Sciences de la Matière

Département de physique

Projet de Fin d'Etudes

Pour obtenir le diplôme de Master en Physique

Option : Modélisation et Caractérisation des Matériaux

Présenté par :

SAWADOGO Wendepagnaguédé Roland

Sujet :

**ETUDE DE L'INFLUENCE DU DOPAGE SUR LE RENDEMENT D'UNE
CELLULE SOLAIRE DE TYPE HIT A BASE DE SILICIUM
AMORPHE/SILICIUM CRISTALLIN.**

Soutenue le : 22/05/2017

Devant le jury composé de :

P ^r	SENOUCI Khaled	Professeur	Université de Mostaganem	Président
Mr	BEGHDAD Mohammed	MCA	Université de Mostaganem	Examineur
M ^{me}	RAHAL Wassila Leïla	MCB	Université de Mostaganem	Encadreur

Année Universitaire: 2016/2017

Dédicace

Je dédie ce travail à ma mère, à tous mes enseignants qui m'ont tenu la main durant tout ce temps passé à l'école de la vie et à celles et ceux qui ont contribué d'une façon ou d'une autre à ma formation.

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à mon encadreur, en la personne de Madame RAHAL Wassila Leïla. Je tiens ici à vous exprimer toute ma reconnaissance pour votre disponibilité, votre motivation, votre sens de l'organisation du travail tout en le simplifiant, votre intérêt porté sur ma modeste personne,... Dans tous les cas, je n'y serais pas arrivé sans votre soutien. Je vous souhaite une longue et brillante carrière.

Je pense aussi à ma mère chérie qui, en plus de m'avoir porté douloureusement dans son ventre, me porte toujours dans son cœur. Malgré ces kilomètres qui nous ont parfois séparés, tu es restée éveillée pour que mon séjour se passe bien. Tu m'aimes et je suis sensible à cet amour éternel. Tu m'as appris à compter sur moi-même quelle que soit la situation. J'en suis fier.

A mes chers compatriotes qui m'ont accompagné, je vous adresse un salut patriotique. Vous avez su transmettre les valeurs de notre cher Burkina Faso au-delà de ses frontières. Je pense particulièrement à mon cher ami Jaché KIENOU qui m'a suivi dans presque tous mes mouvements ; nous avons été pris dans des labyrinthes et en sommes sortis braves. Même si aujourd'hui, nous ne partageons plus les mêmes passions, cette aventure ne saurait être réduite au néant. Je te souhaite le meilleur.

A la communauté de Mostaganem, un grand remerciement. J'y ai grandi humainement, elle m'a formé, m'a poussé dans le souffle de la vraie vie. La vie pleine de surprise, de hauts et de bas. J'avance.

A Bernard de Monvallier, toi qui a su me transmettre la volonté d'aller à la découverte de l'autre afin de briser nos barrières. J'en ai tiré de bonnes leçons. Longue vie à toi et à nos projets réalisés (Marchons ensemble). Je te suis reconnaissant.

A un ami avec qui j'ai partagé des moments formidables, très souvent en famille. Aujourd'hui, ta famille, je la porte et je crois que je tiens dans les rangs. Tu m'as ouvert les portes de ta maison. Tu as traversé mon cœur et as « osé » visiter mon cher pays. Je te suis infiniment reconnaissant. A notre bonne collaboration. Tu t'appelles tout simplement Mustapha OUANDJLI.

Je remercie chaleureusement Professeur SENOUCI Khaled et Monsieur BEGHADAD Mohammed de m'avoir honoré en acceptant de participer à mon Jury.

Si je devrais citer individuellement chaque personne qui compte dans ma vie, mille pages n'y suffiront pas. C'est pourquoi, je voudrais remercier tous mes enseignants. La Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique (université de Mostaganem) restera meilleure.

Je vous remercie individuellement !

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	8
I. GENERALITES SUR LES CELLULES SOLAIRES	10
I.1. Introduction	10
I.2. Effet photovoltaïque (PV)	10
I.3. Le silicium cristallin.....	12
I.4. Le silicium amorphe hydrogéné	14
I.5. Dépôt de couche mince par la méthode PECVD	15
I.6. Principe de fonctionnement d'une jonction pn	16
I.6.1. La densité de charge	17
I.6.2. Le champ électrique interne	17
I.6.3. La barrière de potentiel	17
I.7. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	19
I.8. Types de cellules Photovoltaïques	20
I.8.1. Conditions de Test Standards (STC)	22
I.8.2. Des cellules émergentes	23
I.9. Conclusion.....	23
II. ETUDE DE LA CELLULE HIT	25
II.1. Introduction	25
II.2. Contexte.....	25
II.3. Evolution de la performance de la cellule HIT	26
II.4. Modèle d'Anderson	29
II.5. Caractéristique électrique de la HIT :	31
II.5.1. Relation idéale entre le courant et la tension	31
II.5.2. Relation réelle entre le courant et la tension.....	33
II.6. Rendement de conversion	34
II.7. Influence de la température sur le rendement de la cellule	35
II.8. Composition de la cellule HIT en face avant	35
II.8.1. La couche antireflet TCO	35
II.8.2. Le Silicium amorphe hydrogéné de type p (a-Si:H (p)) ou l'émetteur	36
II.8.3. Le Silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (a-Si:H (i)) ou la couche tampon	36
II.8.4. Le Silicium cristallin (C-Si).....	37
II.8.5. Le Back Surface Field (BSF)	37
II.8.6. Le métal d'aluminium	37

II.9.	Modèle de Simulation	37
II.9.1	La partie électrique :	38
II.9.2.	La partie optique.....	38
III.9.3.	Calcul des états localisés continus dans le gap	38
II.10.	Equations à résoudre	39
II.10.1.	Equation de Poisson	39
II.10.2	Equations de continuité	40
II.11.	Conclusion.....	40
III.	PARTIE SIMULATION : RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	42
III.1.	Introduction.....	42
III.2.	Présentation de l'interface Cygwin et du logiciel ASDMP.....	42
III.2.	Principaux paramètres caractéristiques de la cellule HIT	43
III.3.	Rappel de quelques définitions.....	45
III.3.1.	Le courant de court-circuit I_{cc} (eventuellement J_{sc})	45
III.3.2.	La tension à circuit-ouvert V_{co}	45
III.3.3.	La puissance maximale P_m	45
III.3.4.	Le facteur de forme FF	45
III.3.5.	Le rendement η (noté EFF dans notre cas).....	45
III.3.6.	La puissance crête W_p	46
III.4.	Le dopage	46
III.4.1	Dopage de type N	46
III.4.2.	Dopage de type P	46
III.5.	Résultats pratiques	47
III.5.	Interprétation des résultats	50
III.5.	Conclusion	53
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	55
	BIBLIOGRAPHIE.....	57
	Resumé.....	58

Liste de figures

pages

Commenté [C1]: Liste de fig après le sommaire.

Figure 1.1 : Schéma d'un semi-conducteur simplifié montrant le processus d'éjection d'un électron.....	11
Figure 1. 2 : Gap direct (gauche) et Gap indirect (droite).....	11
Figure 1.3 : Procédé de fabrication du silicium Cristallin.....	13
Figure 1.4: silicium amorphe hydrogéné.....	14
Figure 1.5: principe PECVD.....	15
Figure 1.6: Mise en évidence de la zone de charge d'espace.....	18
Figure 1.7: représentations de la barrière de potentielle, de la densité de charge, du champ électrique.....	19
Figure 1.8: Collecte des électrons dans la cellule PV.....	20
Figure 1.9 : Rendement de différentes cellules solaires en fonction des années.....	21
Figure 1.10 coefficient Air Mass.....	22
Figure 1.11 : Combinaison de cinq éléments chimiques pour la conception de la cellule Pérovskite.....	23
Figure 2.1 : Evolution du rendement de la cellule HIT en fonction des années, les différentes R&D sont mises en évidence.....	26
Figure 2.2: Première cellule HIT et l'influence l'épaisseur de la couche a-Si:H (p) sur différents paramètres.....	27
Figure 2.3: Evolution de la cellule HIT par insertion de la couche a-Si:H (i).....	28
Figure 2.4 : La texturation et la mise en évidence de la BSF (a-Si:H (n)).....	29
Figure 2.5 : Diagramme de bande à interface a-Si:H (p)/C-Si (n).....	30
Figure 2.6 : Caractéristiques densité de courant en fonction de la tension d'une cellule PV dans l'obscurité et sous illumination.....	32
Figure 2.7 : circuit équivalent à une cellule (Avec R_l la résistance de l'appareil).....	34
Figure 2.8 : représentation schématique de la cellule HIT en face avant.....	35
Figure 2.9 : Distribution des états localisés dans le gap.....	38
Figure 3.1 : Interface de Cygwin présentant quelques données.....	43
Figure 3.2. a) Dopage de type N.....	46
Figure 3.2. b) Dopage de type P.....	46

Liste des graphes

Graphe 3.1 : Densité de courant en fonction de N_A	48
Graphe 3.2 : Tension de circuit ouvert en fonction de N_A	48
Graphe 3.3 : Facteur de forme en fonction de N_A	49
Graphe 3.4 : Rendement en fonction de N_A	49
Graphe 3.5 : Taux de recombinaisons en fonction de la position dans le dispositif pour deux valeurs du dopage de l'émetteur.....	50
Graphe 3.6 Diagrammes de bandes pour les valeurs extrema de N_A	51
Graphe 3.7: Champ électrique en fonction de la position pour les valeurs extrema de N_A	52

Liste des Tableaux

Tableau 3.1: paramètres caractéristiques de la HIT étudiée.....	44
Tableau 3.2 : Résultats de la simulation.....	47

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Impossible de les mettre en œuvre dans tous les domaines, trop chères, trop compliquées, insuffisamment efficaces... Bien longtemps, les énergies renouvelables n'ont pas été prises au sérieux. Mais depuis ces derniers mois voire ces récentes années, la situation a radicalement changé. Solaire en tête, les énergies propres s'implantent partout dans le monde, et les investissements se multiplient.

Ce n'est qu'un symbole diront les sceptiques, mais il vient s'ajouter à une liste non négligeable. En 2015, l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) indique que la capacité mondiale de production d'électricité à partir de sources renouvelables a dépassé pour la première fois celle du charbon [1]. Rien d'étonnant, les énergies classiques polluent énormément et le réchauffement climatique en est une conséquence évidente. Ce qui fait qu'un nombre croissant d'acteurs -Etats, administrations, entreprises, particuliers- se tournent vers ces énergies sans « conséquence néfastes ». Les chiffres sont sans équivoques, ils sont tout simplement rassurants. En 2015, 500 000 panneaux photovoltaïques ont été installés chaque jour sur la planète [1] ! Les experts préoyaient une croissance rapide, la réalité a dépassé leurs estimations de 13%. Grâce particulièrement à un quatuor de pays sincèrement dynamiques : la Chine, l'Inde, les Etats-Unis et le Mexique.

L'intérêt croissant pour le développement des énergies renouvelables est motivé par plusieurs constats : le changement climatique, l'augmentation de la demande de l'énergie, la limitation des réserves de combustibles fossiles, le faible rendement global énergétique et la dépendance énergétique en particulier des pays occidentaux [2].

Se basant sur les chiffres, l'emplacement géographique, et la croissance rapide concernant l'énergie solaire, nous avons voulu axer notre étude sur elle. Un point a particulièrement attiré notre attention : le rendement des cellules photovoltaïques de nature HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer).

Le but de notre recherche est d'étudier l'influence du dopage de l'émetteur sur le rendement de la cellule HIT en utilisant le logiciel de simulation ASDMP (Amorphous. Semiconductor Device Modelling Program).

Commenté [C2]: Bibliographie ordonnée

Notre travail sera structuré suivant trois chapitres :

- Le premier chapitre posera les bases théoriques qui aideront à bien comprendre les phénomènes abordés dans ce présent thème de recherche.
- Le deuxième chapitre entrera dans le vif du sujet : étude de tous les éléments qui concourent à la compréhension de la cellule HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer).
- Le dernier chapitre résumera l'essentiel de notre recherche qui consiste à étudier l'effet du dopage de l'émetteur sur les paramètres photovoltaïques (Densité de courant de court-circuit J_{sc} , la tension en circuit-ouvert V_{oc} , le facteur de forme FF et le rendement η). A partir des graphes tracés, nous interpréterons les résultats de simulation obtenus.

Nous clôturerons ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives dans le but de l'amélioration de ce travail.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES
CELLULES SOLAIRES

I. GENERALITES SUR LES CELLULES SOLAIRES

I.1. Introduction

Ce premier chapitre pose les bases théoriques qui aident à bien comprendre les phénomènes abordés dans ce présent thème de recherche. On le commence en abordant l'effet photovoltaïque qui est à l'origine de l'exploitation de l'énergie photovoltaïque. Dans un deuxième temps, l'élaboration du silicium cristallin est expliquée étape par étape car il semble évident qu'il constitue un élément capital dans la filière photovoltaïque. Ensuite, non seulement le silicium amorphe hydrogéné est abordé mais aussi l'une des méthodes (PECVD) qui permet le dépôt des couches minces est présentée. Les jonctions pn, incontournables dans la fabrication des cellules PV, sont décrites avec des paramètres que sont la densité de charges, le champ électrique et la barrière de potentiel. Enfin, le fonctionnement d'une cellule PV est expliqué ; puis le chapitre s'achève par une vue d'ensemble sur les différents types de cellules photovoltaïques (PV) en mettant en évidence leurs rendements dans les Conditions de Test Standard (STC).

I.2. Effet photovoltaïque (PV)

Le phénomène physique qui est à la base de la conception des cellules solaires est l'effet photovoltaïque. C'est tout simplement la conversion ou la transformation directe du rayonnement solaire en énergie électrique de forme continue [3,4]. En effet, le rayonnement solaire est une onde électromagnétique constituée de grains de lumière appelés photons [5]. Ces photons lorsqu'ils interagissent avec un matériau, transfèrent entièrement leur énergie à ses électrons qui sont ainsi éjectés.

Les matériaux sont connus, jusqu'à nos jours, sous trois formes : les métaux, les semi-conducteurs et les isolants. Seuls les semi-conducteurs sont favorables à une éventuelle application photovoltaïque. Un semi-conducteur est représenté énergétiquement par trois parties (figure 1.1) qui sont la Bande de Valence (BV), le Gap d'énergie de largeur E_g et la Bande de Conduction (BC). Le rayonnement solaire de longueur d'onde λ cède son énergie aux électrons liés et situés au niveau de la BV. Cette énergie leur permet de se détacher et de rejoindre la BC.

Pour que ce processus puisse se réaliser, il faut que l'énergie du gap, direct ou indirect, soit inférieure ou égale à celle du rayonnement incident. Pour le cas du silicium, matériau le plus utilisé aujourd'hui dans la filière PV, l'énergie du Gap indirect est de 1,12 eV et celle du Gap direct vaut 3,4 eV [6]. Ce qui correspond à des longueurs d'onde incidentes de 1107 et de 365 nanomètre (nm) respectivement. Le silicium à Gap indirect est donc adéquat pour le rayonnement visible du soleil dont λ est comprise entre 400 et 800 nm.

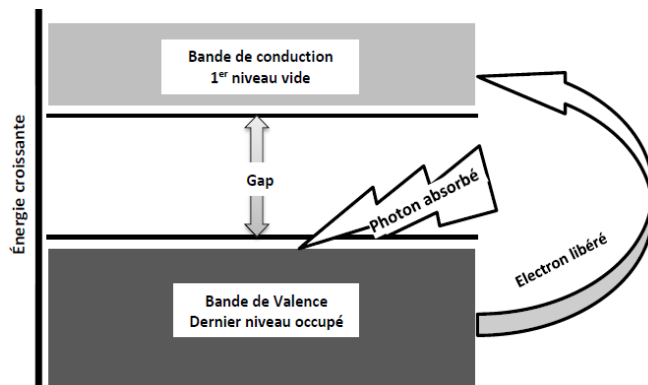


Figure 1.1 : Schéma d'un semi-conducteur simplifié montrant le processus d'éjection d'un électron.

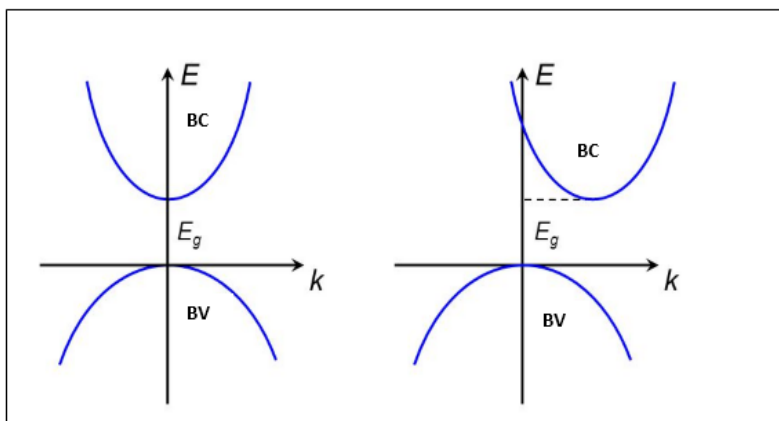


Figure1. 2 : Gap direct (gauche) et Gap indirect (droite).

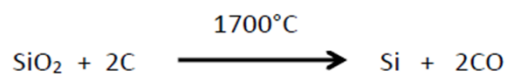
Différents matériaux servent à la conception des cellules PV. Parmi lesquels le silicium sous ses différentes formes. Dans ce qui suit, nous présenterons le silicium cristallin avec son processus d'élaboration.

I.3. Le silicium cristallin

Le silicium est un élément chimique inscrit dans le tableau périodique. C'est un métalloïde de symbole Si. On lui attribue une structure tétraédrique en cristallographie [7].

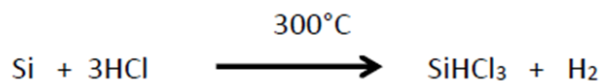
De par ses propriétés favorables de semi-conducteur, le silicium est le plus utilisé dans l'électronique et dans la microélectronique. Il est choisi pour la fabrication de cellules photovoltaïques. Ce choix s'explique par le fait qu'il est abondant vu qu'il s'obtient en grande partie à partir du silicate. Ce dernier représente environ 30% de la croûte terrestre soit le deuxième plus important élément après l'oxygène. Néanmoins, le silicium n'est pas recommandé par exemple en optoélectronique ou en électronique rapide à cause de son gap indirect et de la mobilité réduite de ses porteurs de charges.

Le processus de sa fabrication est long et peut être résumé en quatre parties majeures [8]. Pour commencer, de la silice (SiO_2) est réduite par le carbone (C) pour obtenir du silicium métallurgique (MG-Si) contenant environ 99% de silicium à la température de 1700 degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$).



Équation de la réaction

Le MG-Si subit une seconde réaction qui s'effectue grâce à l'acide chlorhydrique (HCl). Le produit obtenu est du trichlorosilane (SiHCl_3).



Équation de la réaction

Le trichlorosilane est à son tour purifié par distillation et réduit par l'hydrogène (H_2) entre 1000 et 1100 $^{\circ}\text{C}$: le silicium polycristallin est obtenu.

Le processus est poursuivi à la recherche de la perfection. Une des méthodes la plus utilisée en industrie (80%) pour la fabrication du silicium monocristallin (silicium CZ) est celle nommée « méthode Czochralski ». Elle nécessite quatre (04) étapes [9]. En effet, le silicium polycristallin obtenu est fondu (1450°C) dans un creuset en rotation. Ensuite, un germe y est plongé pour permettre d'avoir la structure monocristalline souhaitée. La troisième et la dernière étape consistent à tourner ce germe dans le sens opposé à celui du creuset tout en le retirant progressivement et lentement (0,4 à 3 millimètres par minute). Il est évident que le monocristal obtenu a une forme cylindrique. Par la suite, d'autres transformations de ce monocristal pourraient se faire en fonction des besoins.

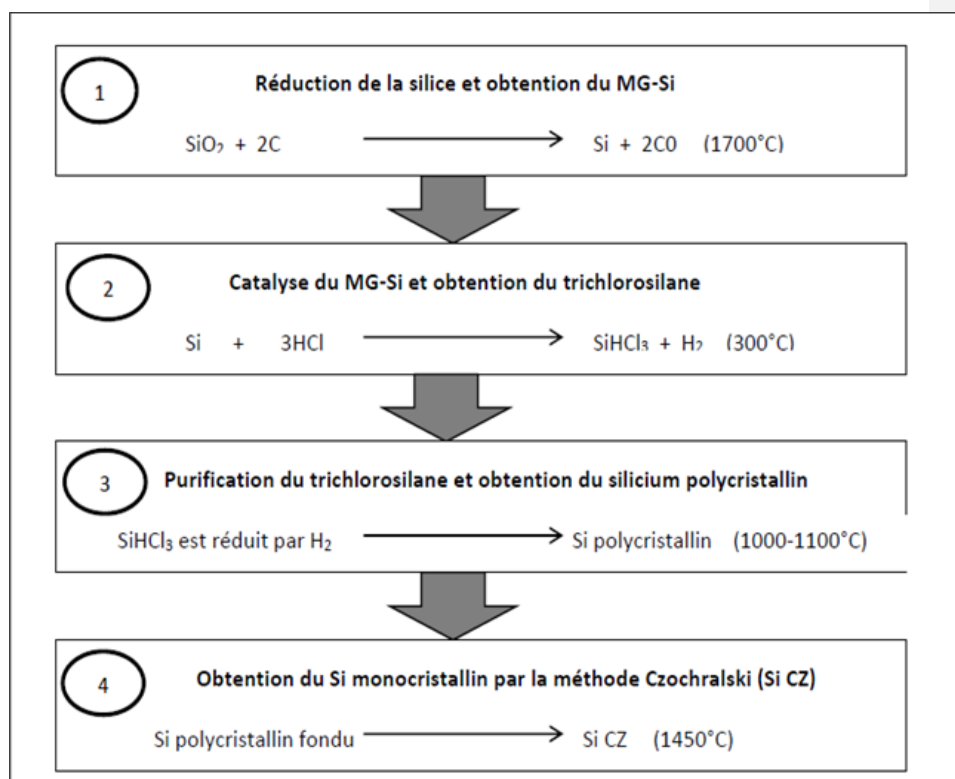


Figure 1.3 : Procédé de fabrication du silicium cristallin

Un des matériaux qui rentre dans la réalisation de la cellule HIT est le silicium amorphe hydrogéné (noté par a-Si:H). Voici les détails le concernant.

I.4. Le silicium amorphe hydrogéné

C'est du silicium amorphe (type verre) comportant des atomes d'hydrogène. Les scientifiques lui attribuent la notation a-Si:H. c'est évident que le silicium amorphe ne possède aucune périodicité cristalline, rendant ainsi le matériau inutilisable en électronique puisqu'il ne peut pas être dopé. Les atomes de silicium le constituant ne sont pas tous liés entre eux.

Il existe des liaisons libres appelées liaisons pendantes. C'est à partir de là qu'interviennent les atomes d'hydrogène qui contribuent à passiver les liaisons pendantes et à permettre le dopage du matériau. Tout l'intérêt du a-Si:H repose sur sa capacité à absorber le maximum du rayonnement solaire. À titre d'exemple, une épaisseur de $1\mu\text{m}$ suffit pour capter tout le rayonnement solaire [8]. Il y a aussi une possibilité de le superposer avec d'autres couches de matériaux différents.

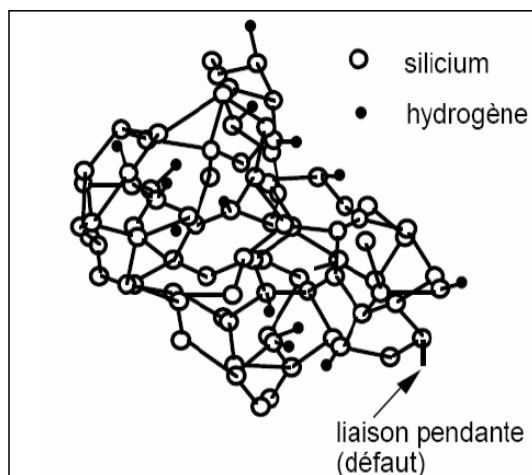


Figure 1.4: silicium amorphe hydrogéné

La croissance des couches dans un dispositif photovoltaïque se réalise en utilisant un certain nombre de méthodes. La PECVD est une méthode intéressante et très largement utilisée pour le dépôt des couches minces de silicium.

I.5. Dépôt de couche mince par la méthode PECVD

La PECVD signifie en anglais Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition ou dépôt chimique en phase vapeur par plasma. Elle consiste à déposer un matériau sur une surface (substrat) exposée à une vapeur réactive qui est le plasma dans ce cas [9].

Un champ électrique est appliqué à un gaz confiné dans une enceinte. Les électrons accélérés par ce champ entrent en collision avec les molécules du gaz afin de les ioniser, de les exciter et de les décomposer. Un plasma est alors créé. Deux processus entrent en ligne de compte : un processus homogène et un autre hétérogène.

Le processus homogène concerne les réactions en volume qui dépendent de la pression, de la puissance électrique, du mélange gazeux. Les espèces créées en volume dépendent de ces paramètres et sont par la suite dirigées vers la surface.

Le processus hétérogène concerne l'adsorption ou la formation des espèces à la surface et la réaction sur la même surface. Cela dépend des espèces incidentes, de la température, et aussi du bombardement ionique.

Il est impérativement recommandé de connaître ou de contrôler tous les paramètres externes et internes qui entrent en compte pour la formation des couches minces dans le seul but de maîtriser les propriétés des matériaux.

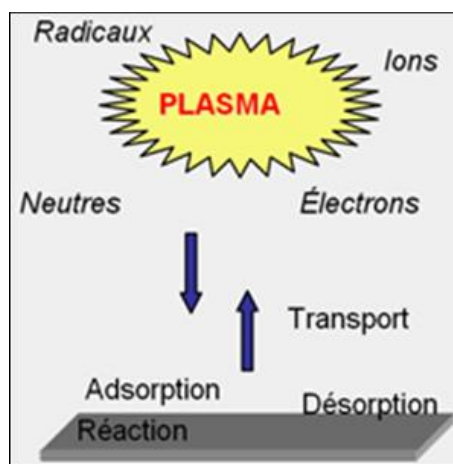


Figure 1.5: principe PECVD

Les jonctions PN sont à la base des cellules photovoltaïques. Leur principe de fonctionnement peut être décrit comme suit.

I.6. Principe de fonctionnement d'une jonction pn

L'homo-jonction est définie comme étant la mise en contact de deux zones d'un même semi-conducteur l'une dopée p et l'autre n [10]. Naturellement, il y a apparition d'un gradient de concentration de charges vu que les électrons sont majoritaires dans la zone n et minoritaires dans la zone p. Ils ont tendance à migrer vers la zone p pour créer l'équilibre. Et c'est pareil pour les trous qui se trouvent majoritairement dans la zone p. Une migration en sens inverse des porteurs de charges s'établit: c'est le phénomène de diffusion.

Contrairement au résultat attendu (équilibre total), cette diffusion est freinée par l'apparition d'un champ électrique permanent créé par ces charges libres. Précisément, ce sont les charges libres situées à proximité du contact qui arrivent à migrer en se recombinant et laissant des accepteurs et des donneurs uniquement au voisinage de la jonction. Cet espace sans porteurs libres, dû à la recombinaison, est connu sous les termes de Zone de Charge d'Espace (ZCE) [10]. Toute cette description est vérifiée à l'équilibre thermodynamique.

Les caractéristiques d'une jonction peuvent être décrites par des paramètres tels que la densité de charges, le champ électrique, la largeur de la ZCE. Pour déterminer les caractéristiques d'une jonction, il faut connaître l'évolution de la densité des charges fixes dans la zone désertée. Cette dernière est trop complexe pour être résolue analytiquement. On utilise l'hypothèse de SCHOCKLEY en suivant un certain nombre de conditions :

- la densité des charges mobiles dans la ZCE est négligeable devant la densité des charges fixes. On admet qu'il n'y a pas de charges mobiles dans la ZCE. C'est l'hypothèse de la zone totalement désertée de porteurs majoritaires.
- la ZCE s'étend :
 - de $-x_p$ à 0 du côté "P"
 - de 0 à x_n du côté "N"
 - $W = x_p + x_n$: épaisseur de la ZCE
- à $x = -x_p$ le semi-conducteur passe brutalement de l'état neutre (tous les majoritaires présents) à l'état déserté (tous les majoritaires absents).

- à $x = x_n$ le semi-conducteur passe brutalement de l'état déserté (tous les majoritaires absents) à l'état neutre (tous les majoritaires présents).

I.6.1. La densité de charge

La densité de charge est donnée sur trois parties clés de l'intervalle définissant la ZCE. Ainsi :

$$\rho(x)=0 \quad \text{pour } x < -x_p \text{ et } x > x_n \quad (1.1)$$

$$\rho(x) = -e N_A \quad \text{pour } -x_p < x < 0 \quad (1.2)$$

$$\rho(x) = e N_D \quad \text{pour } 0 < x < x_n \quad (1.3)$$

I.6.2. Le champ électrique interne

Le champ électrique interne est déterminé sur deux côtés.

- Le champ électrique du côté "N" : ($0 < x < x_n$)

Équation de GAUSS : $dE_n(x)/dx = \rho(x)/\epsilon = e N_D/\epsilon$.

En intégrant et en tenant compte de la condition limite : $E_n(x_n)=0$, on trouve :

$$E_n = \frac{e N_D (x - x_n)}{\epsilon} \quad (1.4)$$

- Champ électrique du côté "P" : ($-x_p < x < 0$)

Équation de GAUSS : $dE_p(x)/dx = \rho(x)/\epsilon = -e N_A/\epsilon$.

En intégrant et en tenant compte de la condition limite : $E_p(-x_p) = 0$ on trouve :

$$E_p = \frac{-e N_A (x + x_p)}{\epsilon} \quad (1.5)$$

Ainsi, l'existence du champ électrique dans la ZCE (figure 1.6) laisse sous-entendre la présence d'une barrière de potentiel qui vaut 0,7 V dans les jonctions au silicium.

I.6.3. La barrière de potentiel

$$V_b = \frac{KT}{e} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \quad (1.6)$$

Où :

n_i : Densité intrinsèque de porteurs (cm^{-3})

K : Constante de Boltzmann (J.K^{-1})

e : Charge élémentaire $1,6 * 10^{-19}$ (C)

T : Température (K)

N_D : Densité d'impuretés de type donneur (cm^{-3})

N_A : Densité d'impuretés de type accepteur (cm^{-3})

A partir de cette formule, V_b varie linéairement avec T .

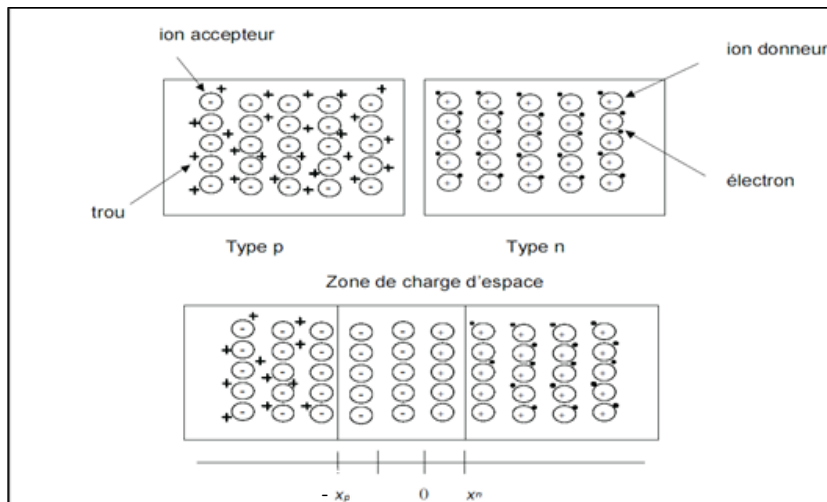


Figure 1.6: Mise en évidence de la zone de charge d'espace

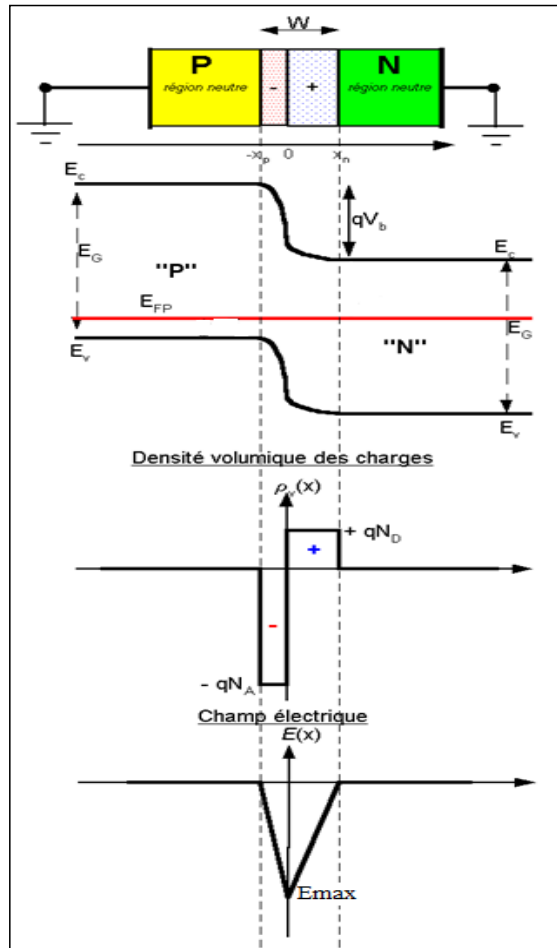


Figure 1.7: représentations de la barrière de potentielle, de la densité de charge, du champ électrique

I.7. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque absorbe le rayonnement solaire pour délivrer du courant continu. Elle convertit directement l'énergie lumineuse des photons en électricité à condition que l'énergie du gap soit inférieure ou égale à celle du rayonnement incident. La cellule PV est composée à la base de semi-conducteurs dopés (le dopage sera détaillé plus tard) « p » et « n ». Ces deux parties sont mises en contact : c'est la jonction qui est décrite ci-dessus.

La partie « p » présente un déficit d'électrons (ou un excès de trous) et à l'opposé la partie « n » un excès d'électrons. L'impact ou l'incidence des photons du rayonnement solaire sur la cellule provoque un arrachement des électrons qui se propagent dans toutes les directions. L'existence du champ électrique interne fait que les électrons sont orientés vers la zone dopée « n » et sont par la suite collectés pour un usage donné.

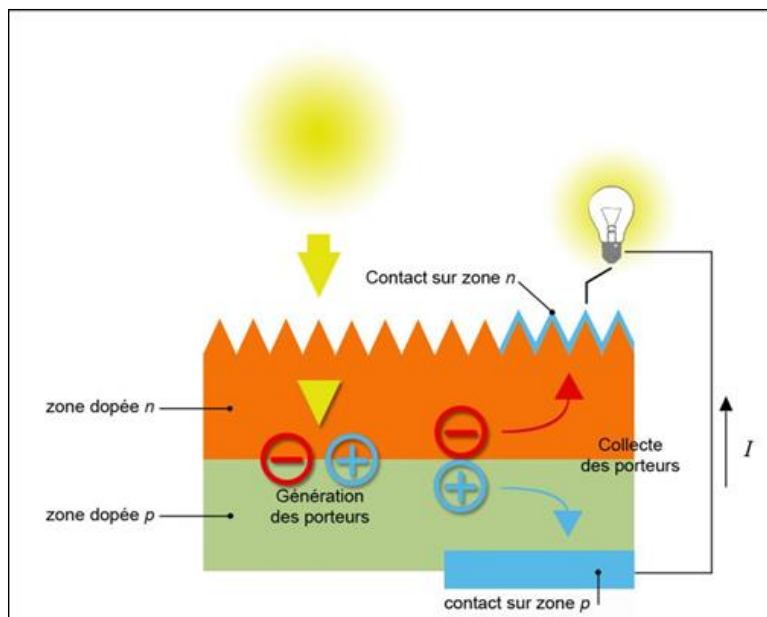


Figure 1.8: Collecte des électrons dans la cellule PV

On dénombre plusieurs types de cellule PV qui sont résumées dans la partie suivante.

I.8. Types de cellules Photovoltaïques

La National Renewable Energy Laboratory, NREL en abrégé, fournit un graphique (figure 1.9) qui résume les différentes technologies PV avec leurs rendements. C'est un graphique qui se met à jour et offre des informations concises dans les « Standard Test Conditions » c'est-à-dire à 25°C. Le niveau d'éclairement de la cellule est pris à 1000 W/m² avec un coefficient Air masse égale à 1,5.

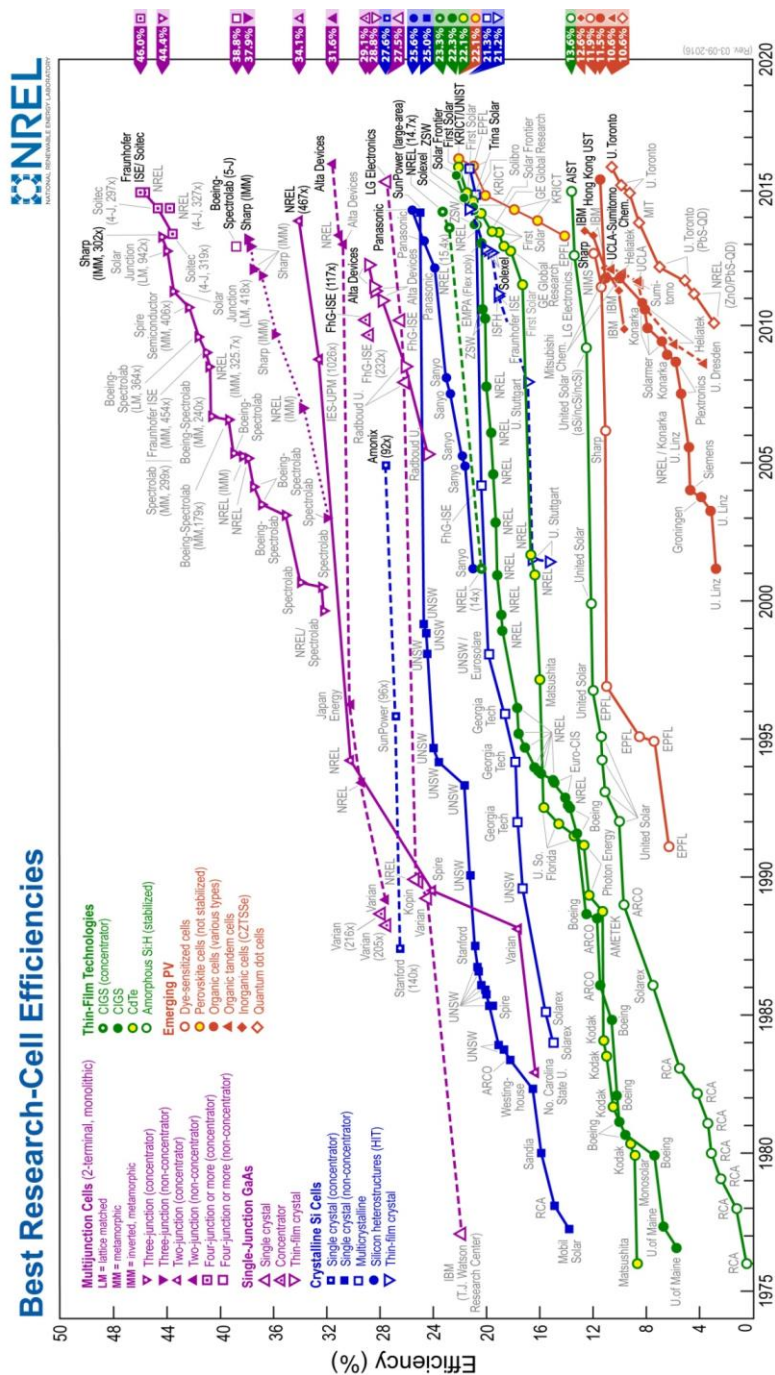


Figure 1.9 : Rendement de différentes cellules solaires en fonction des années [6]

D'après le graphique de la figure 1.9, les cellules HIT, objet de cette présente étude, sont représentées par des cercles pleins bleus et leur rendement a atteint 25,6% en 2015.

I.8.1. Conditions de Test Standards (STC)

Les « Standard Test Conditions » obéissent à des caractéristiques spécifiques de la communauté scientifique. En effet, le soleil émet une énergie radiative dans toutes les directions et est évaluée à 1367 W/m² au bord externe de l'atmosphère terrestre. Celle-ci absorbe et transmet seulement 1000 W/m² lorsque le soleil est au Zénith avec un ciel clair, à la surface de la mer prise comme référence (Altitude 0m). A ce niveau, le coefficient Air Masse vaut AM=1. En d'autres termes, le coefficient Air Masse évalue la masse atmosphérique traversée par le rayonnement solaire. C'est un paramètre que varie en fonction de l'évolution du soleil, de l'altitude, de la pollution.

Le nombre de masse (AM) est défini par l'équation:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (1.7)$$

Où θ est l'angle que fait le soleil avec son zénith

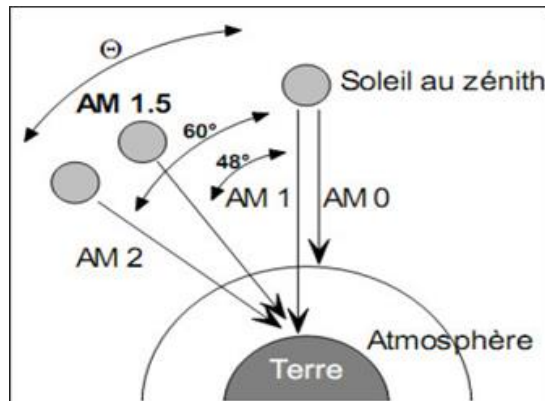


Figure 1.10 coefficient Air Mass

I.8.2. Des cellules émergentes

Il convient de noter la présence de cellules émergentes comme les cellules organiques (11,1%). Pour les chercheurs, une des options pour améliorer le rendement et réduire le coût des cellules PV, est l'exploration de nouveaux matériaux. C'est ainsi que de nouvelles cellules PV, pouvant contenir au moins cinq éléments chimiques, ont vu le jour. C'est l'exemple ici des cellules Pérovskite (figure 1.11) non stabilisées, atteignant des rendements de 21,1% [11].

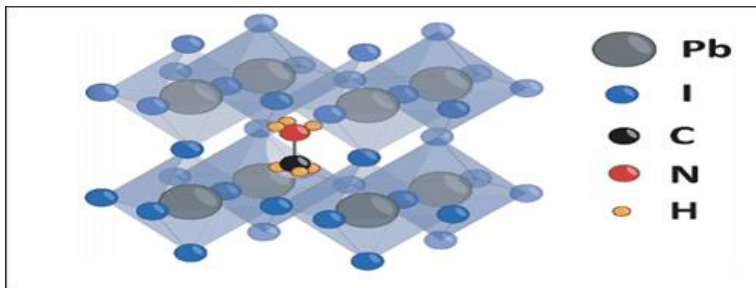


Figure 1.11 : Combinaison de cinq éléments chimiques pour la conception de la cellule Pérovskite [11]

I.9. Conclusion

Au terme de ce chapitre, nous avons compris l'essentiel qui nous permettra d'entamer le deuxième chapitre. L'étude élémentaire des jonctions pn introduit en quelque sorte celle des cellules HIT qui nous intéressent. La connaissance de leur performance (rendement) ouvre des perspectives intéressantes.

CHAPITRE II

ETUDE DE LA CELLULE HIT

II. ETUDE DE LA CELLULE HIT

II.1. Introduction

Ce deuxième chapitre entre dans le vif du sujet : étude de tous les éléments qui concourent à la compréhension de la cellule HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer).

Dans un premier temps, ce type de cellule est situé dans le contexte général qui retrace son histoire. Dans un deuxième temps, un accent est mis sur l'évolution de sa performance. Cela se base sur les améliorations qui ont été réalisées à partir de la cellule mère : les dépôts de quelques couches supplémentaires, la texturation en sont des exemples. Par la suite, l'un des modèles mathématiques qui décrit la HIT est expliqué : il s'agit en clair du modèle d'Anderson à partir duquel on obtient le diagramme de bande. La caractéristique courant-tension n'est pas en reste, c'est l'occasion de définir les quatre (04) paramètres essentiels qui définissent une cellule solaire : la tension de circuit ouvert (V_{oc}), le facteur de forme (FF), le courant de court-circuit (I_{sc}) et le rendement de conversion (η) qui fait l'objet de tout un paragraphe vu son importance. Ensuite, l'influence de la température sur la performance de la cellule est éclaircie. Interviennent, enfin, la composition de la cellule ainsi que le modèle de simulation.

II.2. Contexte

Comme vu dans le premier chapitre, une des catégories émergentes de cellule photovoltaïque qui mérite d'être étudiée est la cellule HIT. Elle fait l'objet, de ce mémoire. La première publication qui se réfère à ce type de cellules remonte à 1974 avec Walter Fuhs et ses collaborateurs de l'université Marburg en Allemagne. Une recherche qui a intéressé l'industrie Sanyo qui en a déposé un brevet. C'est un modèle qui met en priorité l'exploration des matériaux dans le seul but d'améliorer le rendement de la cellule ; 25,6% atteint en 2015 (voir chapitre 1).

D'après les recherches de Walter Fuhs et al. [13], il s'avère très vite que pour être dans la logique du principe de l'hétérojonction (une tension à circuit ouvert $V_{oc} > 0,7 \text{ V}$), il fallait ajouter entre l'émetteur (et aussi entre la BSF) et la couche de silicium cristallin, une couche intrinsèque de silicium amorphe hydrogéné a-Si:H d'une épaisseur d'environ 10 nm. Ceci

parce que la densité croît fortement avec le dopage et cela entraîne la croissance de la densité de défauts à l'interface de la jonction a-Si:H/C-Si. Les recombinaisons sont aussi affaiblies et la barrière de potentiel se voit diminuée.

II.3. Evolution de la performance de la cellule HIT

La cellule HIT a beaucoup évolué au cours des années. Elle connaît de plus en plus de succès. Des centres de recherches et de développement (R&D) de différents départements s'investissent de plus en plus. Ils jouent surtout sur le dopage des couches minces a-Si:H, sur la modification des épaisseurs, la nature du matériau (types n et p), etc.

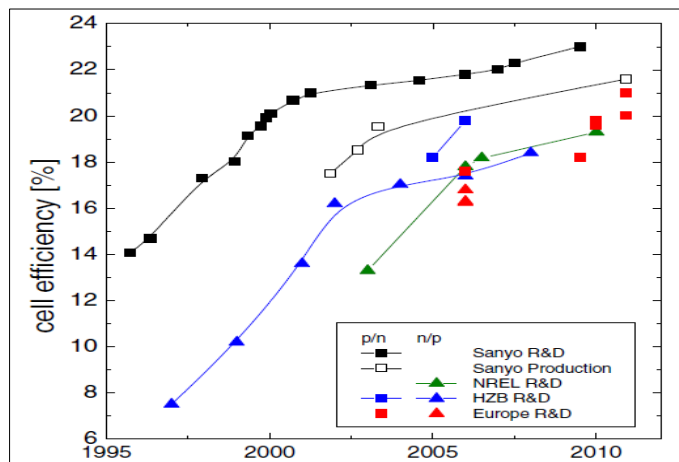


Figure 2.1 : Evolution du rendement de la cellule HIT en fonction des années, les différentes R&D sont mises en évidence.

Tout a commencé par la jonction de quelques couches minces, tel que représentée dans la figure 2.2. La cellule a montré son efficacité avec un rendement de 12,3%. Elle était composée d'une couche de silicium dopé « n » (n-C-Si), d'un film mince de silicium amorphe hydrogéné dopé « p » (p-a-Si:H), d'une couche antireflet (TCO) et évidemment d'un métal pour la collecte des porteurs de charges.

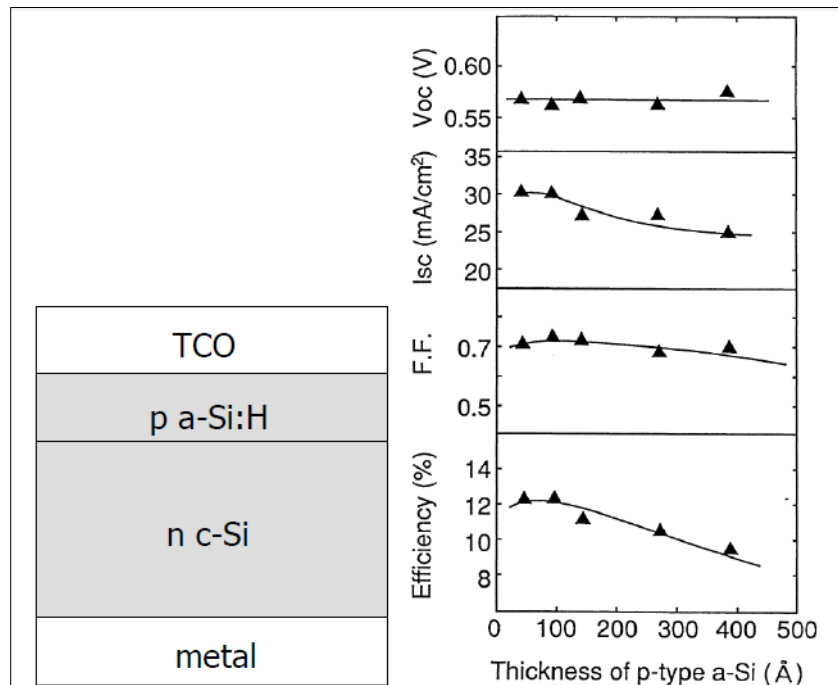


Figure 2.2: Première cellule HIT et l'influence l'épaisseur de la couche a-Si:H (p) sur différents paramètres [12]

D'après la figure 2.2, le rendement, le facteur de forme et la densité de courant décroissent avec l'augmentation de l'épaisseur de p a-Si:H. Par contre la tension Voc est plus ou moins stable. Il a fallu creuser pour perfectionner la cellule. Sanyo s'est lancé dans le défi.

L'introduction d'une couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (i a-Si:H) entre le p a-Si:H et le n-C-Si, a contribué à rehausser les résultats obtenus. Un rendement de 14,8% est atteint. Le rôle de i a-Si:H est de passiver les états d'interface sur la surface de la couche active n-C-Si.

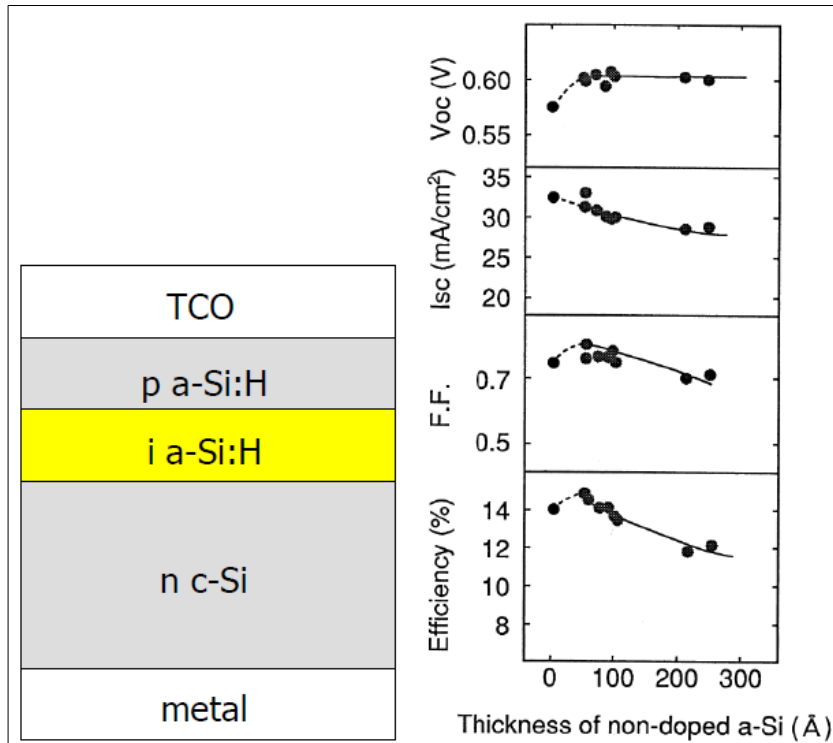


Figure 2.3: Evolution de la cellule HIT par insertion de la couche a-Si:H (i)

La figure 2.3 met en évidence l'effet de l'insertion de la couche tampon i-a-Si:H et du résultat que cela a produit. Une fois de plus l'augmentation de l'épaisseur de i-a-Si:H contribue à réduire le rendement, le facteur de forme ainsi que la densité du courant au niveau de la cellule. A l'opposé, le Voc augmente avant de se stabiliser.

Une autre avancée s'est opérée avec l'insertion des surfaces de texturation et de la base (BSF pour Back Surface Field). La texturation des surfaces aide à réduire la réflexion et par conséquent à faciliter l'absorption du rayonnement. Quant à la couche BSF, elle réduit les recombinaisons des porteurs de charges à l'arrière de la cellule. Ce qui a accru le rendement qui grimpe jusqu'à 18,1% ; un record jusque-là non réalisé.

La figure 2.4 montre la caractéristique courant-tension de la cellule après introduction de la texturation et de la couche n-a-Si:H qui représente le BSF.

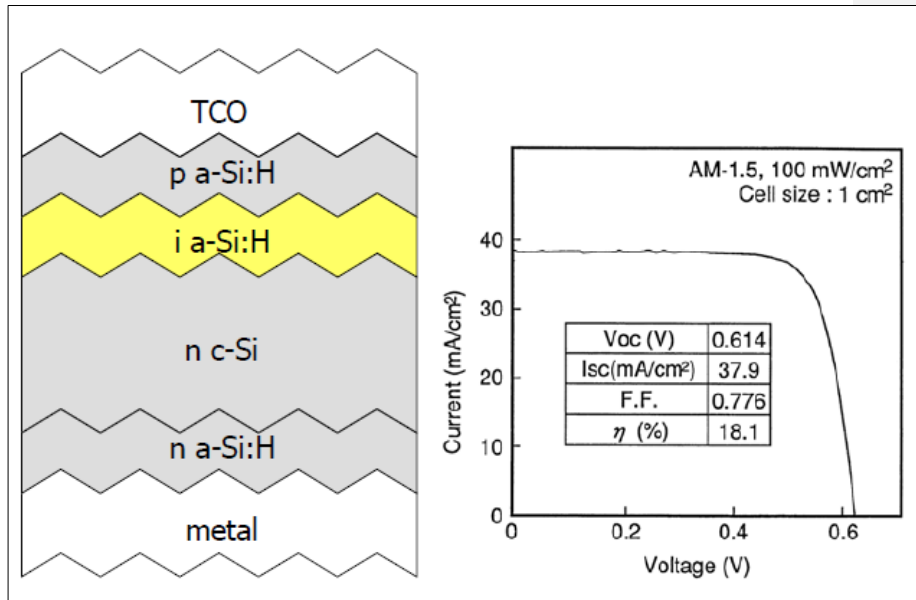


Figure 2.4 : La texturation et la mise en évidence de la BSF (a-Si:H (n))

Sanyo ne s'est pas arrêté à ce niveau. Les recherches de perfectionnement se poursuivent. Parmi lesquelles la symétrisation de la cellule et la double illumination qui ont vu le jour. Ce qui a permis d'atteindre 21,3% de rendement, et 22,3% en 2008. En mai 2009, en se basant sur l'optimisation des matériaux, Sanyo annonce une efficacité de 23%.

De nos jours, le rendement avoisine 25,6%. C'est une avancée scientifique phénoménale en si peu de temps.

II.4. Modèle d'Anderson

La compréhension des états d'interface entre les couches a-Si:H et C-Si permet de mieux appréhender le passage des porteurs de charges entre celles-ci. Le modèle d'Anderson ou la règle de l'affinité électronique permet de décrire cette hétérojonction.

Le dépôt du film a-Si:H sur la couche C-Si a pour conséquence de créer des désaccords dans les bandes de conduction et de valence. Cela est dû principalement à la différence de Gap des deux matériaux : 1,12 eV pour le C-Si et 1,75- 1,9 eV pour le a-Si:H à 300 K. Ce qui

provoque des discontinuités qui jouent un rôle non négligeable dans le transport des charges. Aussi bien les porteurs minoritaires et majoritaires sont concernés. Les porteurs minoritaires sont influencés par une barrière à l'interface causant ainsi leur accumulation ; ce qui provoque des recombinaisons.

Ces barrières, avec des hauteurs mises en évidence, favorisent autant les recombinaisons que les collectes des charges. Par conséquent, la mise en place d'une ingénierie des bandes est plus que nécessaires dans le but de contrôler ces processus [3].

Le modèle d'Anderson [9] ne prend pas en compte les effets d'interface. Il s'appuie sur l'hypothèse que le transport de courant se fait par recombinaison/génération dans la zone de déplétion ou bien par injection dans les régions quasi-neutres.

L'hypothèse majeure est que le niveau de Fermi ne varie pas tout au long de la zone de charge d'espace [1].

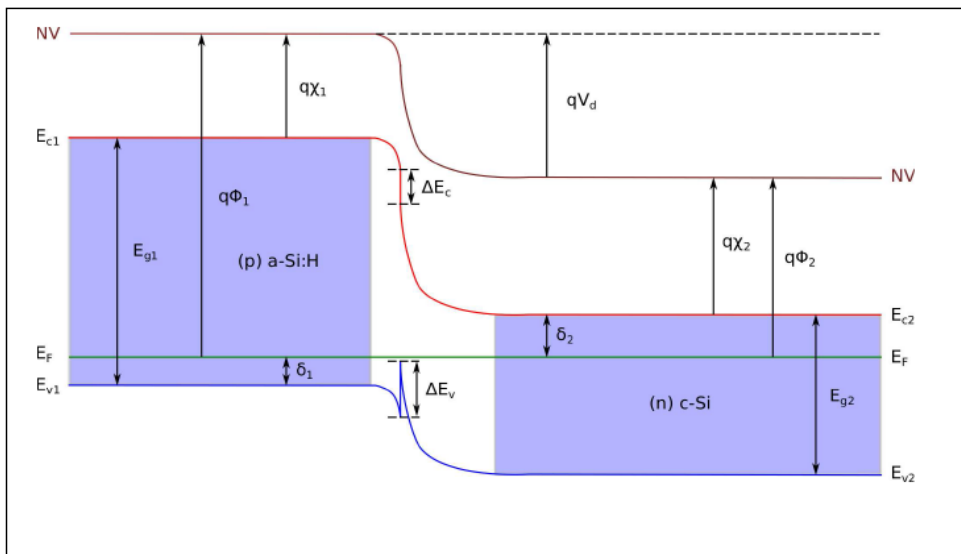


Figure 2.5 : Diagramme de bande à interface a-Si:H (p)/c-Si (n)

On peut déduire les équations suivantes:

$$E_{g1} - E_{g2} = \Delta E_c + \Delta E_v$$

$$\Delta E_c = q (\chi_2 - \chi_1) \quad (2.1)$$

$$\Delta E_v = E_{g1} - E_{g2} - q(\chi_2 - \chi_1) \quad (2.2)$$

$$q V_d = q(\phi_1 - \phi_2) = E_{g2} - \delta_{n2} - \delta_{p1} + \Delta E_v \quad (2.3)$$

Où

$$\delta_1 = E_F - E_{v1}$$

$$\delta_2 = E_{c2} - E_F = q(\phi_2 - \chi_2)$$

II.5. Caractéristique électrique de la HIT :

II.5.1. Relation idéale entre le courant et la tension

La relation liant le courant et la tension est obtenue à partir de la caractérisation d'une diode idéale. Ce qui s'accorde beaucoup plus avec l'homo-jonction.

A l'obscurité :

$$I_{obs} = I_s (e^{\frac{V}{V_t}} - 1) \quad (2.4)$$

Où :

I_{obs} : courant d'obscurité (A)

I_s : courant de saturation de la diode (A)

V : tension à travers la diode (V)

$V_t = kT/q$ (V)

k : constante de Boltzman (J/K)

T : température (K)

Ce qui permet de déduire le courant délivré sur une charge par la cellule PV éclairée :

$$I = I_{ph} - I_{obs} \quad (2.5)$$

Où :

I_{ph} : courant photo généré, proportionnel à l'intensité lumineuse I_{ph0} dans les STC.

$$I_{ph} = I_{ph0} * \frac{I_r}{I_{r0}} \quad (2.6)$$

Avec I_r l'intensité lumineuse éclairant la cellule et I_{r0} celle dans les STC.

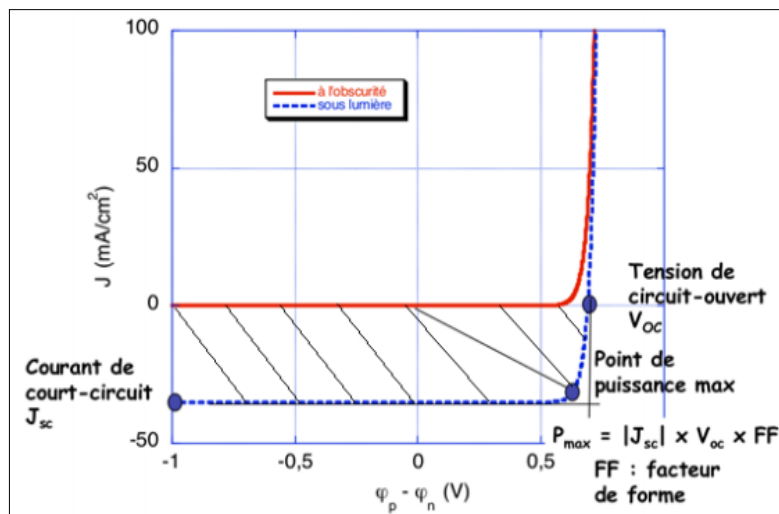


Figure 2.6 : Caractéristiques densité de courant en fonction de la tension d'une cellule PV dans l'obscurité et sous illumination

A partir de la figure 2.6, il est clair que la lumière déplace la courbe, du rouge au bleu. Ce qui est caractéristique d'un générateur de puissance. Le courant est décalé d'une valeur de I_{sc} ; le courant de court-circuit c'est-à-dire le courant délivré par la cellule lorsqu'elle est court-circuitée.

Un autre paramètre important est le V_{oc} qui représente la tension de circuit ouvert au moment où la cellule ne délivre aucun courant.

La partie hachurée est l'intégrale de la courbe **sous** lumière ou autrement la puissance délivrée.

Une puissance maximale peut aussi être définie :

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} \quad (2.7)$$

Remarque :

Lorsque $V=0$, $I_{sc}=I_{ph}$

Lorsque $I=0$, $V_{oc}=V$. En prenant I_{ph} très grand par rapport à I_s , cela entraîne :

$$V_{oc} = V_t * \ln (I_{ph} / I_s) \quad (2.8)$$

Où :

$$V_t = kT/q \text{ (V)}$$

Donc le V_{oc} croît avec le logarithme de I_{ph} et linéairement avec la température T .

Le facteur de forme est défini ainsi par :

$$FF = \frac{I_{max} * V_{max}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (2.9)$$

C'est un paramètre essentiel car il détermine la qualité de la cellule. Il indique la qualité de la jonction dans la cellule, ainsi que l'influence ou l'apport des résistances série R_s et parallèle R_{sh} qui interviennent dans la cellule.

Plus le FF tend vers 1, plus la qualité de la cellule est meilleure.

II.5.2. Relation réelle entre le courant et la tension

Le cas idéal de la diode qui a été décrit ci-dessus ne peut pas être valable dans le cas d'une hétérojonction ou plus précisément en ce qui concerne la cellule HIT. Un certain nombre de paramètres supplémentaires rentrent en compte pour donner une description presque réelle du comportement de la cellule.

Deux parasites entrent principalement en compte dans ce cadre. Ils sont modélisés par la résistance série R_s et de la résistance parallèle R_{sh} . Ces résistances sont dues à un certain nombre de phénomènes physiques intrinsèques à la cellule lors de l'élaboration de celle-ci.

La résistance série R_s est due au transport des porteurs de charges, à l'interconnexion, à la résistance en volume du semi-conducteur, aux contacts métalliques. Elle peut être calculée

juste à partir de la courbe caractéristique I-V en se basant sur le calcul de la dérivée de celle-ci aux alentours de V_{oc} [6]. Plus la R_s est faible plus la qualité de la cellule est meilleure.

La résistance parallèle est causée par les défauts liés à la jonction. Elle est due aussi au courant de fuite au niveau de la jonction. Elle influence la tension V_{oc} et peut être déterminée à partir de la courbe caractéristique I-V en se basant sur le calcul de la dérivée de celle-ci aux alentours de I_{sc} . Plus la résistance R_{sh} est élevée, plus la qualité de la cellule est meilleure.

En fin de compte, la formule complète s'écrit sous la forme :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V}{V_t}} - 1 \right) - \frac{(V + I R_s)}{R_{sh}} \quad (2.10)$$

Où en plus des paramètres précédemment définis ; R_s et R_{sh} représentent les résistances série et parallèle respectivement. Elles contribuent à diminuer la puissance de la cellule et par conséquent le facteur de forme.

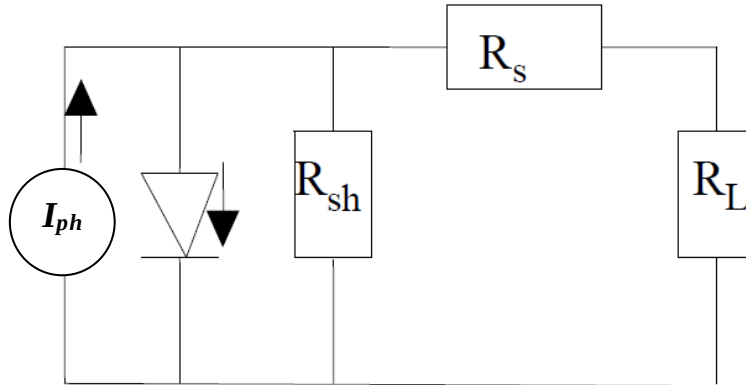


Figure 2.7 : circuit équivalent à une cellule (Avec R_L la résistance de l'appareil).

II.6. Rendement de conversion

Le rendement de conversion est le rapport de la puissance maximale (encore appelée puissance crête dans le cas des Standard Test Conditions) délivrée par la cellule et la puissance

du rayonnement solaire incident. Il permet de mieux comparer les cellules solaires voire les panneaux solaires.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{E \times S} \quad (2.11)$$

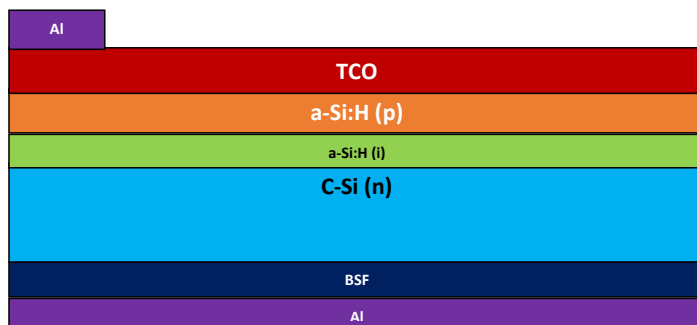
Où E (W/m^2) l'énergie incidente et S (m^2) la surface sur laquelle tombe le rayonnement.

II.7. Influence de la température sur le rendement de la cellule

La variation de la température affecte le rendement de la cellule PV. Une augmentation de celle-ci entraîne une dilatation du Gap ; ce qui accroît le courant de saturation. A l'inverse, une diminution de la température favorise l'absorption des grandes longueurs d'ondes ; provoquant l'augmentation du courant de court-circuit. Il a été montré qu'un meilleur rendement est atteint en maintenant la température la plus basse possible [7].

II.8. Composition de la cellule HIT en face avant

La cellule HIT est schématiquement représentée par la figure 2.8.



Commenté [C3]: Couche Al ajoutée

Figure 2.8 : représentation schématique de la cellule HIT en face avant.

Ses différentes parties sont décrites ci-dessous.

II.8.1. La couche antireflet TCO

La couche antireflet est la couche qui est en contact direct avec le rayon lumineux. TCO veut dire Transparent Conductive Oxide en anglais, soit l'oxyde transparent conducteur.

Cette couche est généralement réalisée à partir d'oxyde de zinc (ZnO), d'oxyde d'étain (SnO₂) ou comme dans notre étude, à base d'Oxyde d'Indium (InO) fortement dopé avec de l'étain (Sn) ; en abrégé ITO (Pour Indium Tin Oxide).

Le TCO est utilisée pour former un miroir diélectrique à la surface de la cellule. Pour comprendre son influence sur les propriétés optoélectroniques dans la cellule, il faut se baser sur son fort dopage. Ainsi, cette couche a un comportement électrique similaire à celui d'un métal avec un taux faible de transport de charges à mobilité réduite. Par conséquent, la jonction TCO/a-Si:H est similaire à une jonction métal/semi-conducteur. Le rôle du TCO est de contribuer à l'alignement des bandes dans les jonctions TCO/a-Si:H/C-Si et aussi de réguler le transport des porteurs de charges à travers ces jonctions. Cette couche est également utilisée comme couche anti-réfléchissante.

II.8.2. Le Silicium amorphe hydrogéné de type p (a-Si:H (p)) ou l'émetteur

Encore appelé émetteur, le Silicium amorphe hydrogéné de type p est l'objet principal de notre étude dans le dernier chapitre.

C'est une couche fine (quelques nanomètres) et très résistive qui contribue à réduire considérablement le coût du PV car elle consomme moins de matériaux et assure une économie thermique (faible température lors de sa fabrication ; environ 250°C par PECVD).

L'émetteur est connu pour sa forte absorption et aussi pour la rapidité de sa réalisation (environ 2 minutes). Son rôle principal rentre dans la formation de la jonction pn pour ainsi favoriser la collecte et le transport des charges.

II.8.3. Le Silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (a-Si:H (i)) ou la couche tampon

Le Silicium amorphe hydrogéné intrinsèque est déposé entre le Silicium amorphe hydrogéné de type p et le wafer de silicium cristallin (c-Si). Son rôle est de permettre la passivation à l'interface p-a-Si :H/c-Si et bien entendu de limiter aussi les recombinaisons au niveau de la même interface.

Le Silicium amorphe hydrogéné intrinsèque est connu sous le nom de couche tampon car il ne perturbe pas le champ électrique à l'interface. Il diminue considérablement la densité

des défauts au niveau de l'interface. Son épaisseur doit être contrôlée à cause de sa forte résistivité.

II.8.4. Le Silicium cristallin (C-Si)

Tout comme dans les homojonctions, le silicium cristallin joue le même rôle : générateur d'électrons et de trous suite à l'absorption de la lumière dans le matériau. Les électrons diffusent naturellement de côté « n » vers le côté « p » et donc dans notre cas du C-Si vers l'émetteur.

II.8.5. Le Back Surface Field (BSF)

Le BSF, comme son nom l'indique, se situe à l'arrière du silicium cristallin. Il a pour objectif de créer un champ électrique à l'arrière de la cellule afin de repousser les trous minoritaires de la couche cristalline vers l'émetteur, de réduire les recombinaisons à l'arrière du silicium cristallin, ainsi que d'améliorer la collecte des porteurs photogénérés.

II.8.6. Le métal d'aluminium

Le métal d'aluminium constitue les électrodes de contact (avant et arrière) et contribue à la collecte des charges photogénérés (électrons).

II.9. Modèle de Simulation

Les différents paramètres de notre étude ont été déterminés par le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modelling Program). Ce logiciel a été développé par le Professeur Parsathi Chatterjee. L'ASDMP a été conçu pour des dispositifs basés sur des homojonctions ou hétérojonctions de siliciums cristallin et amorphe. Il est à une dimension et simule le profil de génération ainsi que les mécanismes de transport. Il comprend deux parties.

II.9.1 La partie électrique :

Elle résout simultanément les équations de continuité des trous et des électrons ainsi que l'équation de Poisson. Les queues de bandes sont représentées par des exponentielles et les liaisons pendantes sont modélisées par des gaussiennes.

II.9.2. La partie optique

Elle calcule le facteur de génération en tenant compte des réflexions multiples et de la diffusion par les interfaces rugueuses. Le système obtenu est résolu par la méthode des différences finies et celle de Newton-Raphson. On obtient alors le potentiel électrostatique et les quasi-niveaux de Fermi en tout point du dispositif.

III.9.3. Calcul des états localisés continus dans le gap

Dans les semi-conducteurs amorphes, pour lesquels ce modèle a été principalement élaboré, il existe des états localisés continus dans le gap. Ces états proviennent des queues de bande représentées par des courbes exponentielles et dues à la distorsion du réseau cristallin du silicium amorphe, et des défauts ou liaisons pendantes représentées soit par une constante soit par des Gaussiennes.

La figure 2.9 représente les deux différents types de distribution des états localisés continus dans le gap intégrés dans le programme.

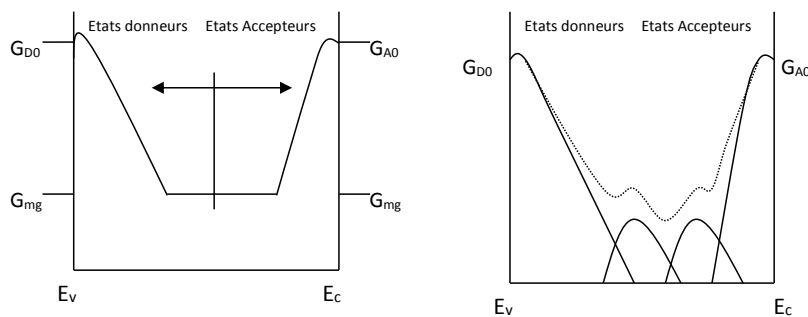


Figure 2.9 : Distribution des états localisés dans le gap

(a) Modèle en U (U-shaped model). (b) Modèle en deux gaussiennes.

III.9.3.1. Distribution dans les queues de bandes

Dans le programme ASDMP, les queues de bande des états donneurs et accepteurs sont modélisées respectivement par les équations:

$$g_{DT}(E) = G_{D0} \exp[-E/E_D] \quad (2.12)$$

$$g_{AT}(E') = G_{A0} \exp[-E'/E_A] \quad (2.13)$$

g représente la densité d'états (D.O.S. (cm⁻³eV⁻¹)).

G_{D0} est le préfacteur de l'exponentielle relative à la queue de bande débordant de la bande de valence.

G_{A0} est le préfacteur de l'exponentielle relative à la queue de bande débordant de la bande de conduction.

E_D et E_A représentent les énergies caractéristiques des queues de bande de la bande de valence et de conduction.

III.9.3.2. Distribution au milieu du gap

Le modèle en U (U-shaped model):

Dans le modèle en U, la densité d'états dans le gap est une valeur constante égale à G_{mg} (fig. 2.9 (a)). Cette région plate est rajoutée à la région exponentielle des queues de bandes pour ainsi compléter le modèle en U.

Le modèle en gaussiennes:

Dans ce modèle, la distribution de la densité d'états dans le gap est modélisée par deux gaussiennes.

La première Gaussienne se compose d'états donneurs ($D^{+/0}$), la deuxième ($D^{+/0}$) se compose d'états accepteurs.

II.10. Equations à résoudre

Le logiciel ASDMP résout simultanément l'équation de Poisson et les équations de continuité des trous et des électrons.

II.10.1. Equation de Poisson

L'équation de Poisson à une dimension est donnée par:

$$\frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial^2 x^2} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad (2.12)$$

Avec $\rho(x)$ la densité de charge effective donnée par :

$$\rho(x) = q[p(x) - n(x) + p_T(x) - n_T(x) + N_{net}^+] \quad (2.13)$$

Où ϵ représente la constante diélectrique, $\psi(x)$ le potentiel électrostatique, x la position dans le dispositif, n et p les concentrations des porteurs libres, N_D^+ et N_A^- sont les densités des accepteurs et donneurs ionisés, N_{net}^+ la densité de dopage effective.

II.10.2 Equations de continuité

Les équations de continuité des électrons et des trous à une dimension, en régime stationnaire, sont données respectivement par :

$$G(x) - R(p(x), n(x)) - \frac{1}{q} \frac{\partial j_n(x)}{\partial x} = 0 \quad (2.14)$$

$$G(x) - R(p(x), n(x)) - \frac{1}{q} \frac{\partial j_p(x)}{\partial x} = 0 \quad (2.15)$$

Où J_n et J_p sont les densités de courants des électrons et des trous, R est le taux de recombinaison et G le taux de génération électron-trou.

II.11. Conclusion

Ce chapitre est le cœur même de notre recherche. Il regroupe l'essentiel théorique permettant de percer le mystère de la cellule HIT. Il nous permet ainsi d'aborder le chapitre suivant : une confrontation de la théorie et de la simulation pour ne pas dire la pratique.

CHAPITRE III

PARTIE SIMULATION

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III. PARTIE SIMULATION : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1. Introduction

Dans le but d'améliorer la qualité d'une cellule solaire à hétérojonction, nous étudierons l'effet de la variation de la densité de dopage de l'émetteur p-a-Si:H sur les différents paramètres photovoltaïques et en particulier sur le rendement. Ce dernier chapitre résumera l'essentiel nous permettant d'interpréter nos résultats de simulation. Il est structuré dans une logique simpliste.

Premièrement, le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modelling Program) ainsi que l'interface de Cygwin vont être présentés dans un but introductif. Deuxièmement, un tableau synthétisant les paramètres caractérisés des différentes couches de la cellule HIT sera dressé : à titre d'exemples, les affinités électroniques, les épaisseurs, les mobilités des trous et des électrons y figurent. Troisièmement, il y aura un retour sur les définitions élémentaires de la densité de courant (J_{sc}), de la tension de circuit ouvert (V_{oc}), du facteur de forme (FF) et du rendement (η). Quatrièmement, une partie du chapitre traitera du dopage : notion centrale de ce présent thème de recherche. Pour finir, les résultats de la simulation seront présentés ainsi que leurs graphes associés afin de faciliter leurs interprétations.

III.2. Présentation de l'interface Cygwin et du logiciel ASDMP

Le logiciel ASDMP a été développé par le Professeur Parsathi Chatterjee de l'Indian Association for Cultivation of Science (Kolkata, Inde) en langage Fortran et s'exécute sous Linux.

Pour réaliser nos simulations, nous nous sommes servis de l'interface Cygwin pour pouvoir utiliser le logiciel sous Windows. Il est simple d'utilisation avec une simplicité de saisie des données (une seule donnée a été variée : la densité de dopage des accepteurs dans l'émetteur). L'exécution d'une entrée dure en moyenne 1 mn 50 (d'après notre chronomètre).

Après exécution de quelques commandes, nous avons pu recenser les principaux paramètres qui caractérisent les différents composants de la structure HIT en face avant.

```

/home/master
TYPE OF DEVICE      0      ONLY ABS. REQD.      0      /MAM
PROG. TYPE=1 MEANS AMORPHOUS SCHOTTKY BARRIER OR A 2-LAYER STRUCTURE.
/MAM
PROG. TYPE=2 MEANS AMORPHOUS P-I-N OR ANY 3-LAYER STRUCTURE.
/MAM
PROG. TYPE=3 MEANS AN N-LAYER STRUCTURE.
/MAM
ONLY THDYN. EQUIL. VALUES REQD. IF YES=1, IF NO=0.
/MAM
NTHSEM=NO. OF THICK SEMI LAYERS, NTHPT(IT), NTHPOS(IT) = NO. OF
INTERVALS, POSITION OF ITth SEMICONDUCTOR LAYER.
NTHSEM      3
NTHPT, NTHPOS      300800 50 5 6 7
PROGRAM TYPE      3      TOTAL NO. OF X-PTS      1164
/MAM
NLAYER      7
NP_F      0
IWHICH (0 OR 1)      0      ONLY THDYN. EQUIL.      0
/MAM
NO. OF P-LAYERS      1      NO. OF N-LAYERS      5
NO. OF I-LAYERS      1
P-LAYER POSITIONS      1
N-LAYER POSITIONS      3 4 5 6 7

```

Figure 3.1 : Interface de Cygwin présentant quelques données

III.2. Principaux paramètres caractéristiques de la cellule HIT

La cellule HIT étudiée (présentée dans le chapitre II), est constituée de 5 couches consécutives :

- L'Oxyde Transparent Conducteur (A base d'ITO)
- L'émetteur à base de silicium amorphe dopé p (p-a-si :H)
- La couche tampon composée de silicium amorphe intrinsèque (i-a-Si:H)
- La couche active constituée de silicium cristallin dopé n (n-c-Si) sur une épaisseur de 300 μm .
- La couche BSF (Back Surface Field)

Les paramètres représentés dans le tableau 3.1, sont donnés par défaut dans le logiciel. Nous n'avons pas eu besoin de les changer, à part la densité de dopage N_A de la couche de l'émetteur p-a-Si:H que nous avons fait varier de 10^{19} à 10^{20} cm^{-3} .

Il est important de remarquer la présence de quatre (04) films de Silicium cristallin (n-c-Si). La première modélise les imperfections à l'interface p-a-Si :H/n-c-Si avec une forte densité de défauts égale à $1,7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Les trois autres couches ont également des paramètres

différents non visibles dans le tableau, mais présent au niveau des fichiers d'entrée. Comme par exemple les coefficients d'absorption.

	ITO	p-a Si:H	i-a-Si:H	n-c-Si (1)	n-c-Si (2)	n-c-Si (3)	n-c-Si (4)	BSF
d	84,5nm	110 Å	30 Å	32 Å	68 Å	2.99 µm	296 µm	1 µm
$E_g(\text{eV})$		1,9	1,9	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
$N_D(\text{cm}^{-3})$		0	0	$9 \cdot 10^{14}$	$9 \cdot 10^{14}$	$9 \cdot 10^{14}$	$9 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{18}$
$N_A(\text{cm}^{-3})$		10^{19} à 10^{20}	0	0	0	0	0	0
$\chi(\text{eV})$		3,9	3,95	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22
$N_{\text{DTOT}}(\text{cm}^{-3})$		$1 \cdot 10^{19}$	$7 \cdot 10^{14}$	$1.7 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$
$N_{\text{ATOT}}(\text{cm}^{-3})$		$1 \cdot 10^{19}$	$7 \cdot 10^{14}$	$1.7 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$
$\mu_n(\text{cm}^2/\text{Vs})$		20	30	1000	1000	1000	1000	1000
$\mu_p(\text{cm}^2/\text{Vs})$		4	12	450	450	450	450	450
$N_C(\text{cm}^{-3})$		$1 \cdot 10^{19}$	$2 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$
$N_V(\text{cm}^{-3})$		$1 \cdot 10^{19}$	$2 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$

Tableau 3.1: paramètres caractéristiques de la HIT étudiée

Où :

d : Epaisseur de la couche,

E_g : Energie du Gap,

N_D : Densité de dopage des donneurs,

N_A : Densité de dopage des accepteurs,

χ : Affinité électronique,

N_{ATOT} : Densité de défauts accepteurs,

N_{DTOT} : Densité de défauts donneurs,

μ_n : Mobilité des électrons,

μ_p : Mobilité des Trous.

III.3. Rappel de quelques définitions

Avant de tracer les différents graphes, rappelons les définitions de quelques notions. Elles nous permettent de mieux faciliter l'interprétation dans la suite.

III.3.1. Le courant de court-circuit I_{cc} (eventuellement J_{sc})

I_{cc} correspond à l'intensité du courant de court-circuit, c.à.d. $V=0$. Il est directement proportionnel à l'énergie du rayonnement, à la température ambiante et à la surface de la cellule.

III.3.2. La tension à circuit-ouvert V_{co}

La valeur V_{co} correspond à la tension en circuit ouvert c'est-à-dire à $I=0$. Elle est fonction des caractéristiques de la jonction électronique et des matériaux.

III.3.3. La puissance maximale P_m

C'est la puissance maximale de sortie correspondant au point pour lequel le produit de la tension et de l'intensité du courant soit maximal, elle donnée par :

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (3.1)$$

III.3.4. Le facteur de forme FF

C'est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et le produit entre I_{cc} et V_{co} correspondant à la puissance maximale idéale, il est exprimé par :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} = \frac{P_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (3.2)$$

III.3.5. Le rendement η (noté EFF dans notre cas)

Le rendement mesure le taux de conversion énergétique, il est donné par :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_{co} I_{cc}}{P_{in}} \quad (3.3)$$

Où P_{in} est la totalité de la puissance incidente.

III.3.6. La puissance crête W_p

La puissance crête d'une photopile, aussi nommée puissance catalogue, notée W_p (*Watt peak*) représente la puissance électrique maximale de sortie sous les conditions standard (*STC : Standard Test Conditions*) ; une irradiance de 1000 W/m^2 , une température de 25°C et un spectre AM1.5.

III.4. Le dopage

Le dopage est une méthode permettant de réaliser la jonction pn. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ses propriétés électriques. Le semi-conducteur dopé est alors appelé semi-conducteur extrinsèque.

Il existe deux types de dopage : le type N (Négatif) et le type P (Positif).

III.4.1 Dopage de type N

Le dopage de type N consiste à ajouter un atome pentavalent (généralement du phosphore) au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron. Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative.

III.4.2 Dopage de type P

Le dopage de type P consiste à ajouter un atome trivalent (généralement du bore) au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou. Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive.

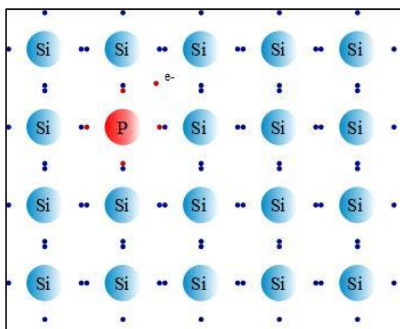


Figure 3.2. a) Dopage de type N

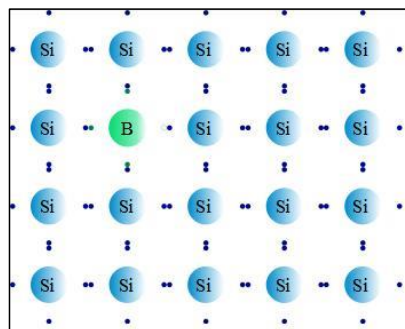


Figure 3.2. b) Dopage de type P

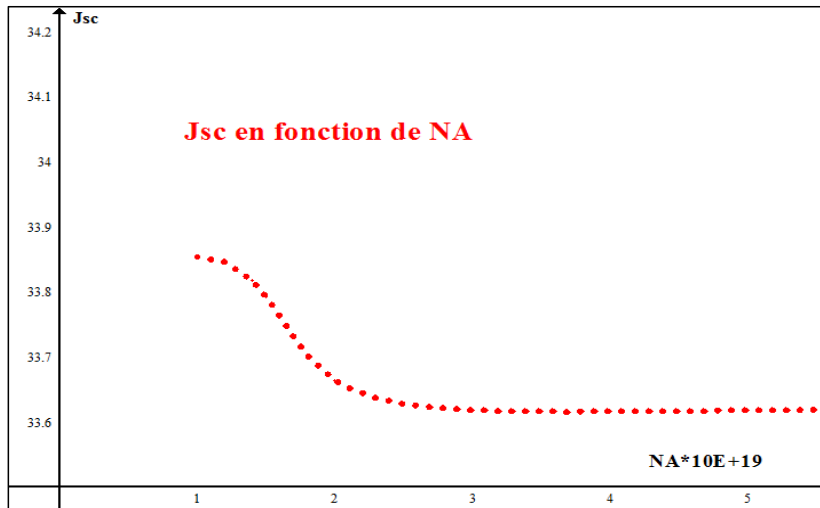
III.5. Résultats pratiques

En faisant varier la valeur de la densité de dopage N_A de l'émetteur de la cellule photovoltaïque, nous obtenons les résultats suivants :

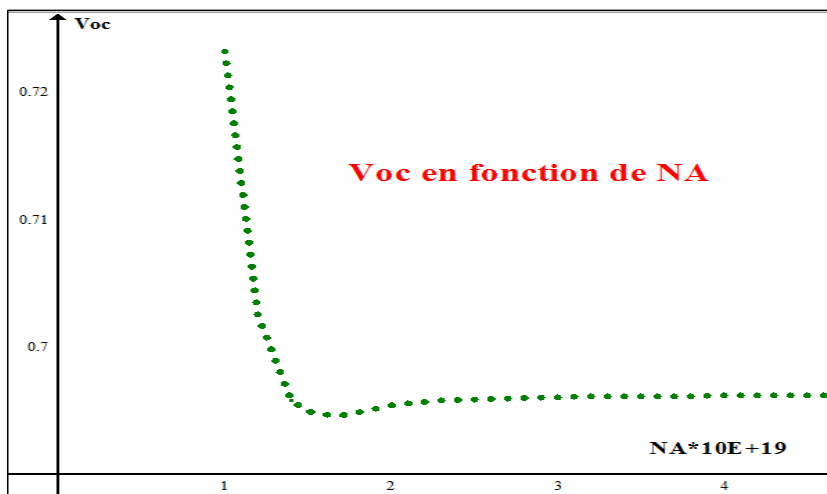
N_A (cm ⁻³)	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF	EFF (%)
1,0E+19	33,854508	0,72314	0,353383	8,651363
1,2E+19	33,845737	0,702486	0,517281	12,298946
1,6E+19	33,762748	0,694639	0,683781	16,036663
1,8E+19	33,703161	0,69486	0,713049	16,698862
2,0E+19	33,664785	0,695377	0,773123	18,098596
2,3E+19	33,637567	0,695762	0,814494	19,062203
2,5E+19	33,62863	0,695886	0,821662	19,22828
2,7E+19	33,623211	0,695965	0,824928	19,303785
3,0E+19	33,618806	0,696039	0,827242	19,357477
3,1E+19	33,61796	0,696057	0,827703	19,368255
3,5E+19	33,616331	0,696106	0,828872	19,396062
3,7E+19	33,616164	0,696123	0,829236	19,404944
3,8E+19	33,616178	0,69613	0,829387	19,408672
4,0E+19	33,616343	0,696142	0,829642	19,41509
4,3E+19	33,616825	0,696157	0,829945	19,422849
4,5E+19	33,617241	0,696165	0,830108	19,427139
4,8E+19	33,617948	0,696175	0,830313	19,432634
5,0E+19	33,61845	0,696181	0,83043	19,435814
5,6E+19	33,620004	0,696195	0,830712	19,443703
5,9E+19	33,620778	0,696201	0,830825	19,446961
6,0E+19	33,621033	0,696202	0,83086	19,447967
6,2E+19	33,621538	0,696206	0,830925	19,449876
6,9E+19	33,623237	0,696215	0,831118	19,455653
7,0E+19	33,62347	0,696216	0,831142	19,456382
7,4E+19	33,624377	0,696221	0,83123	19,459105
7,6E+19	33,624815	0,696223	0,831271	19,460361
7,9E+19	33,625454	0,696227	0,831326	19,462128
8,0E+19	33,625662	0,696228	0,831344	19,462689
8,2E+19	33,626071	0,696229	0,831378	19,463771
8,5E+19	33,626665	0,696232	0,831425	19,465302
8,8E+19	33,627237	0,696235	0,831469	19,466732
9,0E+19	33,627606	0,696237	0,831496	19,467635
9,9E+19	33,629154	0,696243	0,831605	19,471262
1,0E+20	33,629314	0,696244	0,831616	19,471626

Tableau 3.2 : Résultats de la simulation

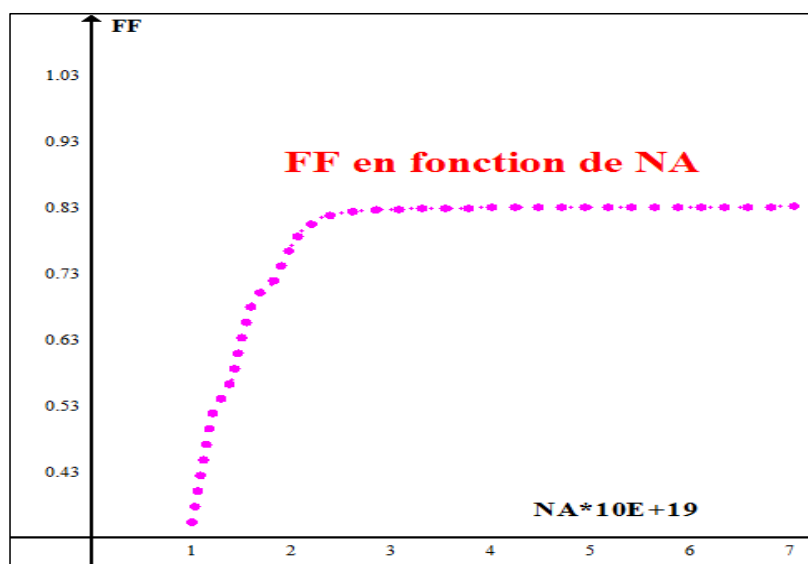
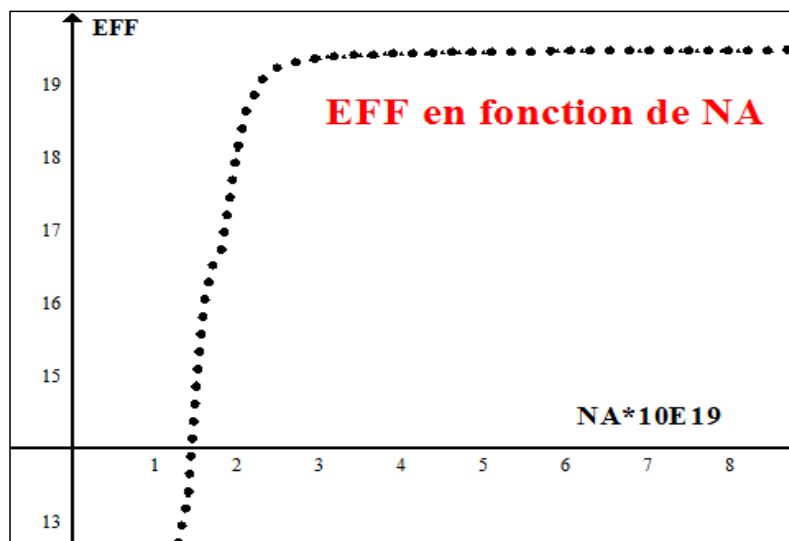
Ce qui nous permet de tracer les différents graphes représentant les paramètres photovoltaïques la cellule HIT étudiée (ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/Al).



Graphe 3.1 : Densité de courant en fonction de N_A



Graphe 3.2 : Tension de circuit ouvert en fonction de N_A

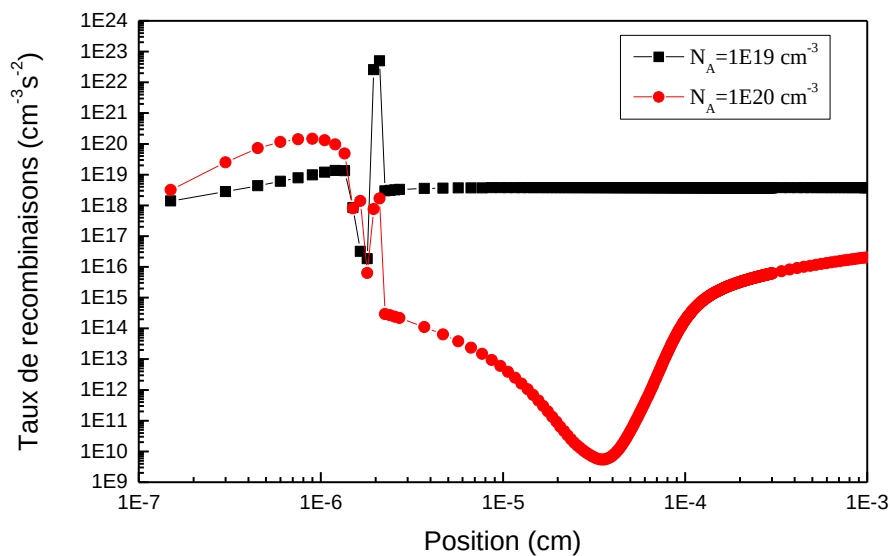
Graphe 3.3 : Facteur de forme en fonction de N_A Graphe 3.4 : Rendement en fonction de N_A

III.5. Interprétation des résultats

D'après les graphes obtenus (Graphes 3.1. et 3.2.), nous pouvons remarquer que lors de l'augmentation de la densité de dopage de la couche p-a-Si:H, une diminution de la densité de courant de court circuit J_{sc} , ainsi que de la tension en circuit ouvert V_{oc} est constatée.

Les graphes 3.3 et 3.4 montrent que le Facteur de Forme et le rendement augmentent avec l'accroissement du dopage malgré la diminution du J_{sc} et du V_{oc} . Le rendement atteint une valeur de 19.47%.

Pour pouvoir interpréter ces résultats, nous avons tracé la variation du taux de recombinaisons en fonction de la position dans le dispositif pour les valeurs extrêmes du dopage, à savoir $N_A=10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et $N_A=10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Les courbes obtenues sont représentées sur le graphe 3.5.



Graph 3.5 : Taux de recombinaisons en fonction de la position dans le dispositif pour deux valeurs du dopage de l'émetteur.

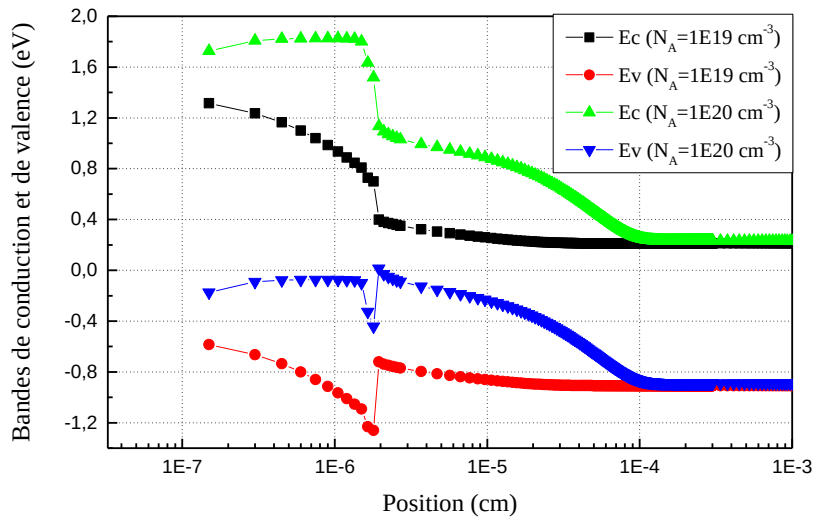
Nous pouvons discerner deux comportements différents du taux de recombinaison ; lorsque le dopage augmente, le taux de recombinaisons augmente dans l'émetteur (à cause de l'augmentation de la densité de défauts), alors qu'il diminue dans la couche active (n-c-Si)

Nous pouvons donc conclure que la diminution du J_{sc} et du V_{oc} est le résultat de l'augmentation des recombinaisons dans l'émetteur engendrée par la détérioration du matériau après le dopage.

L'augmentation du FF est quant à elle, est due à la diminution des recombinaisons dans la couche active.

Mais pourquoi le taux de recombinaison diminue dans la couche active ?

Pour tenter de répondre à cette question, nous avons tracé les diagrammes de bandes au niveau de la jonction pn pour deux valeurs du dopage, $N_A=10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et $N_A=10^{20} \text{ cm}^{-3}$, que nous avons représenté sur le graphe 3.6



Graphe3.6 Diagrammes de bandes pour les valeurs extrema de N_A

A partir du graphe 3.6, nous pouvons constater que l'augmentation du dopage provoque la diminution de la discontinuité de bande au niveau de la bande de valence ΔE_v , ce

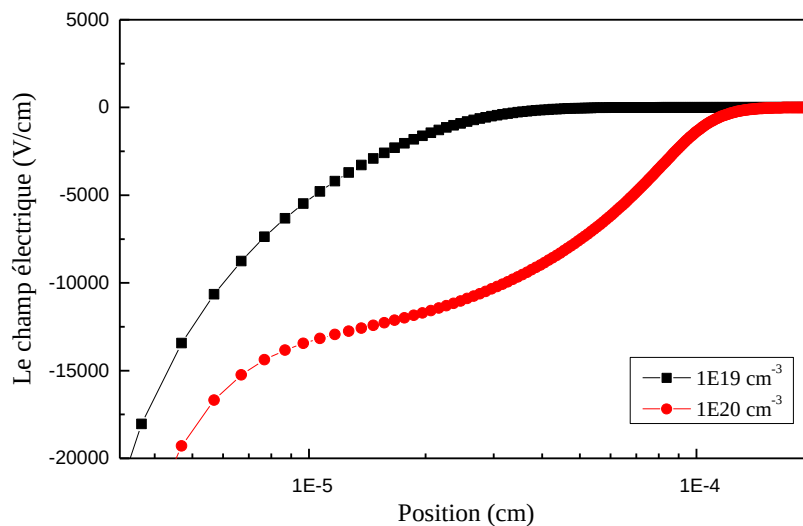
qui va permettre aux trous photogénérés de surmonter la barrière et d'être collectés, diminuant ainsi le taux de recombinaisons dans la couche active.

Pour conforter cette affirmation, nous avons tracé la variation du champ électrique en fonction de la position dans le dispositif pour deux valeurs de dopage : $N_A=10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et $N_A=10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Les courbes obtenues sont représentées sur le graphe 3.7.

A partir de ce dernier nous pouvons voir que le champ électrique est plus important lorsque le dopage augmente, ce qui est en accord avec l'équation (1.5) donnée dans le chapitre 1.

Ce fort champ favorise le passage des électrons photogénérés de la zone p vers la zone n, ainsi que le passage des trous photogénérés du côté n vers le côté p, pour être collectés par la suite, contribuant ainsi à l'amélioration du Facteur de Forme qui est relié aux nombres de paires électrons trous collectées.

L'amélioration du FF conduit systématiquement à un meilleur rendement η .



Graph 3.7: Champ électrique en fonction de la position pour les valeurs extrema de N_A

III.5. Conclusion

Au terme de ce dernier chapitre, dans lequel nous avons étudié l'influence de la densité de dopage de l'émetteur sur les performances de la cellule HIT, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La performance de la cellule HIT étudiée est améliorée par l'augmentation de la densité de dopage de la couche de l'émetteur constituée de silicium amorphe hydrogéné de type p (p-a-Si :H).
- L'augmentation de la densité de dopage de l'émetteur détériore le matériau conduisant ainsi à un fort taux de recombinaison, et par conséquent à la diminution de la densité du courant de court circuit J_{sc} et de la tension en circuit ouvert V_{oc} . A l'opposé, le taux de recombinaison diminue au niveau de la couche active (n-c-Si).
- La diminution du taux de recombinaison dans la couche cristalline est due à deux facteurs :
 - L'augmentation du champ électrique au niveau de la jonction pn,
 - La diminution de la discontinuité de bande ΔE_v .

Grace à ces deux phénomènes, le passage des porteurs minoritaires photogénérés vers leurs zones respectives est facilité. La collecte des paires électrons-trous se trouve alors améliorée, générant ainsi un bon Facteur de Forme.

- Le rendement est meilleur lorsque la densité du dopage de l'émetteur est élevée. Il atteint une valeur de 19.47% pour un dopage $N_A=10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

*CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES*

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le choix de ce thème de recherche a été fait à partir d'un constat suite à nos recherches liées au mémoire de la troisième année de licence en 2012. Une des faiblesses qui freine l'émergence de l'énergie solaire est bien le rendement peu satisfaisant des cellules photovoltaïques HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer). Dès lors, nous avons voulu consacrer nos efforts à ce niveau afin de mieux comprendre les phénomènes limitant le rendement.

Notre étude se résume en trois chapitres complémentaires qui nous ont permis d'aller à l'essentiel pour comprendre et décortiquer notre thème : généralités sur les cellules solaires, étude de la cellule HIT, résultats et interprétation.

Une étude qui a permis d'aboutir à des résultats dont les interprétations sont riches en informations.

- La performance de la cellule HIT étudiée est améliorée par l'augmentation de la densité de dopage de la couche de l'émetteur constituée de silicium amorphe hydrogéné de type p (p-a-Si :H).
- L'augmentation de la densité de dopage de l'émetteur détériore le matériau conduisant ainsi à un fort taux de recombinaison, et par conséquent à la diminution de la densité du courant de court-circuit J_{sc} et de la tension en circuit ouvert V_{oc} . A l'opposé, le taux de recombinaison diminue au niveau de la couche active (n-c-Si).
- La diminution du taux de recombinaison dans la couche cristalline est due à deux facteurs :
 - L'augmentation du champ électrique au niveau de la jonction pn,
 - La diminution de la discontinuité de bande ΔE_v .

Grace à ces deux phénomènes, le passage des porteurs minoritaires photogénérés vers leurs zones respectives est facilité. La collecte des paires électrons-trous se trouve alors améliorée, générant ainsi un bon Facteur de Forme.

- Le rendement est meilleur lorsque la densité du dopage de l'émetteur est élevée. Il atteint une valeur de 19.47% pour un dopage $N_A=10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

Certes le dopage accroît la performance de la cellule HIT, mais notre recherche est insuffisante. D'autres études plus approfondies devraient être menées afin d'améliorer sa performance et ainsi assurer sa compétitivité. Parmi lesquelles on peut citer :

- L'étude de l'influence du dopage sur la couche cristalline (n C-Si) ;
- L'étude des phénomènes de transport et de recombinaison sur le rendement de la HIT ;
- L'influence de la hauteur de barrière sur la mobilité des porteurs de charge.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Marbot, O. Energies propres : le monde est en train de changer. La revue N°70, bimestriel Mars-Avril 2017.
- [2] Robyns et al. (2012). Production d'énergie électrique à partir de sources renouvelables. Lavoisier.
- [3] Pinard M. et Villos M. (2008). Electrotechnique des énergies renouvelables et de la cogénération. Dunod, Paris
- [4] Wiessenfeld B. (2005) l'énergie en 2050. EDP Sciences.
- [5] Ménétier B. Demain, l'énergie (Mai 2015). Presse Universitaire de Grenoble (PUG).
- [6] De Vecchi, S. Développement de cellules photovoltaïques à heterojonction de silicium et contacts interdigités en face arrière. Thèse de doctorat. INSA de Lyon, 2013.
- [7] Mathieu H. et Fanet H. (2009). Physique des semiconducteurs et des composants électroniques. Dunod, 6è édition, Paris
- [8] Labouret, A. et Villot, M. (2005).Énergie solaire photovoltaïque. Dunod, 2è édition, Paris
- [9] Favre, W. (2011). Silicium de type n pour cellules à hétérojonctions: caractérisations et modélisations. Thèse de doctorat. Laboratoire de Génie Électrique de Paris
- [10] Noël, D. et al (2014). Les nanomatériaux et leurs applications pour l'énergie électrique. Lavoisier, Paris
- [11] <http://www.nrel.gov/>
- [12] Korte, L. et al. (2012). Physics and technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells. Springer, Verlag Berlin Heidelberg
- [13] Veschetti, Y. Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince. Thèse de doctorat. Université Louis Pasteur, Strasbourg I

Etude de l'influence du dopage sur le rendement d'une cellule solaire de type HIT à base de Silicium amorphe/Silicium cristallin.

RESUME :

Ces dernières années, d'énormes progrès ont été réalisés dans l'élaboration des cellules solaires. Cependant la recherche se poursuit dans le but d'atteindre de meilleurs rendements à moindre coût.

L'entreprise japonaise Sanyo, rachetée en 2009 par PANASONIC, a commercialisé massivement des modules photovoltaïques à base de cellules HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) vers la fin des années 90. En accommodant la bonne performance du silicium cristallin et le faible coût de production du silicium amorphe, cette technologie a permis d'atteindre de hauts rendements tout en diminuant le prix de revient ; Sanyo a ensuite amélioré ses cellules jusqu'à atteindre des valeurs records de rendement (25,6% en 2015).

Le travail présenté dans ce mémoire de Master consiste en l'étude de l'influence du dopage de l'émetteur, sur les paramètres photovoltaïques, en particulier le rendement, des cellules solaires HIT de type n.

Les simulations réalisées sous le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modelling Program) nous ont permis de conclure que la performance de la cellule HIT étudiée est améliorée par l'augmentation de la densité de dopage de l'émetteur constitué de silicium amorphe hydrogéné de type p (p-a-Si :H). Cela est dû principalement à la diminution du taux de recombinaisons au niveau de la couche active (n-c-Si) ; occasionnée par le rétrécissement de la discontinuité de la bande de valence ΔE_v . Un rendement de 19.47% a pu être atteint.

Mots-clés : Cellule solaire photovoltaïque, silicium cristallin, silicium amorphe, dopage, émetteur, logiciel ASDMP, bande de Valence.