

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abdelhamid Ben Badis - Mostaganem
Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique



Mémoire de fin d'étude

Présenté en vue d'obtenir le diplôme de MASTER

SPECIALITE : Physique du Matériaux

Elaboré par

BOUGHANEM djamaia

*Influence des propriétés du silicium amorphe hydrogéné sur la
performance d'une Cellule solaire HIT*

Encadré par

M^{me} RAHAL WASSILA LEILA

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma mère, la lumière qui éclaire ma vie, qui m'a toujours encouragé, aidé, qui m'a guidé Dans le droit chemin, qui m'a appris que rien n'est impossible, que Dieu te garde près de nous.

Telui qui m'a toujours encouragé et soutenu durant toutes mes années d'études. Merci pour ton amour et ta confiance totale. *A* toi très cher papa.

Ma cher grande mère *Mérim*, que Dieu lui accorde une longue vie.

Mon fiancé *Nasser*, et tous ceux qui s'appelle ou connaisse

le nom *Boughanem*

B. Djamaia

Liste des figures

| Figure N° | Titre de la figure | Page |
|-------------|--|------|
| Figure 1.1 | L' Air Mass | 5 |
| Figure 1.2 | Analyse spectrale du rayonnement solaire | 6 |
| Figure 1.3 | Types de rayonnement solaire reçu au sol | 7 |
| Figure 1.4 | Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire idéale | 8 |
| Figure 1.5 | Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire réelle | 9 |
| Figure 1.6 | Diagramme de bande de deux semi-conducteurs dopés p et n avant la mise en contact | 9 |
| Figure 1.7 | Formation d'une jonction p-n | 10 |
| Figure 1.8 | Formation de la Zone de Charge d'Espace | 11 |
| Figure 1.9 | Production du silicium métallurgique | 14 |
| Figure 1.10 | Procédé « Czochralski » pour l'élaboration du silicium monocristallin | 16 |
| Figure 1.11 | Méthode de la zone flottante pour l'élaboration du silicium monocristallin | 16 |
| Figure 1.12 | Structure du silicium amorphe hydrogéné | 17 |
| Figure 1.13 | Principe PECVD | 18 |
| Figure 1.14 | Cellule au Silicium Monocristallin | 18 |
| Figure 1.15 | Cellule au Silicium Polycristallin | 19 |
| Figure 1.16 | Cellule au Silicium amorphe | 19 |
| Figure 2.1 | Schéma de la première cellule solaire à simple hétérojonction de l'entreprise Sanyo. | 22 |
| Figure 2.2 | Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si:H(p)/c-Si(n) | 23 |
| Figure 2.3 | Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p) | 23 |
| Figure 2.4 | Distribution des états localisés selon le modèle en U (U-shaped model) | 25 |
| Figure 2.5 | Distribution des états localisés selon le modèle en gaussiennes | 26 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figure 2.6 | Diagramme de bande du silicium cristallin et du silicium amorphe hydrogéné | 27 |
| Figure 2.7 | caractéristique I-V d'une cellule solaire sous obscurité et sous éclairage | 28 |
| Figure 2.8 | Structure d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si: H(p)/ c-Si | 32 |
| Figure 3.1 | L'hétéro-structure ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/Al utilisée dans nos simulations | 37 |
| Figure 3.2 | Les énergies caractéristiques E_A et E_D dans le silicium amorphe hydrogéné | 39 |
| Figure 3.3 | La densité de courant de court circuit en fonction de E_D | 41 |
| Figure 3.4 | La Tension de circuit ouvert en fonction de E_D | 42 |
| Figure 3.5 | Le facteur de forme en fonction de E_D | 43 |
| Figure 3.6 | Le rendement en fonction de E_D | 43 |
| Figure 3.7 | Taux de recombinaisons en fonction de la position dans la structure a-Si :H(p)/a-Si :H(i)/c-Si(n)/Al pour deux valeurs de E_D | 44 |
| Figure 3.8 | La densité de courant de court circuit en fonction de E_A | 46 |
| Figure 3.9 | La Tension de circuit ouvert en fonction de E_A | 46 |
| Figure 3.10 | Le facteur de forme en fonction de E_A | 47 |
| Figure 3.11 | Le rendement en fonction de E_A | 47 |
| Figure 3.12 | Taux de recombinaisons en fonction de la position dans la structure a-Si :H(p)/a-Si :H(i)/c-Si(n)/Al pour deux valeurs de E_A | 48 |

Liste des tableaux

| Tableau N° | Titre du tableau | page |
|--------------|---|------|
| Tableau 2.1 | Evolution des performances de cellules HIT fabriquées par Sanyo sur substrat n (Résultats obtenus pour des cellules de 1 cm^2) | 22 |
| Tableau 3.1 | Paramètres caractéristiques de la HIT étudiée. | 38 |
| Tableaux 3.2 | Variation des paramètres de sortie de la cellule en fonction de l'énergie caractéristique de la bande de valence (E_D) | 41 |
| Tableau 3.3 | Variation des paramètres de sortie de la cellule en fonction de l'énergie caractéristique de la bande de conduction (E_A) | 45 |

Liste des abréviations

| Abréviation | Expression Complète | Page |
|-------------|--|------|
| PV | Photovoltaïque | 1 |
| AM | Air Mass | 5 |
| ZCE | Zone de Charge d'Espace | 13 |
| Cz | Czochralski | 15 |
| FZ | Floating Zone | 16 |
| PECVD | Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition | 17 |
| HIT | Heterojunction with Intrinsic thin Layer | 23 |
| FF | Fill Factor | 29 |
| TCO | Transparent Conducting Oxide | 29 |
| ITO | Indium Tin Oxide | 30 |
| BSF | Back Surface Field | 31 |
| ASDMP | Amorphous Semiconductor Device Modelling Program | 34 |
| STC | Standard Test Conditions | 45 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| DEDICACES | i |
| REMERCIEMENTS | ii |
| INTRODUCTION GENERALE | 3 |
| CHAPITRE1 : Généralités sur les cellules photovoltaïques | 4 |
| 1.1 Introduction | 4 |
| 1.2 L'énergie solaire | 4 |
| 1.2.1 La masse d'air..... | 5 |
| 1.2.2 Rayonnement solaire..... | 6 |
| 1.3 L'effet photovoltaïque..... | 7 |
| 1.4 Modélisation d'une cellule photovoltaïque | 8 |
| 1.4.1 Le modèle idéal | 8 |
| 1.4.2. Le modèle réel | 8 |
| 1.5 La jonction p-n..... | 9 |
| 1.5.1 Définition | 9 |
| 1.5.2 Structure et comportement d'une jonction p-n à l'équilibre | 9 |
| 1.5.3 La zone de charge d'espace | 10 |
| 1.5.4 Les caractéristiques d'une jonction PN | 11 |
| 1.5.4 .1 Le densité de charge $\rho(x)$ | 11 |
| 1.5.4.2 Le champ électrique interne..... | 12 |
| 1.5.4.3 Calcul du potentiel de diffusion V_b | 12 |
| 1.5.4.4 Répartition des porteurs majoritaires et minoritaires..... | 13 |
| 1.5.4.5Largeur de la Zone de Charge d'Esace..... | 13 |

| | |
|--|-----------|
| 1.6 Le silicium cristallin..... | 14 |
| 1.6.1 Silicium métallurgique..... | 14 |
| 1.6.2 Purification du silicium métallurgique | 14 |
| 1.6.3 Cristallisation du silicium | 15 |
| 1.6.3.1 Le procédé « Czochralski » (Cz)..... | 15 |
| 1.6.3.2 Le procédé de Fusion de Zone (FZ)..... | 16 |
| 1.6.4 Le Silicium amorphe..... | 17 |
| 1.6.4.1 L'élaboration du Silicium amorphe | 17 |
| 1.6.4.1.1 Principe de PECVD..... | 17 |
| 1.7 Types de cellules solaires à base de silicium..... | 18 |
| 1.7.1 Cellules au silicium monocristallin | 18 |
| 1.7.2 Cellules au silicium polycristallin..... | 19 |
| 1.7.3 Cellules au silicium amorphe..... | 19 |
| 1.8 Les avantages et les inconvénients d'une cellule photovoltaïque..... | 20 |
| 1.8.1 Les avantages | 20 |
| 1.8.2 Les inconvénients | 20 |
| 1.9 Conclusion..... | 20 |
| CHAPITRE 2 : Etude des cellules HIT sur substrat n | 21 |
| 2.1 Introduction | 21 |
| 2.2 Historique des cellules à hétérojonction a-Si: H/c-Si..... | 21 |
| 2.3 L'évolution des cellules HIT..... | 22 |
| 2.4 Principe d'une Hétérojonction HIT: (Hétérojonction with Intrinsic Thin layer)..... | 23 |
| 2.5 Le modèle de base d'Anderson..... | 24 |

| | |
|--|----|
| 2.6 La densité d'états dans le silicium amorphe hydrogéné..... | 24 |
| 2.6.1 Queues de bande..... | 25 |
| 2.6.2 Etats du centre du gap..... | 25 |
| 2.6.2.1 Le modèle en U (U-shaped model)..... | 25 |
| 2.6.2.2 Modèle des gaussiennes | 26 |
| 2.6.3 Diagramme de bande du silicium amorphe..... | 26 |
| 2.7 Les paramètres photovoltaïques | 27 |
| 2.7.1 La densité du court-circuit(J_{cc})..... | 28 |
| 2.7.2 Tension de circuit ouvert(V_{co})..... | 28 |
| 2.7.3 Facteur de Forme FF | 29 |
| 2.7.4 Rendement de conversion η | 29 |
| 2.8 Les différentes couches de la cellule silicium à hétérojonctions | 29 |
| 2.8.1 L'oxyde transparent conducteur | 29 |
| 2.8.2 L'émetteur | 30 |
| 2.8.3 La couche intrinsèque a-Si : H(i)..... | 30 |
| 2.8.3.1 L'absorbeur c-Si « substrat » de type n ou p..... | 31 |
| 2.8.5 Le BSF | 31 |
| 2.8.6 Les contacts..... | 31 |
| 2.9 Description du modèle de simulation | 32 |
| 2.10 Méthode de résolution..... | 33 |
| 2.11 Les logiciels de simulation..... | 33 |
| 2.11.1 PC1D, AMPS-1D, AFORS-HET..... | 34 |
| 2.11.2 ASDMP..... | 35 |

| | |
|---|-----------|
| 2.12 Conclusion | 36 |
| Chapitre 3 : Effet des énergies caractéristiques sur la performance des cellules HIT..... | 37 |
| 3.1 Introduction..... | 37 |
| 3.2 Présentation de la cellule | 37 |
| 3.3 Les énergies caractéristiques E_D et E_A | 39 |
| 3.4 Résultats et discussions..... | 40 |
| 3.4.1 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de valence E_D sur la performance de la cellule..... | 40 |
| 3.4.1.1 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de valence E_D sur J_{CCN} | 41 |
| 3.4.1.2 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de valence E_D sur V_{CO} | 42 |
| 3.4.1.3 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de valence E_D sur FF..... | 42 |
| 3.4.1.4 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de valence E_D sur η | 43 |
| 3.4.2 Effet de l'énergie caractéristique de la band de conduction E_A sur la performance de la cellule..... | 45 |
| 3.4.2.1 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de conduction E_A sur J_{CC} | 46 |
| 3.4.2.2 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de conduction E_A sur V_{CO} | 46 |
| 3.4.2.3 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de conduction E_A sur FF..... | 47 |
| 3.4.2.4 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de conduction E_A sur η | 47 |
| 3.5 Conclusion | 49 |
| Conclusion Générale et Perspectives..... | 50 |
| Bibliographie | 52 |

Introduction générale

La plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. Ces ressources deviennent de plus en plus rares, pendant que la demande énergétique du monde s'élève continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation [0].

Etant donné que cette forme d'énergie couvre une grande partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un point important [1].

A ce sujet, les énergies renouvelables, comme l'énergie solaire photovoltaïque, éolienne ou hydraulique,...apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables. Si l'on prend l'exemple du soleil, une surface de 145000km² (4% de la surface des déserts arides) de panneaux photovoltaïques (PV) suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux [1]

L'électricité photovoltaïque représente une énergie inépuisable puisqu'elle est directement générée à partir du soleil. Son développement est une réponse nécessaire aux questions énergétiques actuelles. Par contre, elle est limitée par son coût élevé et son rendement relativement faible. Réduire les coûts et augmenter les performances, est l'objectif principal pour rendre le solaire photovoltaïque compétitif.

Les cellules solaires photovoltaïques sont des dispositifs électroniques capables de faire la conversion de l'énergie lumineuse en un courant électrique.

Les cellules photovoltaïques à hétérojonctions sont obtenues par la mise en contact de matériaux d'énergie de gap différent. 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.

Le but principal de la recherche scientifique dans le domaine des cellules solaires est d'atteindre le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient. Les cellules solaires à hétérojonction (a-Si:H / c-Si) combinent le haut rendement stable du

silicium cristallin avec le faible prix de la technologie de dépôt du silicium amorphe hydrogéné [2]

Le travail présenté dans ce mémoire est une étude qui portera sur la simulation électrique d'une cellule solaire à hétérojonction « HIT » en c-Si de type n et a-Si:H de type p, en utilisant le simulateur ASDMP « Amorphous Silicon Device Modeling program » dans le but d'étudier comment l'énergie caractéristique du silicium amorphe hydrogéné influence les performances des cellules de ce type.

Le mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre sera partagé en deux parties, en premier lieu nous allons présenter quelques notions sur la source d'énergie, puis nous donnerons la définition de l'effet photovoltaïque, nous décrirons la modélisation d'une cellule photovoltaïque et nous présenterons le rayonnement solaire qui est la source d'énergie incidente. Par la suite, nous aborderons les phénomènes mis en jeu lors de la formation de la jonction p-n qui constitue le fondement de la cellule solaire. En deuxième lieu nous rappellerons les propriétés électroniques des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium cristallin (c-Si) et le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) ainsi que leurs procédés de fabrication. Et enfin nous exposerons les différents types de cellules fabriquées à base de silicium.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons l'hétérojonction HIT et le modèle de base d'Anderson. Nous aborderons ensuite la densité d'états dans le silicium amorphe hydrogéné (a-si : H), ainsi que son diagramme de bande. Puis nous détaillerons les paramètres photovoltaïques qui servent à caractériser une cellule solaire. En dernier, nous présenterons le modèle de simulation utilisé ainsi que le logiciel ASDMP que nous utiliserons pour réaliser nos simulations.

Dans le troisième chapitre, nous étudierons l'influence des énergies caractéristiques de la couche p-a-Si :H sur les paramètres photovoltaïques (J_{CC} , V_{CO} , FF, η) d'une cellule solaire HIT de type n en face avant, puis nous interpréterons les résultats obtenus par simulation.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale et les perspectives envisagés pour la continuité de ce travail.

Chapitre 1

Généralités sur les cellules solaires

1.1 Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, elle pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [1]. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et disponible sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à ce but grâce aux cellules photovoltaïques [2].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque [3]

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques bases indispensables dans le domaine photovoltaïque. Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie, nous décrirons ensuite les rayonnements solaires, l'effet photovoltaïque, la modélisation d'une cellule photovoltaïque, la jonction p-n, et les types de silicium, nous terminerons par les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

1.2 L'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est d'environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/s, les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/m^2 . Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/ m^2 à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet

Photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules : les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

h : la constante de Planck,

C : la vitesse de la lumière.

λ : La longueur d'onde.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande [3].

Une façon commode d'exprimer cette énergie est:

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (1.2)$$

La partie de l'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air (AM) [4].

1.2.1 La masse d'air

Quand le soleil est directement vertical (position du zénith), la quantité d'énergie reçue à midi est maximale car l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons solaires est minimum au niveau de la mer, c'est repéré comme : Air Mass 1 (AM1). L'énergie solaire atteignant la surface terrestre dans cette condition n'est plus que de 1000 W/m^2 . N'importe quel changement de l'angle du soleil ($AM > 1$) l'énergie arrivant à la surface de la terre diminue.

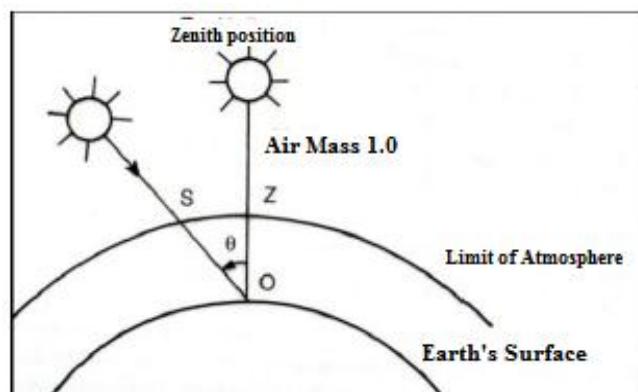


Figure 1.1 - L'Air Mass

L'Air Mass définie par :

$$AM = 1/\cos(\alpha) \quad (1.3)$$

- α l'angle que fait la position du soleil avec la verticale.
- AM1 = correspond au soleil au zénith ($\alpha = 0$)
- AM2 = correspond à l'horizon ($\alpha = 60^\circ$)
- AM1.5 = correspond ($\alpha = 48,19^\circ$)
- AM0 est utilisé pour préciser les conditions en dehors de l'atmosphère AM

1.2.2 Rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 μm à 10 μm . La figure 1.2 représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement à :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4 \mu\text{m}$),
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm),
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$)

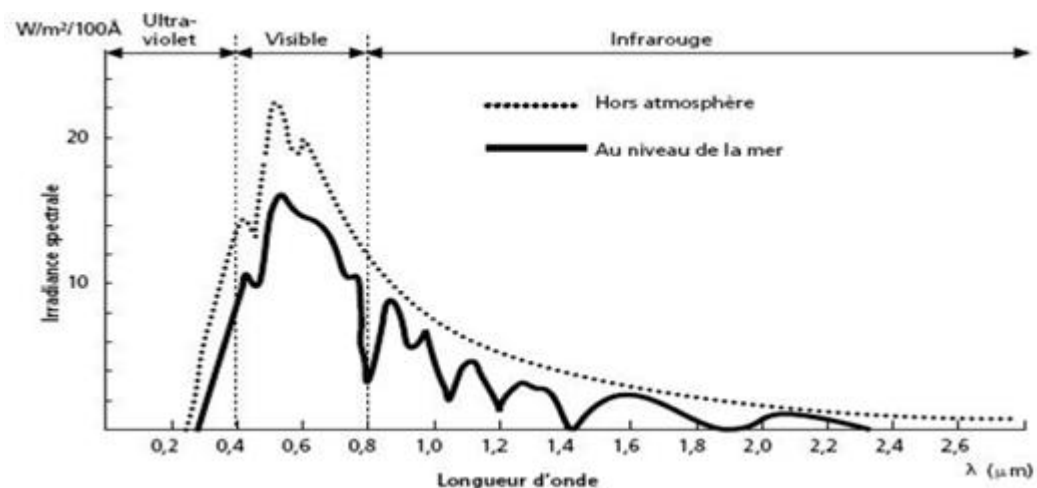


Figure 1.2 - Analyse spectrale du rayonnement solaire

Il existe quatre types de rayonnement:

- **Rayonnement direct** : rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyréliomètre [4].

- **Rayonnement diffus** : c'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols [5].
- **Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol** : le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- **Rayonnement global** : le rayonnement global est subdivisé en rayonnements direct, diffus et réfléchi par le sol). Sur la figure 1.3 est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre.

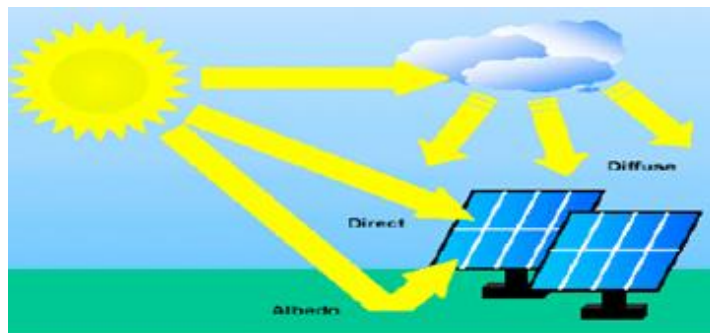


Figure 1.3 - Types de rayonnement solaire reçu au sol

1.3 L'effet photovoltaïque

Le terme photovoltaïque provient de « photo » qui signifie lumière, et de « volta » qui signifie électricité, désignant donc la production d'électricité à partir de lumière.

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons en énergie électrique à l'aide de cellules solaires [4]

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons d'un matériau, qui peut être un métal ou un semi-conducteur, lorsqu'il est éclairé. Les électrons ne sont émis que si la fréquence de la lumière est suffisamment élevée (la fréquence limite dépend du matériau), alors que leur nombre, qui détermine l'intensité du courant, est proportionnel à l'intensité de la source lumineuse. Deux effets sont à distinguer : l'émission d'électrons proprement dite et la modification de la conductivité du matériau qui donne l'effet photovoltaïque.

1.4 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de la réalisation des cellules solaires. Ces modèles se différencient par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque

Nous présenterons deux modèles :

- Modèle à une diode ou (simple exponentielle)
- Modèle à deux diodes ou (double exponentielle)

1.4.1 Le modèle idéal

C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire. Il ne tient compte que du phénomène de diffusion. Le circuit équivalent de ce modèle est représenté sur la figure 1.4.

Le courant est donné par la relation. [6]

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\left(\frac{qV}{KT}\right)} - 1 \right] \quad (1.4)$$

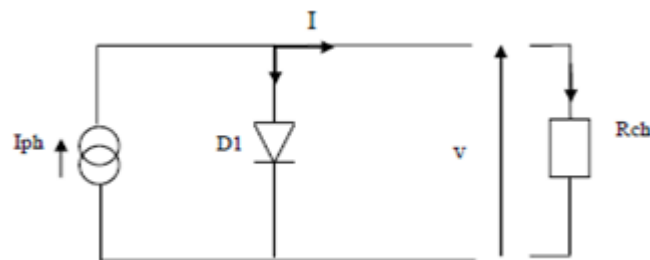


Figure 1.4 - Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire idéale

1.4.2 Le modèle réel

Ce modèle est celui d'une cellule solaire réelle (figure 1.5). L'expression de la caractéristique courant – tension sous éclairement s'écrit:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{nKT}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (1.5)$$

I_{ph} étant le photocourant dû aux photons incidents, les deux termes exponentiels représentent séparément le courant de saturation de diffusion (I_{01}) et le courant de saturation génération recombinaison (I_{02}), respectivement. Le dernier terme de l'équation reflète les pertes par la résistance shunt, appelé courant de fuite, et par la résistance série qui modélise les résistances des différentes couches et contacts que le courant rencontre sur son parcours. [6]

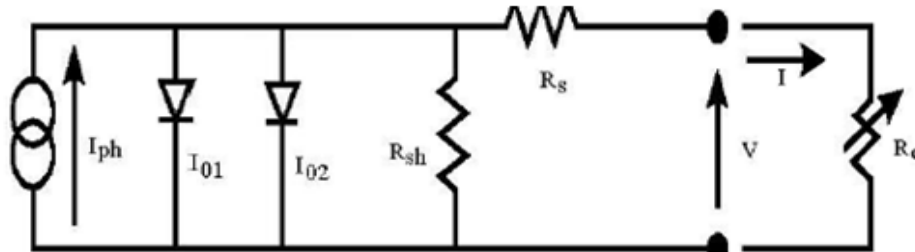


Figure 1.5 - Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle

1.5 La jonction p-n

1.5.1 Définition

Une jonction PN représente la mise en contact d'une surface de cristal de semi-conducteur dopé P avec une surface de cristal de semi-conducteur dopé N. Cette structure permet de réaliser des composants électroniques utilisés au quotidien : diodes, transistors, laser à semi-conducteur, cellules solaires, mémoires...etc.

1.5.2 Structure et comportement d'une jonction p-n à l'équilibre

Soient deux semi-conducteurs de type n et p (figure 1.6) caractérisés par leurs niveaux de Fermi respectifs (E_{fp} et E_{fn}) et ayant un même gap E_g (cas d'une homojonction). Tant que les deux semi-conducteurs sont isolés l'un de l'autre, chacun est électriquement neutre.

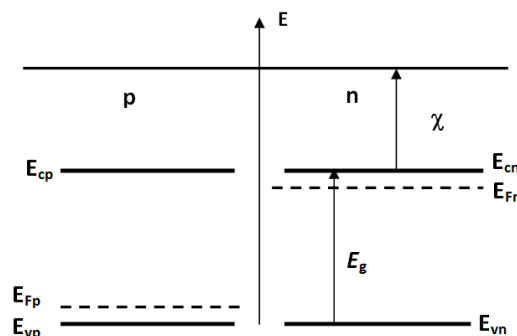


Figure 1.6 - Diagramme de bande de deux semi-conducteurs dopés p et n avant la mise en contact

Lorsqu'on réalise un contact entre ces deux semi-conducteurs, on obtient ce que l'on appelle une jonction p-n. Il faut noter que ce contact n'est pas une simple juxtaposition du cristal de type n avec un cristal de type p. En pratique, le contact doit être à une échelle atomique, soit une continuité du cristal de part et d'autre de la surface de la jonction.

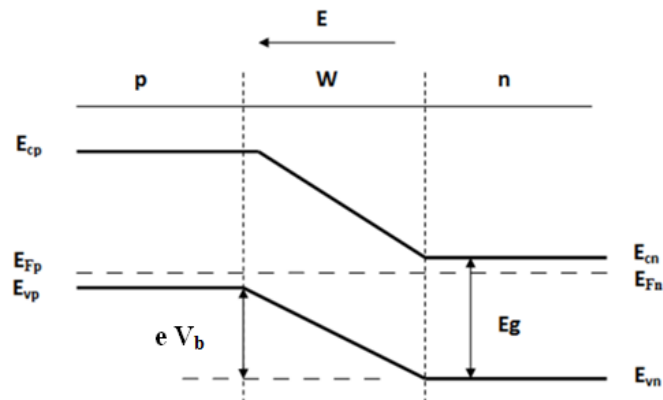


Figure 1.7 - Formation d'une jonction p-n.

1.5.3 La zone de charge d'espace

Lorsque le contact est établi entre la zone n et la zone p, un gradient de concentration en électrons et en trous apparaît de part et d'autre de la surface de contact. Il y aura une diffusion des porteurs de charge libres (électrons et trous) du côté où ils sont majoritaires vers celui où ils sont minoritaires.

La neutralité électrique des deux régions est rompue. Du côté p, la région dépeuplée aura une charge négative due aux ions négatifs accepteurs et du côté n elle aura une charge positive due aux ions positifs donneurs. Cette région de charges fixes est appelée Zone de Charge d'Espace (zone de déplétion, zone désertée).

Cette zone est située de part et d'autre de la surface de contact (jonction métallurgique) sans être nécessairement symétrique. Effectivement, la zone de charge d'espace s'étend du côté le moins dopé.

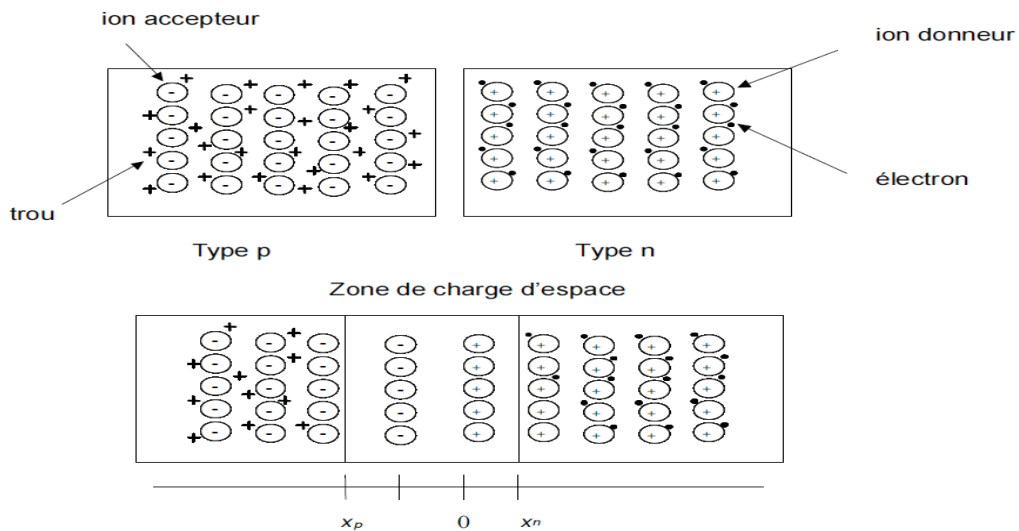


Figure 1.8 - Formation de la Zone de Charge d'Espace

La formation de la jonction p-n produit un champ électrique E (champ de diffusion) dirigé du côté n (charge +) vers le côté p (charge -). Le potentiel correspondant est appelé potentiel de diffusion ou barrière de potentiel V_b .

En dehors de cette zone de charge, le semi-conducteur reste électriquement neutre.

Le champ interne va s'opposer au phénomène de diffusion. En effet, un champ électrique ne favorise le mouvement des électrons que s'ils ne se déplacent dans la direction contraire du champ. Or la diffusion des électrons majoritaires se fait dans la même direction que le champ de diffusion. De la même manière, on sait que le champ électrique ne favorise le mouvement des trous que s'ils se déplacent dans la même direction que lui alors que la diffusion des trous se fait dans la direction contraire du champ de diffusion. Donc, le champ s'oppose également à la diffusion des trous.

Une situation d'équilibre est atteinte. La jonction PN est complètement formée avec une zone de charge finie.

1.5.4 Les caractéristiques d'une jonction PN

1.5.4.1 Le densité de charge $\rho(x)$

La densité de charge qui existe au niveau de la zone de charge d'espace est donnée par :

$$\begin{aligned} \rho(x) &= 0 && \text{pour } x < -x_p \text{ et } x > x_n \\ \rho(x) &= -e N_A && \text{pour } -x_p < x < 0 \\ \rho(x) &= e N_D && \text{pour } 0 < x < x_n \end{aligned}$$

1.5.4.2 Le champ électrique interne

➤ Champ électrique du côté "N" : ($0 < x < x_n$)

$$\text{Équation de GAUSS : } dE_n(x)/dx = \rho(x)/\varepsilon = e N_D/\varepsilon. \quad (1.6)$$

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

$$E_n = \frac{eN_D(x - x_n)}{\varepsilon} \quad (1.7)$$

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

$$\text{Équation de GAUSS : } dE_p(x)/dx = \rho(x)/\varepsilon = -e N_A/\varepsilon \quad (1.8)$$

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

$$E_p = \frac{-eN_A(x + x_p)}{\varepsilon} \quad (1.9)$$

Au niveau de la jonction métallurgique, c'est-à-dire pour $x = 0$: $E_p(0) = E_n(0)$: le champ électrique est une grandeur continue dans une homojonction. On en déduit :

$$E_p(0) = E_n(0) = -q N_A x_p/\varepsilon = -q N_D x_n/\varepsilon = E_{Max} \quad (1.10)$$

$$N_D X_n = N_A X_p \quad (1.11)$$

1.5.4.3 Calcul du potentiel de diffusion V_b

La présence d'une charge d'espace entraîne l'existence d'un champ électrique et d'une variation de potentiel. Le potentiel varie d'une valeur V_p dans la région neutre de type p, à une valeur V_n dans la région neutre de type n.

La différence de potentiel entre ces deux régions constitue une barrière de potentiel que l'on appelle tension de diffusion, en raison du fait que c'est la barrière qui équilibre les forces de diffusion.

La hauteur de la barrière de potentiel qui s'oppose au courant majoritaire peut être déduite de la figure 1.7 :

$$e V_b = E_{cp} - E_{cn} = E_{vp} - E_{vn} \quad (1.12)$$

Sachant que:

$$n_n = N_C \exp\left[\frac{-(E_{cn} - E_F)}{kT}\right] \quad (1.13)$$

Et

$$n_p = N_C \exp\left[\frac{-(E_{cp} - E_F)}{kT}\right] \quad (1.14)$$

La tension de diffusion est par conséquent donnée par l'expression:

$$V_b = \frac{KT}{e} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (1.15)$$

Pour les dopages utilisés en pratique et compte tenu des valeurs de n_i à la température ambiante, les valeurs de V_b sont respectivement de l'ordre de 0,7 V et 0,35 V dans les jonctions au silicium et au germanium.

1.5.4.4 Répartition des porteurs majoritaires et minoritaires

En dehors de la ZCE, les densités de porteurs libres dans chacune des régions N et P sont données par :

- $p_p = N_A =$ densité des trous du côté "P".
- $p_n = n_i^2/N_D =$ densité des trous du côté "N".
- $n_n = N_D =$ densité des électrons du côté "N"
- $n_p = n_i^2/N_A =$ densités des électrons du côté "P".

1.5.4.5 Largeur de la Zone de Charge d'Espace

L'intégration du champ électrique sur toute l'épaisseur de la zone désertée donne la valeur de la tension de la barrière de potentiel. On trouve :

$$V_b = e (N_A x_p^2 + N_D x_n^2) / 2\epsilon \quad (1.16)$$

Comme $W = x_p + x_n$ on obtient :

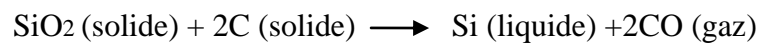
$$W = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon}{e} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_b} \quad (1.17)$$

1.6 Le silicium cristallin

Le silicium est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène (O). Il constitue 26% de son poids. C'est un semi-conducteur à gap indirect de 1.12 eV à la température ambiante. Sa densité intrinsèque des porteurs est de $8.56 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ à la même température. [7]

1.6.1 Silicium métallurgique

On obtient le silicium de grade métallurgique (MG-Si) par la réduction de la silice avec le carbone (C) dans un four à arc électrique (Figure 1.9). Le creuset du four est rempli de la silice et du carbone puis est porté à une température élevée d'environ 1800 °C. La réaction globale de cette réduction est donnée par :



Le silicium en fusion est rempli dans des poches puis séparé du laitier avant d'être coulé dans des lingotières. Le silicium ainsi obtenu présentera une pureté typique de 98.5 %. Les impuretés présentes proviennent soit des intermédiaires de réaction comme le Sic (solide) et SiO₂ (solide), soit des impuretés contenues dans la matière première (métalliques, carbone, bore et phosphore). [7]

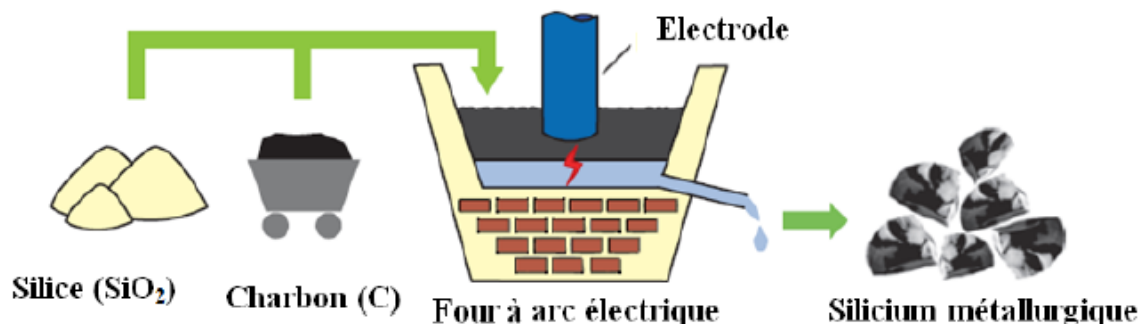
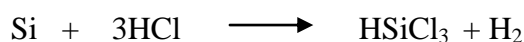


Figure 1.9 - Production du silicium métallurgique

1.6.2 Purification du silicium métallurgique

La méthode la plus fréquemment utilisée pour diminuer les impuretés dans le silicium est le procédé SIEMENS. Cette voie de purification est dite chimique (opposée à la voie métallurgique). Elle consiste à la réduction de trichlorosilane ($\text{HSiCl}_3 = \text{TCS}$). Le TCS est

formé à partir d'une réaction d'hydro-chloration entre le MG-Si et de l'acide Chlorhydrique (HCl) à des températures comprises entre 300-350°C :



Ensuite, le HSiCl_3 est purifié par distillation, puis réduit par l'hydrogène (H_2) à 1000-1100°C.



Le silicium est alors obtenu sous une forme polycristalline et il est prêt à être utilisé pour la cristallisation des lingots [8]

1.6.3 Cristallisation du silicium

Plusieurs techniques sont utilisées pour cristalliser le silicium purifié, les plus connues sont, le procédé « Czochralski » (Cz) et le procédé Zone de Fusion « Float Zone » (FZ) qui produisent du silicium monocristallin.

1.6.3.1 Le procédé « Czochralski » (Cz)

Cette méthode qui a été inventée par Jan Czochralski (1916), consiste à faire fondre le silicium polycristallin dans un creuset à 1450 °C, des dopants (bore et phosphore) peuvent alors être ajoutés pour doper le silicium de type p ou de type n. Un germe de silicium monocristallin avec une orientation cristallographique précise (100 par exemple) est placé en contact avec la surface du bain en fusion. Le silicium solidifié et tiré lentement vers le haut, prend l'orientation cristallographique du germe. (Figure 1.10). Ensuite la vitesse de tirage est augmentée jusqu'à atteindre la vitesse spécifique à laquelle le cristal croît avec le diamètre désiré. Le lingot obtenu peut atteindre 30 cm de diamètre et 2 m de longueur. Pour le photovoltaïque, les diamètres finaux des cellules actuelles, obtenues à partir des lingots, se situent généralement entre 12.5 et 15.6 cm.

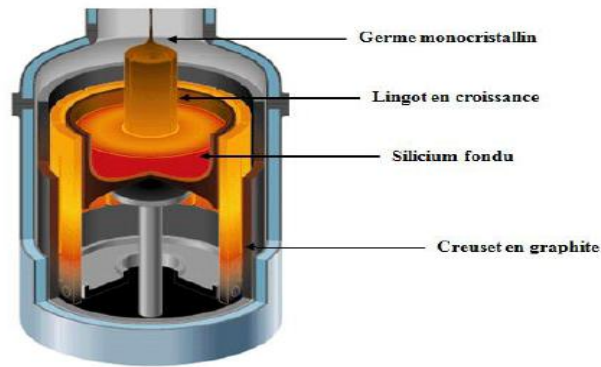


Figure 1.10 - Procédé « Czochralski » pour l'élaboration du silicium monocristallin

1.6.3.2 Le procédé de Fusion de Zone (FZ)

Cette technique consiste à passer plusieurs fois un barreau de silicium polycristallin dans un anneau à induction qui fait fondre localement le silicium (Figure 1.11). Un germe monocristallin est placé à l'extrémité du barreau de silicium pour débiter la croissance du lingot. Le silicium monocristallin se forme du bas vers le haut, de sorte que toutes les impuretés existantes sont entraînées par ségrégation vers le haut avec la zone fondue. Le silicium monocristallin obtenu est plus purifié que celle du procédé (Cz). Le procédé (FZ) est significativement plus cher que celui de (Cz), il n'est utilisé pour le photovoltaïque que dans des cas exceptionnels. Par exemple la cellule PERL (en anglais Passivated Emitter Rear Locally diffused) a été établie avec du silicium monocristallin utilisant le procédé (FZ) atteignant un rendement-laboratoire de 25% sur une surface de 4 cm²

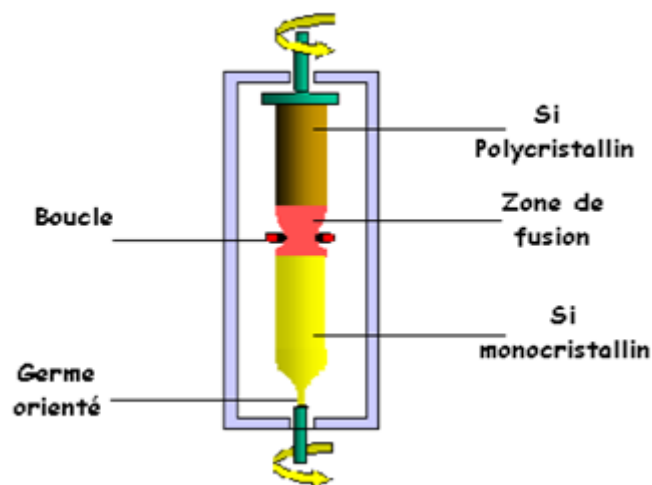


Figure 1.11 - Méthode de la zone flottante pour l'élaboration du silicium monocristallin

1.6.4 Le Silicium amorphe

Le silicium amorphe a une structure tétraédrique comme le cas du silicium cristallin, mais il présente des distorsions aléatoires. Les défauts sont également présents sous forme d'atomes de silicium qui ont seulement trois liens covalents avec des voisins. Le quatrième lien non satisfait s'appelle liaison pendante (figure 1.12). La concentration des liaisons pendantes dans le silicium amorphe non hydrogéné est de l'ordre de 10^{19} à 10^{20} cm^{-3} . Ces liaisons pendantes créent des états électroniques dans la région centrale du gap qui rendent le matériau difficilement utilisable pour des applications électroniques. On trouve des atomes de silicium avec un électron célibataire d'où la liaison pendante qui peut constituer un piège à électron comme elle peut constituer un piège à trous

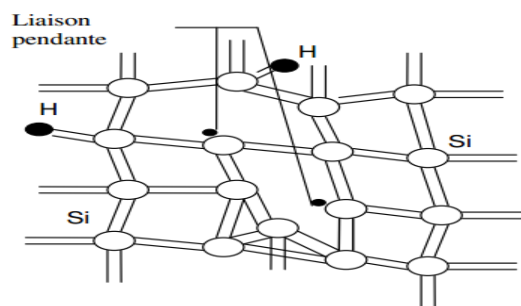


Figure 1.12 - Structure du silicium amorphe hydrogéné.

1.6.4.1 L'élaboration du Silicium amorphe

1.6.4.1.1 Principe de PECVD

Le principe consiste à appliquer une décharge électrique entre deux électrodes en présence d'un gaz qui s'ionise facilement (appelé précurseurs). L'ionisation du gaz conduit à l'obtention d'espèces chargées ou non, libres telles que des ions, radicaux libres, atomes et molécules neutres ou excités qui restent en température ambiante. Les électrons sont portés à haute température. Les collisions essentiellement inélastiques entre ces électrons libres et les molécules du gaz produisent les espèces précurseurs actives des réactions chimiques. [15]

Les précurseurs utilisés pour le dépôt doivent contenir l'élément du dépôt. Comme était déjà mentionné les films a-Si: H peuvent être déposées par plasma silane (SiH_4), silane hydrogène (SiH_4/H_2) ou argon silane $\text{SiH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$ [15].

La compréhension de la chimie en phase gazeuse et l'énergétique processus est très importante dans le cas de la croissance découplé tels que les procédés de dépôt chimique en

phase vapeur dépôt par plasma (PECVD) ; la décomposition du gaz source se déroule loin du plan de substrat. [19]

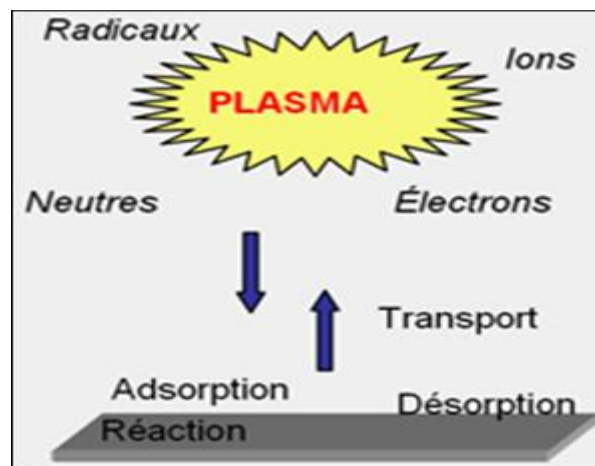
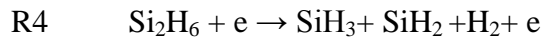
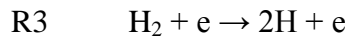
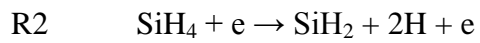
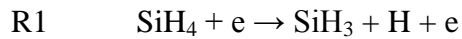


Figure 1.13 - principe PECVD

1.7 Types de cellules solaires à base de silicium

1.7.1 Cellules au silicium monocristallin

Ce type de cellule est le meilleur dans la filière silicium. Il a un rendement et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher



Figure 1.14 - Cellule au Silicium Monocristallin.

1.7.2 Cellules au silicium polycristallin

Le silicium polycristallin: est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par Moulage. Ce matériau est moins coûteux que le monocristallin. Les cellules carrées ou Rectangulaires sont faciles à utiliser.



Figure 1.15 - Cellule au Silicium Polycristallin.

1.7.3 Cellules au silicium amorphe

Les cellules amorphes: Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres



Figure 1.16 - Cellule au Silicium amorphe.

1.8 Les avantages et les inconvénients d'une cellule photovoltaïque

1.8.1 Avantages

- ❖ Une haute fiabilité, les modules sont garantis durant 25 ans par la plupart des constructeurs.
- ❖ Les panneaux solaires ne comportent pas de pièces mobiles, ce qui les rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de leur utilisation sur les engins spatiaux.
- ❖ Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ❖ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit final est non polluant, peu de déchet, pas de ligne électrique supplémentaire et pas de nuisance sonore.[9]

1.8.2 Inconvénients

- ❖ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ❖ L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- ❖ Le rendement réel de conversion d'un module est faible. [9]

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les cellules photovoltaïques qui nous permettront de mieux comprendre les prochains chapitres. Nous avons commencé par expliquer l'effet photovoltaïque qui est à l'origine de l'exploitation de l'énergie photovoltaïque. Nous avons ensuite abordé les caractéristiques d'une jonction p-n constituant le cœur des cellules solaires.

Nous sommes intéressés ensuite au silicium, qui est le matériau le plus utilisé pour l'élaboration des cellules solaires (plus de 90%) ; Nous avons présenté silicium cristallin et silicium amorphe hydrogéné qui constituent les matériaux principaux utilisés dans les cellules solaires de type HIT que nous allons étudier dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Etude des cellules HIT sur substrat n

2.1 Introduction

La technologie des cellules solaires à hétérojonctions silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H)/silicium cristallin (c-Si) consiste à déposer des couches de silicium amorphe sur des substrats de silicium cristallin ce qui présente l'avantage de fabriquer des cellules solaires

La physique des hétérojonctions à base de silicium amorphe/cristallin pour application photovoltaïque manque actuellement de clarté sur l'intérêt de l'utilisation d'un substrat de type p ou de type n. L'hétérojonction sur substrat de type n développée par l'entreprise Japonaise Sanyo possède actuellement de plus hauts rendements de conversion que l'hétérojonction sur substrat de type p étudiée en Europe, sachant que SANYO a déposé un brevet sur la structure sur substrat n et n'a publié aucune comparaison théorique ou expérimentale entre les deux structures. [18]

La cellule solaire HIT est constituée de plaquettes hybrides monocristallines recouvertes d'une fine couche de silicium amorphe. Ce processus moderne de production permet la fabrication des cellules solaires d'une efficacité supérieure à celle des cellules en silicium amorphe et d'un rendement d'énergie optimisé. [8]

Dans ce chapitre nous présenterons l'hétérojonction HIT et le modèle de base d'Anderson. Nous aborderons ensuite la densité d'états dans le silicium amorphe hydrogéné (a : si : H), ainsi que son diagramme de bande. Puis nous détaillerons les paramètres photovoltaïques qui servent à caractériser une cellule solaire. En dernier, nous présenterons le modèle de simulation utilisé ainsi que le logiciel ASDMP que nous utiliserons pour réaliser nos simulations.

2.2 Historique des cellules à hétérojonction a-Si: H/c-Si

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. Ces derniers 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 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. 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. 2.1 la première réalisation de Sanyo où TCO signifie Transparent Conductive Oxide.

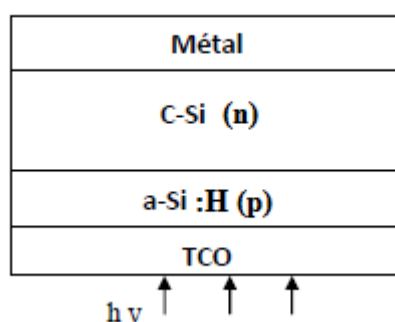


Figure 2.1 - Schéma de la première cellule solaire à simple hétérojonction de l'entreprise Sanyo.

2.3 L'évolution des cellules HIT

L'évolution des performances des cellules fabriquées par Sanyo en fonction des technologies introduites dans le procédé de fabrication est résumée dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Evolution des performances de cellules HIT fabriquées par Sanyo sur substrat n sont résultats ont été obtenus sur des cellules se 1 cm^2 [12]

| Substrat de type c -si(n) (cz) | $\eta\%$ | ref |
|---|----------|------|
| ITO/a-si : H(p) /c-si(n)/métal | 12,3 | [16] |
| ITO/a-si : H(p)/a-si : H(i) /c-si(n)/métal | 14,8 | [16] |
| ITO/a-si : H(p)/a-si : H(i) /c-si(n)/BSF/métal + Texturation | 18,7 | [17] |
| ITO/a-si : H(p)/a-si : H(i) /c-si(n)/a-si : H(i)/a-si : H(n+)/métal + Texturation | 20,0 | [16] |

2.4 Principe d'une Hétérojonction HIT: (Hétérojonction with Intrinsic Thin layer)

L'ajout de couche de silicium amorphe hydrogéné de plus grand gap à la suite d'une couche de plus petit gap (exemple : silicium cristallin) mène à la formation d'une hétérojonction. La zone fortement dopée constituant l'émetteur dans une homojonction est remplacée par un matériau de grande largeur de bande interdite. Le grand gap optique du silicium amorphe par rapport à celui du silicium cristallin permet de réduire les pertes par absorption et sachant que les couches dopées ont des propriétés telles que les porteurs photogénérés se recombinent rapidement, la discontinuité de bande empêche les électrons de rétrodiffuser et diminue ainsi les pertes par recombinaison. La structure finale dépend de plusieurs paramètres des deux matériaux en contact qui sont : la valeur des largeurs de bandes interdites E_{g1} et E_{g2} , les affinités électroniques χ_1 et χ_2 et les niveaux de dopage.

Les propriétés de transport des porteurs dans les hétérojonctions sont généralement dominées par des phénomènes de piégeage au niveau de l'interface entre la région n et la région p. Le modèle d'Anderson a généralisé le modèle dérive-diffusion aux hétérojonctions [10]. La figure 2.2 montre le diagramme de bandes d'une hétérojonction en équilibre thermodynamique.

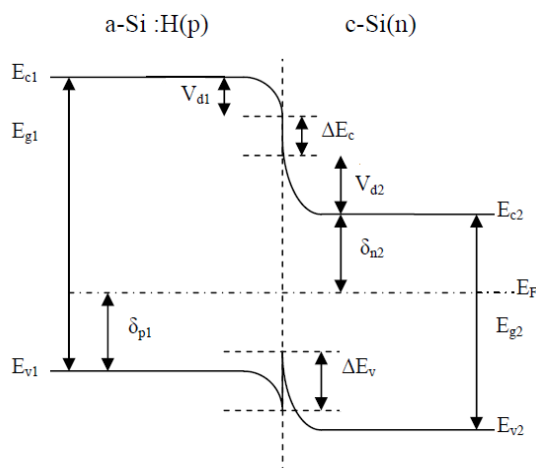


Figure 2.2 – Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si:H(p)/c-Si(n)

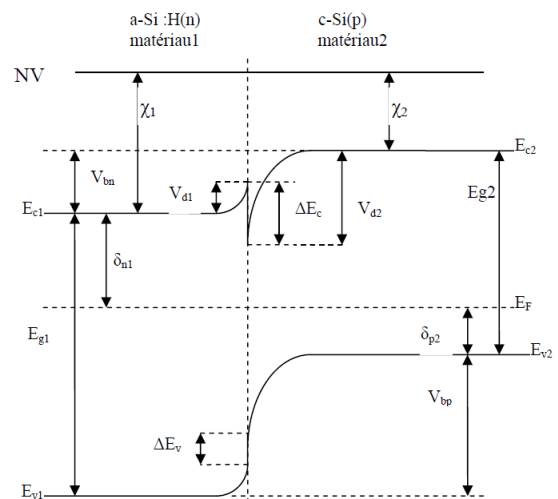


Figure 2.3 – Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p)

2.5 Le modèle de base d'Anderson

Le modèle d'Anderson (1960) sert de point de départ aux autres modèles d'hétérojonction. Le principe du modèle repose sur la prise en compte des propriétés électroniques des matériaux utilisés : permittivité électrique, affinité électronique et largeur de la bande interdite E_g . Les différences entre les valeurs de E_{g1} , E_{g2} et les affinités électroniques χ_1, χ_2 engendrent une discontinuité au niveau du raccordement des bandes de conduction et de valence ΔE_c et ΔE_v . Le modèle d'Anderson ne prend pas en considération les états d'interface et s'appuie sur l'hypothèse que le transport du courant se fait par injection dans les régions quasi-neutres ou bien par recombinaison/génération dans la zone de charge d'espace (ZCE). En faisant l'hypothèse que les quasi-niveaux de fermi ne varient pas à travers la zone de déplétion comme pour une homojonction, on obtient les relations suivantes pour une cellule solaire à hétérojonction de type n: [12]

Les discontinuités de bandes ΔE_c et ΔE_v sont données par:

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

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

Calcul du potentiel induit :

$$qV_d = qV_{d1} + qV_{d2} = E_{g2} - \delta_{n2} - \delta_{p1} + \Delta E_v \quad (2.3)$$

Avec :

V_{d1}, V_{d2} : Tensions de diffusion de chaque région

δ_n, δ_p : Les énergies d'activation. $\delta_n = E_c - E_f$, $\delta_p = E_f - E_v$

2.6 La densité d'états dans le silicium amorphe hydrogéné

A cause des distorsions et des liaisons pendantes qui existent dans le silicium amorphe hydrogéné, il existe des états localisés qui se trouvent dans le gap. Ces états localisés sont représentés par des queues de bandes engendrées par la distorsion du silicium amorphe et des gaussiennes engendrées par les liaisons pendantes.

2.6.1 Queues de bande

Les états qui débordent de la bande de valence et qui sont donc donneurs sont notés (D^{+0}) et modélisés par :

$$g_{DT}(E) = G_{D0} \exp [- E / E_D] \quad (2.4)$$

E est mesuré à partir de E_V

Ceux qui débordent de la bande de conduction et qui sont donc accepteurs sont notés (D^{-0}) et modélisés par :

$$g_{AT}(E') = G_{A0} \exp [- E' / E_A] \quad (2.5)$$

E' est mesuré à partir de E_C

g est la densité d'états ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$).

G_{D0} est le pré facteur de l'exponentielle relative à la queue de bande débordant de la bande de valence et E_D est son énergie caractéristique

De même, G_{A0} est le pré facteur de l'exponentielle relative à la queue de bande débordant de la bande de conduction et E_A est son énergie caractéristique [11]

2.6.2 Etats du centre du gap

2.6.2.1 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} (figure 2.4), Cette région plate est alors ajoutée à la région exponentielle des queues de bandes pour ainsi compléter le modèle en U. [13]

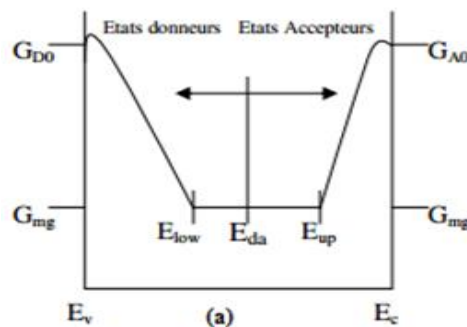


Figure 2.4 - Distribution des états localisés selon le modèle en U (U-shaped model).

2.6.2.2 Modèle des gaussiennes

Dans ce modèle, les états au centre du gap sont distribués selon deux gaussiennes. (Figure 2.5), Dans le cas du silicium amorphe (a-si: H), la séparation en énergie entre les deux pics est estimée à 0.5eV. Elle s'appelle l'énergie de corrélation.

La gaussienne située au dessus de E_{da} est composée d'états accepteurs ($D^{-/0}$) de densité N_{AG} . Celle située au dessous de E_{da} est composée d'états donneurs ($D^{+/0}$) de densité N_{DG} .

Les deux gaussiennes ont les expressions suivantes :

$$g_{AG}(E'') = \left(\frac{N_{AG}}{\sqrt{2\pi} \sigma_{AG}} \right) \exp \left\{ -\frac{(E'' - E_{AG})^2}{2\sigma_{AG}^2} \right\} \quad (2.6)$$

$$g_{DG}(E''') = \left(\frac{N_{DG}}{\sqrt{2\pi} \sigma_{DG}} \right) \exp \left\{ -\frac{(E''' - E_{DG})^2}{2\sigma_{DG}^2} \right\} \quad (2.7)$$

E_{AG} (E_{DG}) est la position du pic de la gaussienne relative aux états accepteurs (donneurs) Mesurée à partir de la bande de conduction (valence).

σ_{AG} , σ_{DG} Sont respectivement les déviations des gaussiennes des accepteurs et des donneurs.

E'' et E''' sont mesurées respectivement à partir des pics E_{AG} et E_{DG} . [11]

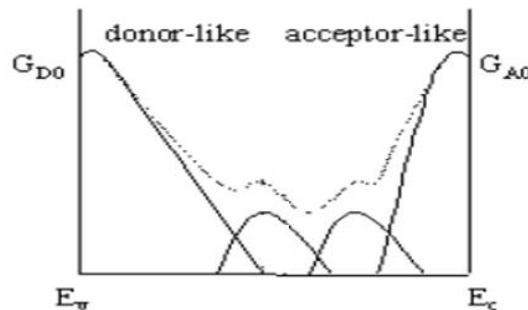


Figure 2.5 - Distribution des états localisés selon le modèle en gaussiennes

2.6.3 Diagramme de bande du silicium amorphe

Le diagramme de bande du silicium amorphe est représenté dans la figure (2.6). Dans les bandes, les états sont étendus (les porteurs participent à la conduction) et une queue de bande se prolonge dans la bande interdite. Les états dans ces queues sont localisés. Ils participent à l'absorption. Pour cela, le gap optique est légèrement inférieur au gap de mobilité. Toutefois, la différence n'est que de l'ordre de 0,1eV. Les queues de bandes sont modélisées par une exponentielle. La largeur de la queue de bande de valence est plus large que celle de la queue de bande de conduction, ce qui explique le fait que le dopage de type p

est plus difficile dans le a-Si: H (il y'a plus d'états localisés dans lesquels les trous libérés par les atomes trivalents préfèrent se mettre). Les défauts profonds dus aux liaisons pendantes peuvent être modélisés par deux gaussiennes (l'une pour les défauts de caractère accepteur D_{0^-} , l'autre de caractère donneur D_{+0}). Un autre modèle a été développé, le modèle du réservoir de défauts (defect-pool model). Ce modèle n'impose pas un seul type de défaut à un niveau d'énergie donné, mais considère que les défauts peuvent être chargés +, 0,- sur toute une gamme d'énergie.

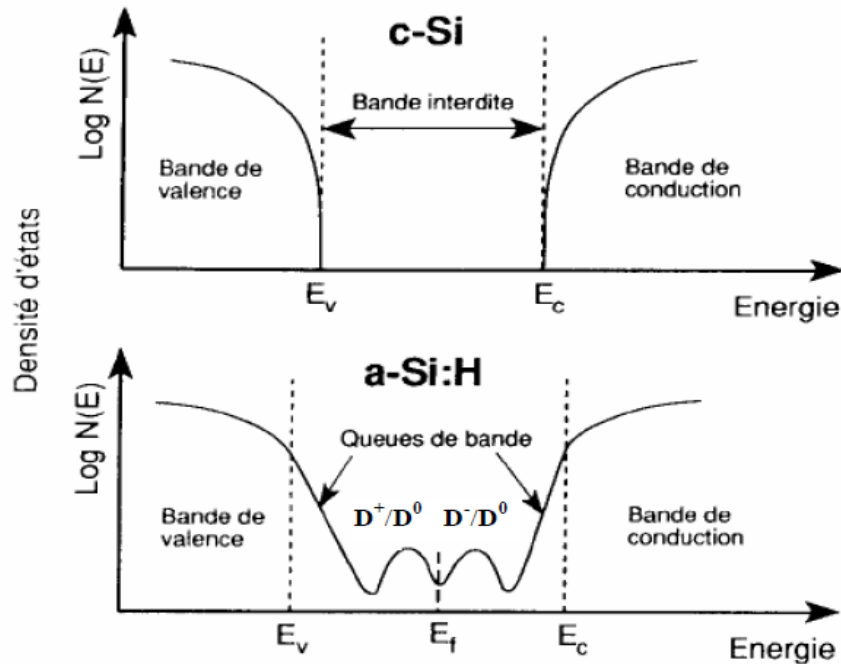


Figure 2.6 - Diagramme de bande du silicium cristallin et du silicium amorphe hydrogéné.

2.7 Les paramètres photovoltaïques

La principale technique qui permet la caractérisation d'une cellule solaire est la caractéristique $I=f(V)$, à partir de laquelle nous pouvons déduire les paramètres photovoltaïques que nous allons présenter dans le prochain paragraphe.

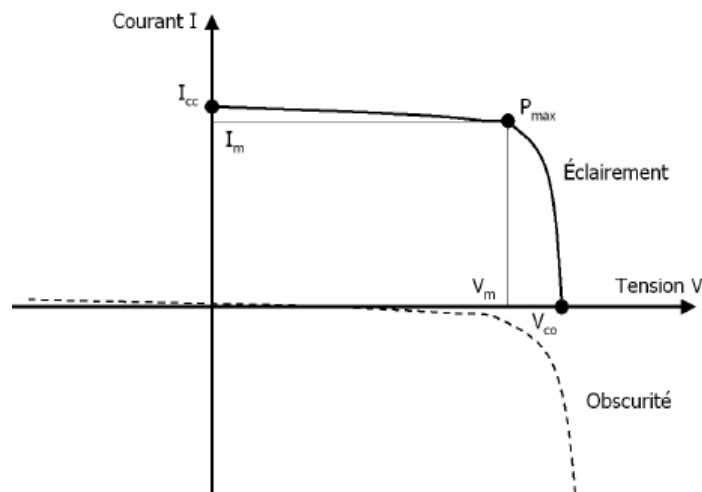


Figure 2.7 - caractéristique I-V d'une cellule solaire sous obscurité et sous éclairément

2.7.1 La densité du court-circuit(J_{cc})

C'est la densité de courant à une tension, aux bornes de la cellule solaire, nulle ($v=0$). Sa valeur peut être déterminée à partir du spectre solaire et du rendement quantique de la cellule solaire par l'équation suivant :

$$J_{cc} = q \int F(\lambda) \{1 - R(\lambda)\} IQE(\lambda) d\lambda \quad (2.8)$$

Où $F(\lambda)$ est la densité du flux incident sur unité de surface par unité de temps.

$R(\lambda)$ est

le coefficient de réflexion à partir de la surface supérieure et IQE est le rendement quantique interne de la cellule solaire (seuls les photons qui ne sont pas réfléchis sont considérés dans la valeur de IQE)[10]

2.7.2 Tension de circuit ouvert V_{co}

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

Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donné par ; [9]

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \approx \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (2.9)$$

Avec :

$\frac{kT}{q}$: Le potentiel thermodynamique

T : La température absolue

q : La constante de charge d'électron, $1,602 \cdot 10^{-23} \text{C}$

K : La constante de Boltzmann, $1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$

I_{ph} : Le photo-courant.

I_S : Le courant de saturation

n : facteur d'idéalité.

2.7.3 Facteur de Forme FF

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

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} V_{co}} \quad (2.10)$$

2.7.4 Rendement de conversion η

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est donné par le rapport entre la puissance débitée au point de puissance maximale et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} \quad (2.11)$$

Où : est la puissance P_i incidente du rayonnement solaire au sol. [9]

2.8 Les différentes couches de la cellule silicium à hétérojonctions

2.8.1 L'oxyde transparent conducteur

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 (**I**ndium **T**in **O**xide) est l'oxyde transparent conducteur le plus connu et aussi le plus utilisé. L'ITO possède en effet d'excellentes propriétés : transparence supérieure à 80 % voire 90 % sur le spectre visible, résistivité faible de $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ à $5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ pour les meilleurs ITO mais pouvant excéder $5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ pour des ITO médiocres, et une très bonne adhérence sur une multitude de Substrats.

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. [9]

2.8.2 L'émetteur

L'émetteur est constitué par une fine couche de silicium amorphe hydrogéné de dopage opposé au dopage du substrat. 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. [4]

2.8.3 Couche intrinsèque a-Si : H(i)

En insérant une couche a-Si:H non dopé (intrinsèque) entre le substrat c-Si et la couche de a-Si:H dopée on augmente considérablement la passivation de surface et donc la V_{co} de la cellule. La faible épaisseur de cette couche de a-Si:H intrinsèque dite « tampon » ne perturbe pas le champ électrique tout en diminuant la densité des défauts à l'interface.

2.8.4 Absorbeur c-Si « substrat » de type n ou p

L'absorbeur, appelé également couche active, est réalisé à partir de silicium cristallin sur une épaisseur $\sim 300\mu\text{m}$. C'est dans cette couche que la transformation des photons incidents en paires électrons/ trous est réalisée. Le silicium cristallin étant un matériau qui présente peu de défaut, le taux de recombinaison y est faible, induisant une bonne génération de courant photogénéré.

La plupart des cellules solaires HIT à haut rendement ont été fabriquées avec des substrats en silicium cristallin c-Si de type n. Par la suite des laboratoires Européens ont mis au point des cellules HIT de type p (C'est-à-dire avec un substrat en c-Si dopé p) mais avec des rendements moins intéressants [8].

2.8.5 Le BSF

Le BSF (Back Surface Field) 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.

2.8.6 Les contacts

Les contacts métalliques sont placés sur les deux faces de la cellule pour les structures standards représentées sur (la figure 2.7). Ces contacts permettent de collecter le courant photo généré. Les contacts métalliques de type ohmique constituent un cas idéal car le maximum de courant sera collecté avec ce type de contact. Outre un choix de métal donnant des contacts ohmiques, il est aussi important d'avoir des résistances de contact le plus faible possible.

La métallisation de la face avant résulte d'un compromis entre taux d'ombrage et résistances série. En effet, diminuer le taux d'ombrage se traduit par un courant élevé puisque plus de photons pénètrent dans la cellule mais cela suppose d'un autre côté d'avoir des doigts de métallisation moins larges et donc une augmentation des résistances série. [4]

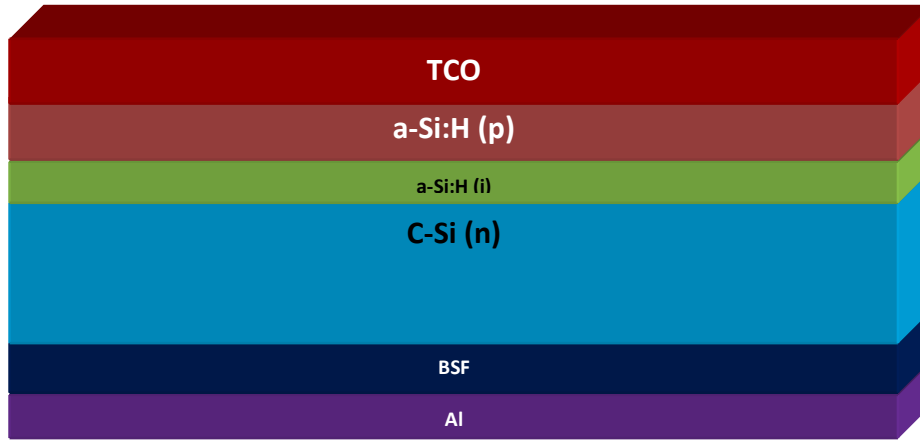


Figure 2.8 - Structure d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si: H(p) / c-Si.

2.9 Description du modèle de simulation

Pour analyser les propriétés optoélectroniques d'un dispositif, ses propriétés électriques et optiques doivent être étudiées. Le modèle de simulation utilisé est constitué d'un modèle électrique et d'un modèle optique.

La partie électrique du modèle, résout simultanément l'équation de Poisson (2.12) et les équations de continuité des trous (2.13) et des électrons (2.14) qui sont résolues simultanément dans des conditions d'état d'équilibre et hors équilibre. Ces équations sont :

$$\text{L'équation de Poisson : } \frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad (2.12)$$

$$\text{L'équation de continuité des trous : } G(x) - R(p(x), n(x)) - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p(x)}{\partial x} = 0 \quad (2.13)$$

$$\text{L'équation de continuité des électrons : } G(x) - R(p(x), n(x)) + \frac{1}{q} \frac{\partial J_n(x)}{\partial x} = 0 \quad (2.14)$$

$$\text{La densité de charge effective : } \rho(x) = q[p(x) - n(x) + p_T(x) - n_T(x) + N_{net}^+] \quad (2.15)$$

$$\text{Le champ électrique : } E = \frac{\partial \Psi(x)}{\partial x} \quad (2.16)$$

ε représente la constante diélectrique, E le champ électrique, $\Psi(x)$ le potentiel électrostatique, x la position dans le dispositif, p et n les densités des trous et des électrons dans la bande de valence et de conduction, q la charge électronique, R le taux de recombinaison, p_T et n_T la densité des trous et des électrons piégés respectivement, N_{net}^+ la

densité de dopage effective, G le taux de génération de paires électron-trou, J_p et J_n les densités de courant des trous et des électrons respectivement et E_{F_p} et E_{F_n} les quasi niveaux de Fermi des trous et des électrons.[19]

2.10 Méthode de résolution

A l'équilibre thermodynamique, il n'y a que l'équation de Poisson à résoudre (équation 2.12). Il s'agit d'une équation différentielle non linéaire du second ordre.

Hors l'équilibre thermodynamique, les variables inconnues sont : $\psi(x)$, E_{F_p} et E_{F_n} . L'équation de Poisson $\psi = \psi(x)$ et les équations de continuité sont résolues simultanément à partir de la méthode des différences finies et de Newton-Raphson afin d'obtenir le potentiel électrostatique, et le quasi-niveau de Fermi des trous et des électrons à tout point dans le dispositif. [19]

2.11 Les logiciels de simulation

2.11.1 PC1D, AMPS-1D, AFORS-HET

La modélisation du silicium amorphe a commencé au début des années 80. Les logiciels couramment utilisés dans le domaine photovoltaïque pour la simulation du silicium cristallin comme PC1D ne conviennent pas au silicium amorphe (impossibilité de simuler les queues de bande et les liaisons pendantes).

Ainsi, plusieurs laboratoires ont développé leur propre logiciel de simulation. Les plus connus sont AMPS-1D développé à l'Université de Pennsylvanie par l'équipe du Professeur Fonash, D-AMPS qui est une version plus détaillée que AMPS-1D car elle prend en compte la réflectivité et texturation de surface des faces avant et arrière et simuler la densité de défauts du silicium amorphe en implantant le « defect pool model » contrairement aux autres logiciels qui représentent la distribution de défauts liés aux liaisons pendantes par deux gaussiennes.

D'autres logiciels sont apparus par la suite comme le logiciel ASPIN de l'Université de Ljubljana (Smoke et Furlan 1992), ASA de l'Université Technologique de Deflet (Zeman et al, 1997) et enfin le logiciel AFORS-HET conçu spécialement pour simuler les hétérojonctions silicium amorphe/cristallin. Il permet la simulation 1D d'un dispositif

reposant sur les mécanismes de recombinaisons de type SRH et Auger à l'équilibre thermodynamique et sous éclairage. La distribution des états du silicium amorphe peut être modélisée en accord avec le modèle standard (décroissance exponentielle des queues de bandes et distribution gaussienne des défauts profonds). Les caractéristiques internes de la cellule tels que le diagramme de bandes, les taux de génération de caractérisations peuvent aussi être simulés : courant-tension (I-V), photo-tension de surface (surface photo-voltage (SPV)), photo-électro luminescence (PEL), spectroscopie d'impédance (IMP), capacité-tension (C-V), capacité- température (C-T) et capacité- fréquence (C-f). [19]

2.11.2 ASDMP

Le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modeling Program), a été développé par P.Chatterjee et validé par l'équipe de recherche du laboratoire LPICM (Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces) de l'école Polytechnique de Paris.

Il comprend deux parties : une partie électrique basée sur l'équation de Poisson et les équations de continuité, et une partie optique qui tient compte des réflexions multiples, des interférences et de la diffusion par les interfaces rugueuses.

ASDMP nous permet donc de simuler des cellules élaborées par Sanyo et présentant des texturations. Il est à une dimension, et il analyse les propriétés de transport en fonction de la position dans tout le dispositif, celui-ci étant constitué de plusieurs matériaux.

Ce logiciel a été conçu au début pour modéliser des dispositifs à base de silicium amorphe. Il a été ensuite généralisé au silicium cristallin et aux cellules HIT. Il comprend une partie électrique, et une autre partie optique.

La première se compose d'un programme détaillé qui repose sur les équations de continuité pour les électrons et les trous, et l'équation de Poisson. Il simule les caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclairage et la réflexion spectrale. Il détermine le champ électrique dans tout le dispositif, le taux de recombinaison, la densité des porteurs libres et piégés par les états du gap et la densité des électrons et des trous en fonction de la position.

Le modèle permet d'analyser l'influence de différents paramètres et leur impact sur la performance de la cellule. Il aide à déterminer les différentes directives à suivre pour optimiser les dispositifs. Ainsi, il permet d'économiser le temps et le coût de l'expérience.

Le programme peut être appliqué à un dispositif général de plusieurs couches dont les propriétés du matériau varient avec la position. Les différentes couches peuvent être cristallines, amorphes, poly cristallines ou multi cristallines.

L'aspect optique peut être décrit par une loi d'absorption exponentielle simple. Mais cette méthode néglige les réflexions multiples, le piégeage optique et la diffusion de la lumière par les rugosités. Pour cela, un modèle optique a été intégré à ASDMP. Cette dernière partie repose sur le modèle semi-empirique qui divise le flux incident en une partie diffusée par les interfaces rugueuses et une autre partie qui reste spéculaire. Le piégeage optique est obtenu à la fois par réflexion aux interfaces due au changement d'indice pour la partie spéculaire et par réflexion totale à l'interface verre-air, et la lumière piégée revient vers la structure où elle sera de nouveau diffusée.

Le modèle optique est nécessaire pour simuler des cellules solaires dont certaines interfaces sont texturées.

2.12 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'aborder les propriétés et le fonctionnement d'une cellule à hétérojonction de type HIT. Cette dernière se caractérise par un substrat cristallin sur lequel on dépose une couche de silicium amorphe hydrogéné pour constituer l'émetteur. Une fine couche de silicium intrinsèque sert de couche de passivation et permet de réduire les défauts à l'interface de la jonction pn. Cette couche a un rôle primordiale dans la cellule solaire qui réside dans l'obtention de très faibles recombinaisons en surface donc réduction des pertes optiques et la résistance série et par suite avoir un bon rendement.

D'abord, nous avons traité les cellules photovoltaïques à hétérojonctions qui 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). Ensuite nous avons présenté la distribution de la densité d'états dans le silicium amorphe hydrogéné (a : si : H), et nous avons mis en évidence l'effet de la distorsion de son réseau et des liaisons pendantes sur la création d'états localisés dans le gap.

Puis, Nous avons aussi présenté la caractéristique $I(v)$ qui est la principale technique pour caractériser une cellule solaire et nous avons défini les paramètres photovoltaïques importants pour l'étude d'une cellule.

Enfin, nous avons traité le logiciel ASDMP que nous utiliserons pour effectuer la simulation d'une cellule HIT de type n, afin d'étudier l'influence des énergies caractéristiques de la couche de l'émetteur sur le rendement de la cellule. Les résultats seront donnés et interprétés dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Résultats et discussions

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous 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 allons étudier l'influence des énergies caractéristiques de la couche p-a-Si:H sur les paramètres photovoltaïques (J_{CC} , V_{CO} , FF , η) d'une cellule solaire HIT de type n en face avant. Pour réaliser nos simulations, nous allons utiliser le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modeling Program). Dans un premier lieu, nous présentons la structure de la cellule à simuler ainsi que les paramètres utilisés dans la simulation. Ensuite, nous aborderons les résultats obtenus avec leurs discussions.

3.2 Présentation de la cellule

La Figure 3.1 représente la structure conventionnelle d'une cellule de silicium à hétérojonction où les contacts sont placés sur les deux faces de la structure.

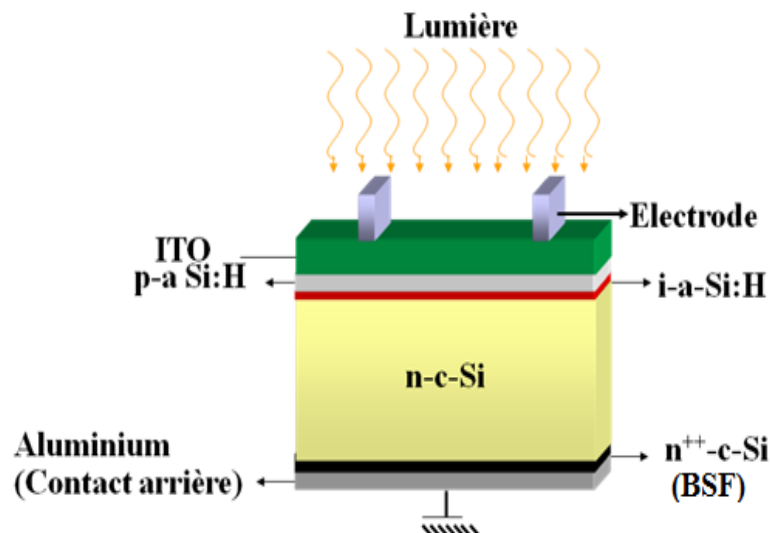


Figure 3.1- L'hétéro-structure ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/Al utilisée dans nos simulations

Sur un substrat de silicium cristallin dopé n, formant la couche active, d'une épaisseur de 300 μm , est déposé sur la face avant l'émetteur à base de silicium amorphe hydrogéné dopé p (p-a-Si :H) sur 110A° d'épaisseur, afin de créer une hétérojonction.

Entre les deux couches citées précédemment, se trouve une couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (i-a-Si :H) sur une épaisseur de 30 A°. Cette couche intrinsèque représente la spécificité des cellules HIT (Heterojunction with Intinsic Thin layer) et permet de passiver les défauts de surface existant à l'interface p-a-Si:H/n-c-Si.

Sur la face arrière de la cellule se trouve du silicium cristallin sur 1 μm fortement dopé n pour constituer le BSF (Back Surface Field) qui génère un champ électrique sur la face arrière repoussant les porteurs minoritaires vers la base et permettant ainsi une meilleure collecte des porteurs photogénérés.

Au dessus de l'émetteur est déposé un oxyde transparent conducteur à base d'ITO. Cette couche est anti-réfléchissante et permet d'établir le contact entre le silicium amorphe dopé et les contacts métalliques. Ces derniers sont placés sur les deux faces de la cellule constituant les électrodes.

Les paramètres de chaque couche sont résumés dans le tableau (3.1).

Tableau 3.1: paramètres caractéristiques de la HIT étudiée.

| Paramètres | ITO | P-a-Si :H | i-a-Si :H | n-c-Si | n-c-Si | BSF |
|---|---------|----------------------|--------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|
| D | 84 ,5nm | 110A° | 30A° | 32A° | 298.99068 μm | 1 μm |
| E_g (ev) | | 1.9 | 1.9 | 1.12 | 1.12 | 1.12 |
| N_D (cm⁻³) | | 0 | 0 | 9.10 ¹⁴ | 9.10 ¹⁴ | 5.10 ¹⁸ |
| N_A (cm⁻³) | | 2,7.10 ¹⁹ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| χ (ev) | | 3,9 | 3,95 | 4,22 | 4,22 | 4,22 |
| N_{ATOT}(cm⁻³) | | 1.10 ¹⁹ | 7.10 ¹⁴ | 1.7.10 ¹⁸ | 3.10 ¹¹ | 3.10 ¹¹ |
| N_{DTOT} (cm⁻³) | | 1.10 ¹⁹ | 7.10 ¹⁴ | 1,7.10 ¹⁸ | 3.10 ¹¹ | 3.10 ¹¹ |
| μ_n (cm²/Vs) | | 20 | 30 | 1500 | 1500 | 1450 |
| μ_p (cm²/Vs) | | 4 | 12 | 450 | 450 | 450 |
| N_c (cm⁻³) | | 1.10 ¹⁹ | 2.10 ²⁰ | 5.10 ¹⁸ | 5.10 ¹⁸ | 5.10 ¹⁸ |
| N_v (cm⁻³) | | 1.10 ¹⁹ | 2.10 ²⁰ | 5.10 ¹⁸ | 5.10 ¹⁸ | 5.10 ¹⁸ |

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.

N_V : densité d'état dans la bande de valence.

N_C : densité d'état dans la bande de conduction.

3.3 Les énergies caractéristiques E_D et E_A

Dans le silicium amorphe, des états localisés continus dans le gap existent. Ces états proviennent des queues de bande, qu'on appelle également « queues d'Urbach » et qui sont représentées par des courbes exponentielles et des liaisons pendantes qui sont représentées par des Gaussiennes.[18]

Dans le modèle de simulation utilisé, les défauts profonds dus aux liaisons pendantes sont modélisés par deux gaussiennes (l'une pour les défauts de caractère accepteur $D^{0/-}$, l'autre de caractère donneur $D^{+/0}$).

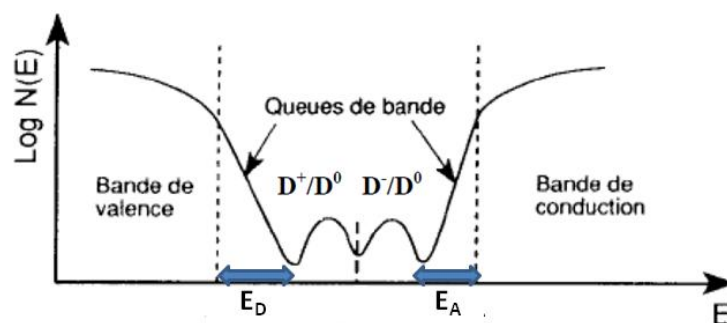


Figure 3.2 Les énergies caractéristiques E_A et E_D dans le silicium amorphe hydrogéné.

Sur la figure 3.2, nous pouvons voir que les énergies caractéristiques E_D et E_A , sont la largeur des courbes exponentielles de la bande de valence et de la bande de conduction respectivement.

Ces queues de bande sont régies par les équations suivantes:[18]

$$g_{DT}(E) = G_{D0} \exp [- E / E_D] \quad (3.1)$$

$$g_{AT}(E') = G_{A0} \exp [- E' / E_A] \quad (3.2)$$

g représentant la densité d'états (D.O.S ($\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1}$)).

E est mesuré à partir de E_v

E' est mesuré à partir de E_c

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

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

3.4 Résultats et discussions

Dans un premier temps, nous avons étudié la sensibilité de la caractéristique $J = f(V)$ sous éclairissement aux énergies E_D et E_A , qui représentent les énergies caractéristiques des queues d'Urbach de la bande de valence et de conduction du silicium amorphe hydrogéné qui constitue l'émetteur dans la structure ITO/p-a-Si:H /i-a-Si:H /n-c-Si/Al.

3.4.1 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de valence E_D sur la performance de la cellule

Nous avons fait varier l'énergie caractéristique de la bande de valence E_D de 0.01 eV à 0.09 eV sous condition STC. La variation des paramètres photovoltaïques en fonction de E_D est donnée dans le tableau 3.2.

Tableaux 3.2 - Variation des paramètres de sortie de la cellule en fonction de l'énergie caractéristique de la bande de valence (E_D)

| E_D (ev) | J_{cc} (mA/cm ²) | V_{CO} (V) | FF | η (%) |
|------------|--------------------------------|--------------|------|------------|
| 0.01 | 33.60 | 0.70 | 0.80 | 18.64 |
| 0.02 | 33.60 | 0.70 | 0.80 | 18.62 |
| 0.03 | 33.60 | 0.70 | 0.80 | 18.59 |
| 0.04 | 33.60 | 0.69 | 0.79 | 18.55 |
| 0.05 | 33.60 | 0.69 | 0.79 | 18.48 |
| 0.06 | 33.60 | 0.69 | 0.79 | 18.39 |
| 0.07 | 33.60 | 0.69 | 0.78 | 18.32 |
| 0.08 | 33.60 | 0.69 | 0.77 | 17.96 |
| 0.09 | 33.60 | 0.69 | 0.74 | 17.34 |

Nous avons représenté la variation des paramètres photovoltaïques (Densité de courant de court circuit J_{cc} , tension de circuit ouvert V_{co} , facteur de forme FF et rendement η) sous éclairement de la structure ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al en fonction de E_D .

3.4.1.1 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de valence E_D sur la densité de courant de court circuit.

La figure 3.3. représente la variation de la densité de courant de court circuit en fonction de l'énergie caractéristique de la bande de valence du silicium amorphe hydrogéné. Nous remarquons que ce paramètre n'est pas affecté par la modification de l'énergie caractéristique E_D .

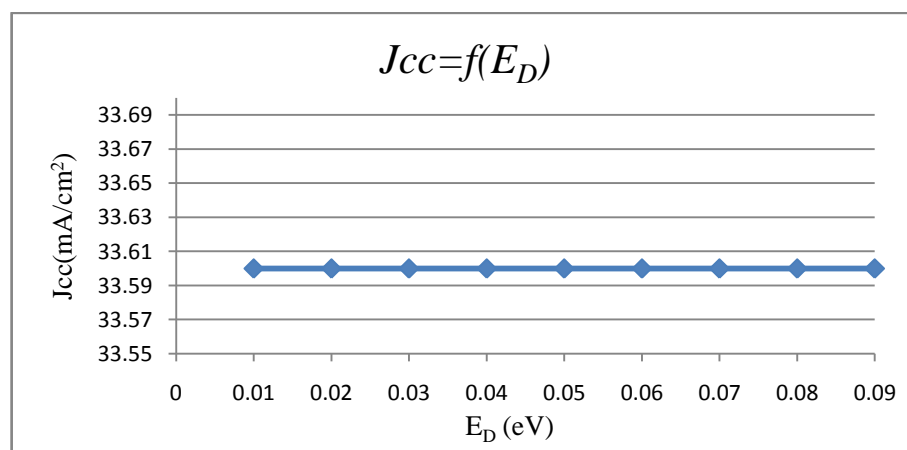


Figure 3.3 - La densité de courant de court circuit en fonction de E_D

3.4.1.2 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de valence E_D sur la tension de circuit ouvert

Sur la figure 3.4, nous représentons la variation de la tension en circuit ouvert en fonction de E_D . Nous remarquons qu'à partir de $E_D=0.04$ eV, la V_{co} décroît de 70mV à 69mV et se stabilise à cette valeur.

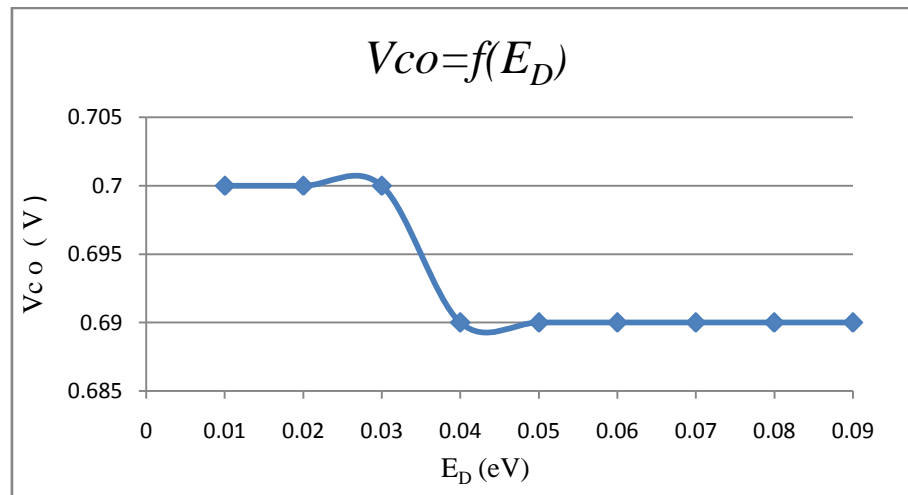


Figure 3.4 La Tension de circuit ouvert en fonction de E_D

3.4.1.3 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de valence E_D sur le facteur de forme

La figure 3.5. représente la variation du facteur de forme (FF) en fonction de l'énergie caractéristique de la bande de valence du silicium amorphe hydrogéné. Nous remarquons qu'avec l'augmentation de l'énergie caractéristique de la bande de valence E_D , le facteur de forme diminue progressivement de 0.80 à 0.74.

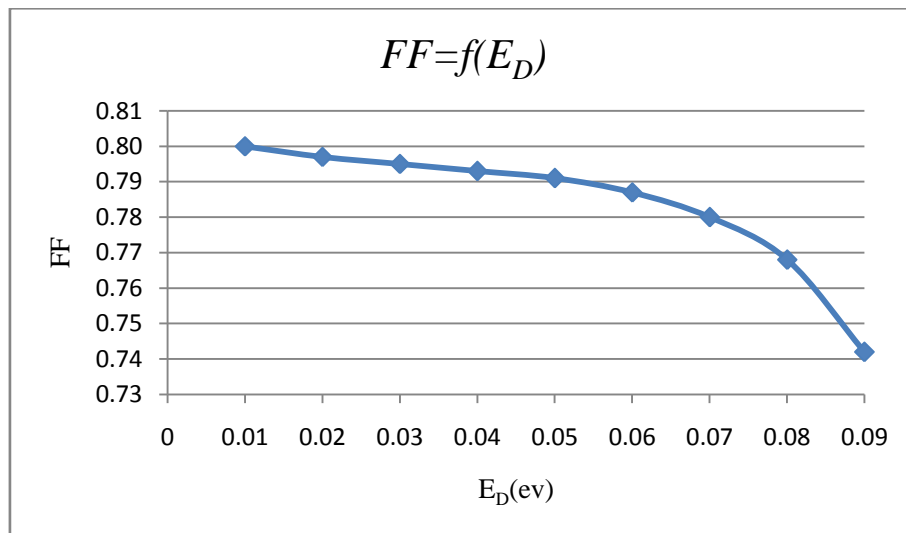


Figure 3.5 - Le facteur de forme en fonction de E_D

3.4.1.4 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de valence E_D sur le Rendement

La figure 3.6. représente la variation du rendement en fonction de l'énergie caractéristique de la bande de valence du silicium amorphe hydrogéné formant l'émetteur. Nous remarquons qu'avec l'augmentation de l'énergie caractéristique de la bande de valence E_D , le rendement diminue de 18,6% à 17,3%.

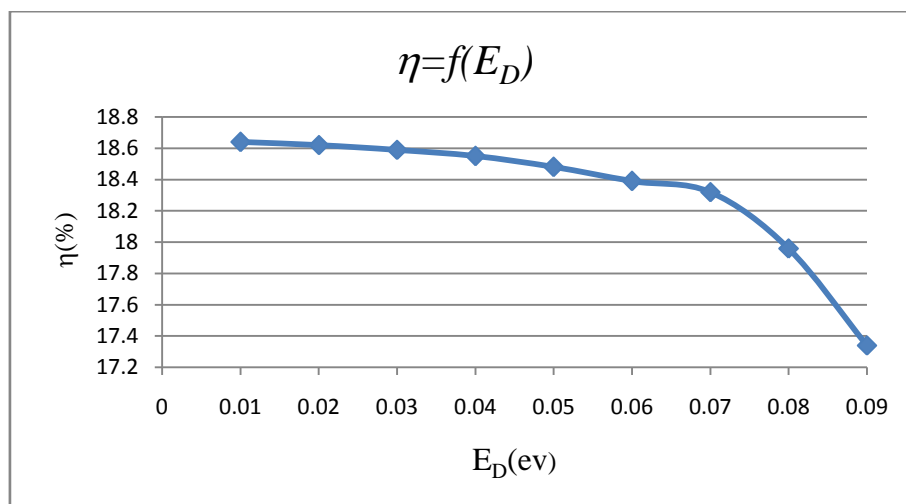


Figure 3.6 - Rendement en fonction de E_D

D'après les graphes des figures (3.3, 3.4, 3.5 et 3.6) nous pouvons faire les constatations suivantes :

La densité de courant de court circuit n'est pas affectée par la variation de E_D , car elle est principalement dépendante de la densité de l'éclairage et non pas du matériau utilisé.

La tension en circuit ouvert décroît faiblement à la croissance de E_D , cependant c'est le facteur de forme qui est le plus sensible à la variation de E_D , entraînant ainsi la variation du rendement et sa diminution de 18,6% pour $E_D=0.01$ eV à 17,3%.pour $E_D=0.09$ eV.

Le facteur de forme est un paramètre important qui sert à qualifier la qualité d'une cellule solaire, et il exprime le nombre de porteurs collectés. Sa diminution implique une faible collecte des porteurs photogénérés, qui peut être expliquée par un fort taux de recombinaisons.

Pour conforter cette hypothèse, nous avons tracé, sur la figure 3.7, la variation du taux de recombinaison en fonction de la position dans la cellule pour les deux valeurs extrêmes de E_D (0.01 eV et 0.09 eV).

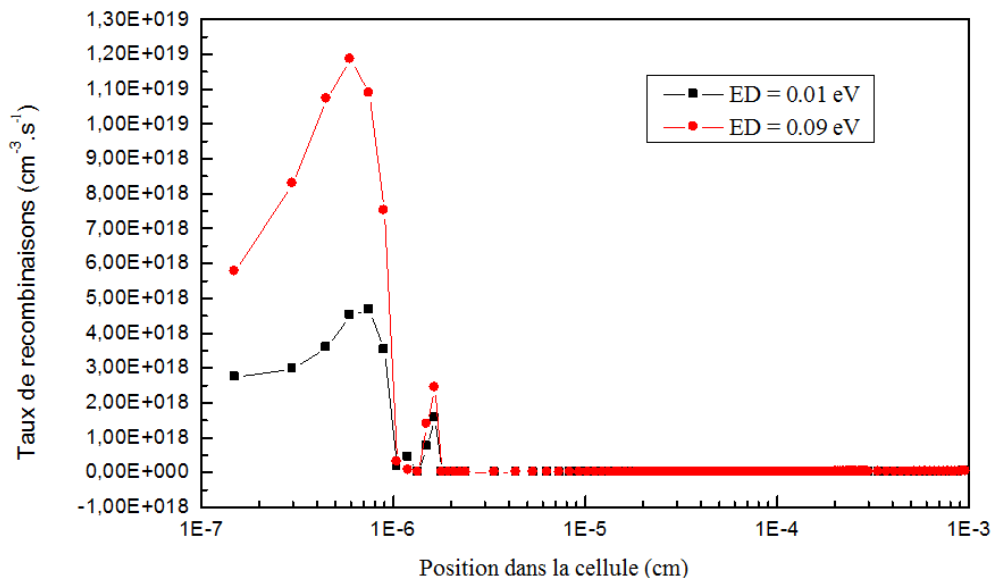


Figure 3.7 - Taux de recombinaisons en fonction de la position dans la structure a-Si :H(p)/a-Si :H(i)/c-Si(n)/Al pour deux valeurs de E_D

Nous pouvons constater à partir de la figure 3.7 que le taux de recombinaisons augmente au niveau de l'émetteur et passe de $4.5.10^{18}$ cm⁻³.s⁻¹ pour $E_D=0.01$ eV à $1.2.10^{19}$ cm⁻³.s⁻¹ pour $E_D=0.09$ eV. Ce qui confirme l'interprétation donné précédemment.

Donc, lorsque l'énergie caractéristique E_D augmente, les densité des états donneurs par unité de volume dans le gap augmente et favorisent les recombinaisons des trous dans la couche fenêtre, réduisant ainsi la performance des cellules étudiées

3.4.2 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de conduction E_A sur la performance de la cellule

De la même manière, nous avons étudié l'influence de la variation de l'énergie caractéristique de la bande de conduction E_A sur la caractéristique $I(V)$.

En faisant varier E_A de 0.01 eV à 0.09 eV sous les mêmes conditions STC, nous obtenons les résultats représentés dans le tableau 3.3 :

Tableau 3.3 - Variation des paramètres de sortie de la cellule en fonction de l'énergie caractéristique de la bande de conduction (E_A)

| E_A (eV) | J_{cc} (mA /cm ²) | V_{co} (V) | FF | η (%) |
|------------|---------------------------------|--------------|-------|------------|
| 0.01 | 33.57 | 0.696 | 0.791 | 18.48 |
| 0.02 | 33.57 | 0.696 | 0.791 | 18.48 |
| 0.03 | 33.57 | 0.696 | 0.791 | 18.48 |
| 0.04 | 33.57 | 0.696 | 0.791 | 18.48 |
| 0.05 | 33.57 | 0.696 | 0.791 | 18.48 |
| 0.06 | 33.57 | 0.696 | 0.791 | 18.48 |
| 0.07 | 33.57 | 0.696 | 0.791 | 18.48 |
| 0.08 | 33.57 | 0.696 | 0.791 | 18.48 |
| 0.09 | 33.57 | 0.696 | 0.791 | 18.48 |

Nous avons représenté les paramètres photovoltaïques (Courant de court circuit J_{cc} , tension de circuit ouvert V_{co} , facteur de forme FF et rendement η) sous éclairage de la structure ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/Al en fonction de E_A .

3.4.2.1 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de conduction E_A sur la densité de courant de court circuit

La figure 3.8. représente la variation de la densité de courant de court circuit (J_{CC}) en fonction de l'énergie caractéristique de la bande de conduction E_A . Nous remarquons que ce paramètre n'est pas affecté par la modification de E_A . Comme cité plus haut, la densité de courant de court circuit est sensible à la variation de l'irradiation incidente.

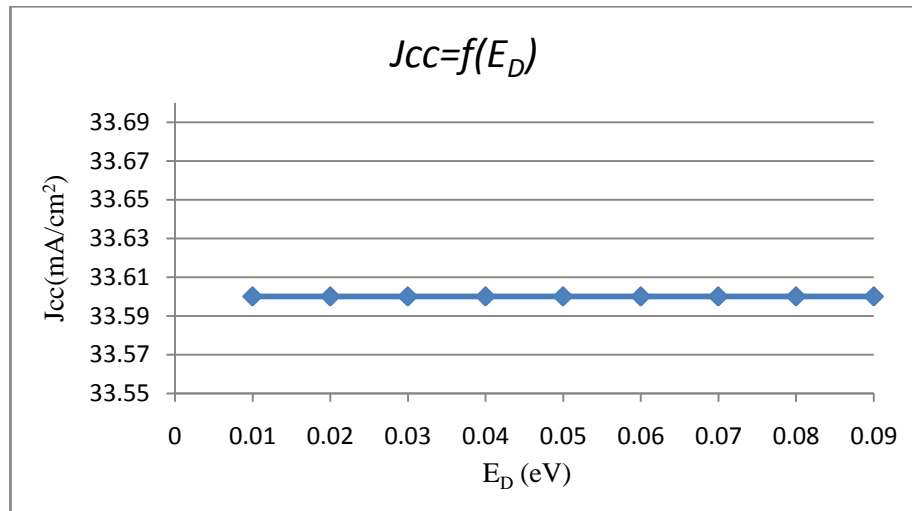


Figure 3.8 - La densité de courant de court circuit en fonction de E_A

3.4.2.2 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de conduction E_A sur La tension en circuit

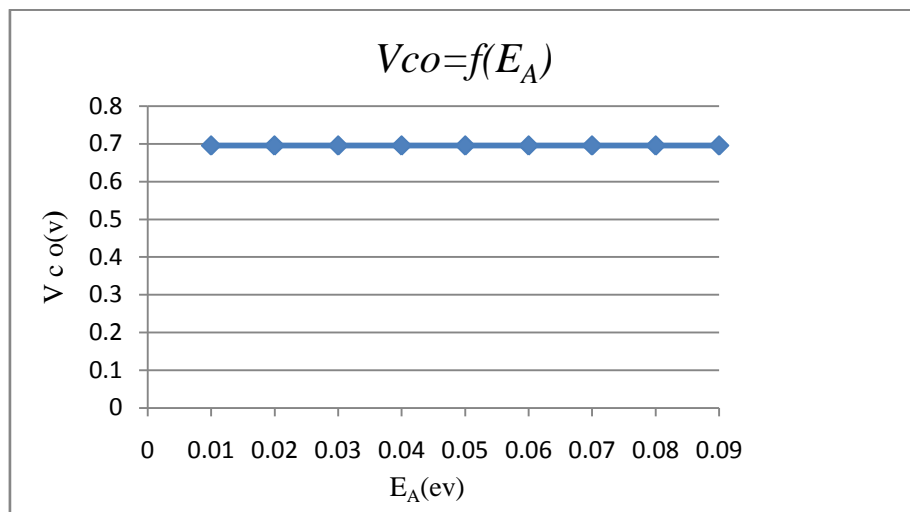


Figure 3.9 - La Tension de circuit ouvert en fonction de E_A

La tension en circuit ouvert (V_{CO}) n'est également pas affecté par la variation de l'énergie caractéristique E_A

3.4.2.3 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de conduction E_A sur Le facteur de forme

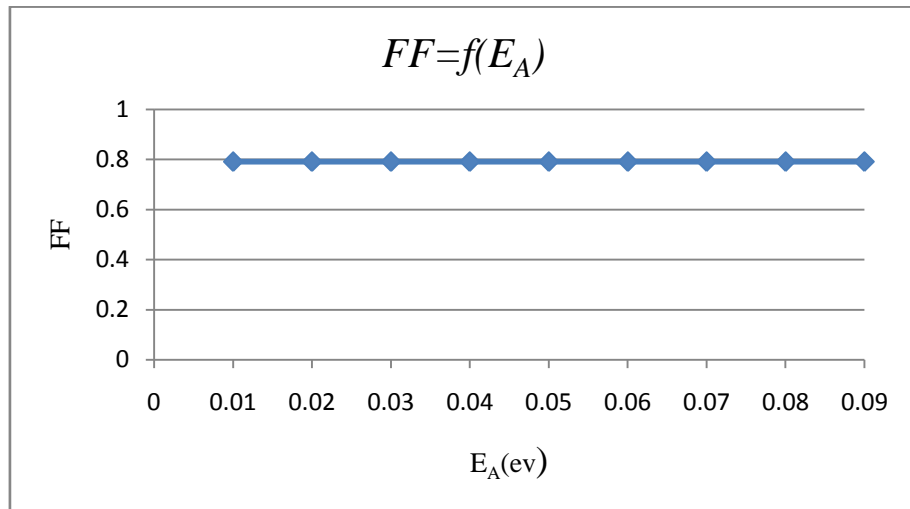


Figure 3.10 - Le facteur de forme en fonction de E_A

Le facteur de forme FF reste stable à 0.79 quelle que soit la valeur de E_A .

3.4.2.4 Effet de l'énergie caractéristique de la bande de conduction E_A sur Le rendement

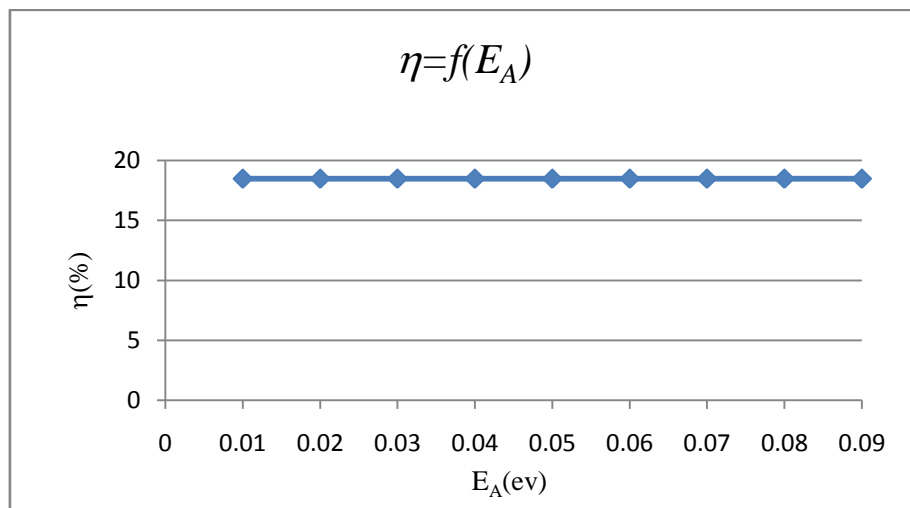


Figure 3.11 - Le rendement en fonction de E_A

D'après les quatre graphes précédant, nous pouvons constater constants tous les paramètres photovoltaïques (J_{sc} , V_{oc} , FF, η) lorsque l'énergie caractéristique E_A augmente. Ceci peut être expliqué par une augmentation des états accepteurs par unité de volume dans le gap qui favorisent les recombinaisons des électrons dans la couche fenêtre, qui n'engendrent aucun changement sur la performance des cellules étudiées.

Pour confirmer cela, nous avons tracé le taux de recombinaisons pour deux valeurs de E_A en fonction de la position dans la cellule.

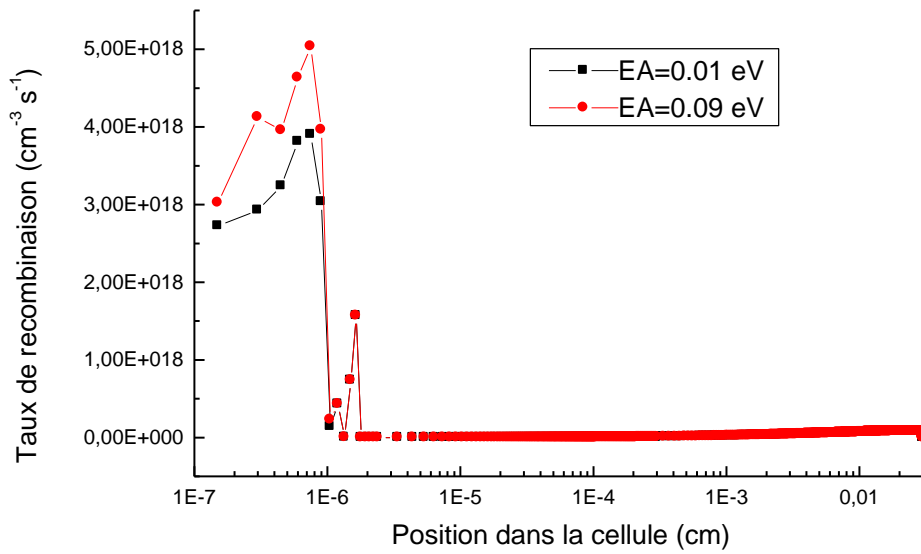


Figure 3.12 - Taux de recombinaisons en fonction de la position dans la structure a-Si :H(p)/a-Si :H(i)/c-Si(n)/Al pour deux valeurs de E_A

Effectivement, d'après la figure 3.12, le taux de recombinaison augmente très faiblement lorsque E_A passe de 0,01 à 0.09 eV.

Une augmentation de E_A accroît les états accepteurs dans le gap par unité de volume, ce qui implique un accroissement des recombinaisons des électrons de la couche p-a-Si :H n'influant pas sur la collecte des trous.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons la cellule solaire que nous avons utilisée dans nos simulations.

Lors de ce travail, nous avons montré que pour obtenir des cellules photovoltaïques de bonne qualité, il est important de réduire l'énergie caractéristique des queues de bande dans la bande de valence E_D afin de diminuer le taux de recombinaison des trous dans la couche fenêtre p-a- Si :H et d'augmenter ainsi le rendement des cellules HIT étudiées. En effet, lorsque l'énergie caractéristique E_D augmente, la densité des états donneurs par unité de volume dans le gap augmente et favorise les recombinaisons des trous dans l'émetteur, réduisant ainsi la performance des cellules étudiées

Nous sommes également arrivés à la conclusion que la modification de l'énergie caractéristique E_A de la bande de conduction n'influence pas le rendement des cellules, car une augmentation de E_A accroît les états accepteurs dans le gap par unité de volume, ce qui implique un accroissement des recombinaisons des électrons dans l'émetteur, n'influant pas la collecte des trous.

BIBLIOGRPHIE

- [0] K. Kassmi, M. Hamdaoui, F. Olivier « Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique », Université du Maroc, Revue des énergies renouvelables, pp 451 – 462, 2007.
- [1] N. Touil, S.Ghenbazi, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », Master en Génie Electrique, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [2] N.F.Benhaddouche, « La Commande d'un Système Photovoltaïque d'un Satellite », Master en Automatique. Université de Tlemcen, 2013.
- [3] O. Benseddik, F. Djaloud, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », Master en Automatique, Université d'Ouargla, 2012.
- [4] A.Rahmani, K.Selmani, « Etude des performances d'une cellule Photovoltaïque à hétérojonctions », Master en Composants et Systèmes de télécommunication, Université de Saida, 2017.
- [5] F. Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Magister en Electrotechnique, Université de SETIF, 2011.
- [6] H. Chabane, « Etude d'une cellule solaire à base de structure pin », Magister en électronique, Université Hadj Lakhdar de Batna, 2015.
- [7] A.Mekemeche, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes. », Thèse de Doctorat en conversions photovoltaïques, Université Mostaganem, 2017.
- [8] H. Belghoul, « Effet de l'épaisseur de la couche fenêtre sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction, ». Master en Physique, Option : Modélisation et Caractérisation des Matériaux, Université de Mostaganem, 2017.
- [9] A .Abaidia, A. Dahmane, « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p) », Master en Génie Electrique, Université de Ouargla, 2016.
- [10] A. Mahfoud, « Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement », Doctorat en Electronique, Université de SETIF, 2015.

- [11] M. Rahmouni, « Etude des cellules photovoltaïques HIT en vue d'améliorer leur rendement, », Doctorat en Physique, Option : Rayonnement et Matière, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2010.
- [12] Y.veschetti, « Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince, », Doctorat en Physique des semiconducteurs, Université Louis Pasteur Strasbourg I. 2004.
- [13] R.W.Sawadogo, « Etude de l'influence du dopage sur le rendement d'une cellule solaire de type HIT à base de silicium amorphe/silicium cristallin », Master en Physique, Option : Modélisation et caractérisation des matériaux, Université de Mostaganem, 2017.
- [14] M.R.Serdouk, « Etude par simulation numérique des propriétés électriques d'une cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), », Magister en signaux et Communications, Université de Biskra, 2015.
- [15] H.O.K.Kebaili, « Contribution à l'étude par la simulation numérique de Dynamique Moléculaire de la croissance des couches minces par procédé PECVD, », Magister en Physique des matériaux, Université d'Ouargla, 2013.
- [16] Sawada,N.Terada,S.Tsuge,T.Baba,T.Takahana,K,Wakisaka,S.Tsuda,S.Nakano : « High efficiency a-si :H/c-si heterojunction Solar Cell ». Proceeding of the 1st WCPEC, Hawaii, 1994.
- [17] Takahama,Tagushi, Matsuyama, Tanaka, Tsuda, Nakano, Kuwano : « High Efficiency Single and polycrystalline silicon solar cells using ACJ-HIT structure », 11 E.C.Photovoltaic solar energy conference, Montreux, October 1992.
- [18] D.Rached, « Etude et modélisation d'une cellule HIT à base de silicium polymorphe », Doctorat en Physique, Option : Traitement de surface et structure des matériaux, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2010.
- [19] A. Gupta, « Surface reactions during plasma enhanced chemical vapor deposition of silicon and silicon based dielectrics », Thèse de Doctorat, North Carolina State University, USA, 2001.
- [20] M. Bakala, Z. Matallah, « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si :H(n) /c-Si(p) », Master en Electrotechnique, Université kasdi merbah, ouargla ,2017.