

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de physique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en : physique

Filière : Physique

Option : physique des matériaux

Thème :

« Etude et simulation d'une cellule photovoltaïque en silicium

Polycristallin. »

Présenté par :

DENDANI Assia

Soutenu le 02/12/2020

Devant le jury composé de :

Mr MERRICHE Abderrzak	MCB	UAMOB	Président
Mr ZERIRGUI Djamal	MCB	UAMOB	Rapporteur
Mr MADI Djamal	MCA	UMMOB	Co-Rapporteur
Melle HAMILOUD Leila	MCB	UAMOB	Examineur
Mr BENYAHIA Nabil	MAA	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements

*Avant tous, nous remercions **ALLAH** de nous avoir donné la force, la volonté et la patience qui nous ont permis de continuer le parcours scolaire de master malgré toutes les difficultés.*

*Je tiens à exprimer tiens mes vifs remerciements à mon encadreur Monsieur **ZERIRGUI Djamal** enseignant à la faculté des sciences et des sciences Appliquée pour son encadrement efficace, ses conseils précieux et pour les efforts qu'il a consenti tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Je tiens à adresser mes remerciements à monsieur **MADI Djamal** pour avoir accepté aussi d'encadrer mon mémoire sans oublier ces conseils et son aide.*

*J'exprime ma profonde reconnaissance à monsieur **MERRICHE Abderezak** enseignant au département de Physique pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de mémoire.*

*Je tiens également à remercier Melle **HAMIOUD Leila** et monsieur **BENYAHIA Nabil** enseignants au département de Physique pour avoir aimablement accepté de prendre part au jury en tant qu'examineurs.*

Je tiens aussi à remercier tout les enseignants de département physique pour tous les conseils donnés tout le long de mes études.

Enfin, je suis particulièrement reconnaissante à mes parents, mes sœurs, mes frères surtout mon frère Hamid et toute ma famille qui n'ont ménagé aucun effort pour me soutenir.

***MERCI** à toute personne ayant eu confiance en moi et en mes capacités un jour.*

Dédicace

A l'aide de dieu 'Allah' tout puissant qui ma tracé le chemin de ma vie, J'ai pu réaliser ce travail.

Je dédie ce mémoire à :

Les plus chers au monde, qui ont souffert nuit et jour pour nous couvrir de leur amour, mes parents : Ma mère qui est pour mon corps mieux qu'un cœur. Mon cher père qui a sacrifié son temps pour nous que dieu me les gardent et me protège.

A Mes frères : Hamid, Azzedine et Raouf.

A Mes chères sœurs: Ratiba et Rokja.

A Toute ma famille.

Aux étudiants de la promotion 2ème année Master physique 2019/2020 et à tous mes amis sans exception.

A tous ce que j'aime et qui m'aiment



Assia



Table de Matières

Introduction Générale	3
CHAPITRE I : Généralités sur la cellule photovoltaïque	6
I.1. Introduction.....	6
I.2. Conversion photovoltaïque.....	6
I.2.1. Effet photovoltaïque.....	6
I.2.2. Cellule solaire.....	7
I.2.3. Mécanisme de la conversion photovoltaïque.....	8
I.3. Techniques de caractérisation de la cellule photovoltaïque.....	9
I.3.1. Caractéristique courant-tension I(V)	10
I.3.2. Réponse spectrale.....	10
I.4. Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque.....	11
I.4. 1. Schéma équivalent idéal d'une cellule photovoltaïque.....	11
I.4. 2. Schéma équivalent réel d'une cellule photovoltaïque.....	12
I.4. 3. Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	14
I.5. Influence des différents paramètres sur la caractéristique I (V)	16
I.5.1. Influence de l'éclairement et de la température	16
I.5.2. Influence de la résistance série et la conductance shunt.....	18
I.5.3. Influence du courant de saturation et du facteur d'idéalité.....	19
I.6. Les différents types de cellules solaires	19
I.6.1. Cellules solaires au silicium	19
I.6.2. Cellules solaires à couche mince	20
I.6.3. Cellules solaires organiques	22
I.7. Constituants de base d'une cellule photovoltaïque.....	22
I.7.1 La passivation	23
I.7.2 Contacts face avant et arrière	23

I.7.3 Couche anti-reflet.....	23
I.7.4 Texturation de surface.....	24
I.7.5 Zone BSF.....	25
I.8. Bibliographie.....	26
CHAPITRE II : CELLULES SOLAIRES EN COUCHES MINCES À BASE DE SILICIUM POLYCRISTALLIN	29
II .1. Introduction.....	29
II.2. Les différents états du silicium.....	29
II.2.1. Etat monocristallin	29
II.2.2. Etat amorphe	30
II.2.3. Etat polycristallin	32
II.3. Propriétés électriques du silicium polycristallin	33
II.3.1. Phénomènes de conduction électrique dans les films de silicium polycristallin.....	33
II.3.2. Propriétés des porteurs minoritaires dans le silicium polysilicium	35
II.3.2.1. Mécanismes de recombinaison et durée de vie des porteurs minoritaires.....	35
II.3.2.2. Vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires.....	37
II.3.2.3. Longueur de diffusion des porteurs minoritaires.....	38
II .4. Procédés d'élaboration des couches minces	39
II.4.1. Dépôts physiques	40
II.4.1.1. Evaporation	40
II.4.1.2. Pulvérisation	41
II.4.1.3. Ablation laser	44
II.4.1.4. Epitaxie par jets moléculaires	44
II.4.2. Dépôts chimiques	45
II.4.2.1. Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)	45
II.4.2.2. MOCVD	46
II.4.2.3. Transport chimique en phase vapeur à court distance (CSVT)	46
II.4.2.4. Electrodeposition	47
II.4.2.5. Sérigraphie	47
II.4.2.6. Sol gel	48
II.6. Bibliographie	49
CHAPITRE III : résultats et discussion.....	53
III.1. Introduction.....	53

III.2. Structure simulée	53
III.3. Principe et objectif de l'étude	53
III.4. Introduction au simulateur PC1D	54
III-5. Effets des caractéristiques géométriques et physiques sur Les paramètres de sortie d'une cellule photovoltaïque	56
III-5-1. Effets de l'épaisseur de la base.....	56
III-5-2. Influence de la vitesse de recombinaison en surface de la base.....	58
III-5-3. Influence de la vitesse de recombinaison à l'émetteur	61
III-5-4. Influence de la variation de la résistance série R_s	64
III-5-5. Influence de la résistance shunt R_p	67
III-5-6. L'influence de la température T.....	68
III-6. Conclusion	70
Conclusion Générale	71

Introduction générale

L'énergie joue un rôle très important dans la vie quotidienne et dans le développement des nations. Elle est le pilier de l'économie et le confort d'une société moderne. Elle est aussi l'étincelle qui permet l'accomplissement de toute activité humaine.

Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. À l'heure actuelle, la production mondiale d'énergie dépend en grande partie des sources d'énergie fossiles (pétrole, gaz, charbon), sources limitées et polluantes par gaz à effet de serre, et sont à la fois limitées et constituent une grave menace pour les organismes vivants et l'environnement. Cela a encouragé la recherche de trouver d'autres alternatives non polluantes pour la production d'énergie.

Plusieurs types de sources d'énergie renouvelables sont actuellement connus. L'énergie solaire est une des technologies les plus prometteuses et qui offre la solution pour répondre aux exigences énergétiques modernes, car le soleil est considéré comme une ressource non limitée à l'échelle humaine et les matériaux utilisés pour la fabrication des cellules photovoltaïques sont réutilisables.

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 dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui consiste à produire une force électromagnétique lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

Le matériau le plus commercialisé dans l'industrie photovoltaïque est le silicium cristallin (abondant, facile à processor, non toxique). Cependant, dans le coût du module, le prix du matériau intervient pour environ 50% et de nombreuses études visent donc à réduire les coûts relatifs à la préparation des substrats. Dans ses trois formes qui sont les couches minces, silicium monocristallin et silicium polycristallin, ce dernier étant le plus largement utilisé en raison de son faible coût par rapport aux autres types.

Le silicium polycristallin (polySi) en couche mince ($< 3 \mu\text{m}$ d'épaisseur) est utilisé pour ses propriétés optoélectroniques dans l'industrie des semi-conducteurs pour des applications telles que la microélectronique et le photovoltaïque. A cause des différentes

techniques d'élaboration, les performances des cellules solaires au polySi sont limitées par la présence de défauts de structure tels que les joints de grains et les impuretés, qui constituent des sites de recombinaison des porteurs de charge majoritaires et minoritaires, entraînant une diminution de leur longueur de diffusion et par conséquent de leur durée de vie dans le matériau. La densité de ces pièges à porteurs de charge est fortement liée à la taille des grains.

L'objectif de ce mémoire est l'étude d'une cellule solaire en polysilicium de type n+/p. Nous intéressons à la variation de courant de court-circuit I_{cc} , de la tension en circuit ouvert V_{co} et de rendement η de la cellule en fonction de la variation d'autres paramètres géométriques et physiques tels que l'épaisseur de la cellule, les vitesses de recombinaison des faces avant et arrière, les résistances série et shunt, finalement la température.

Notre mémoire est structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous rappelons des généralités sur les cellules photovoltaïques dans lesquelles nous abordons sa structure, sa caractéristique électrique, son circuit électrique équivalent, les paramètres photovoltaïques, en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque et l'influence des différents paramètres extérieurs, puis nous citons les différentes technologies des cellules, et les constituants de base d'une cellule photovoltaïque.

Le second chapitre sera consacré à la description du silicium polycristallin. Nous décrirons d'abord la structure et les propriétés électriques de ce matériau avec les phénomènes de conduction électriques mis en jeu. Puis Nous terminerons le chapitre en décrivant les procédés d'élaboration des couches minces.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus. On terminera notre travail par une conclusion générale.

I.1. Introduction

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui transforme la lumière en électricité. Le fonctionnement des cellules solaires est basé sur la physique des semiconducteurs, le phénomène d'absorption et de génération de porteurs ainsi que le mécanisme de recombinaison des porteurs de charges. Pour évaluer les performances des cellules photovoltaïques, il est nécessaire de connaître quelques notions sur les différentes grandeurs caractéristiques de la cellule.

Dans ce premier chapitre nous allons présenter la physique des cellules solaires, où nous décrirons la structure, le fonctionnement et les caractéristiques des cellules photovoltaïques. Nous y abordons le principe de conversion photovoltaïque, les paramètres caractéristiques et l'architecture des cellules solaires. Puis, nous présentons les modèles d'une cellule solaire et également les différentes filières photovoltaïques

I.2. La conversion photovoltaïque

I.2.1. L'effet photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire est une opération qui consiste à transformer l'énergie des photons provenant du soleil sous forme d'ondes électromagnétiques en énergie électrique de type continu directement utilisable [1]. Ce phénomène s'appelle effet photovoltaïque. Ce dernier utilise les propriétés quantiques de la lumière qui permettent la transformation de l'énergie incidente en courant électrique dont la cellule solaire ou photopile est l'élément de base de cette conversion photovoltaïque [2].

L'effet photovoltaïque repose principalement sur trois grands principes dont l'action conjuguée de manière quasi-simultanée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [3] :

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

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Un dispositif photovoltaïque doit donc être constitué :

- D'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire et possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie.
- D'une structure de collecte, ayant une résistance électrique la plus faible possible.

I.2.2. La cellule solaire

La cellule solaire également dénommée cellule photovoltaïque est un composant électronique, et le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs capables de capter et transformer directement l'énergie lumineuse en énergie électrique par effet photovoltaïque [4].

La cellule photovoltaïque délivre une tension continue qui peut varier entre 0.3 V et 0.7 V [4] en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule. Un courant électrique la traverse dès qu'elle est connectée à un circuit électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie). La puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et dépend du rendement de la cellule.

Le groupement d'un ensemble des cellules solaire constitue le panneau solaire ou le module photovoltaïque. Quand on parle d'énergie solaire électrique, les deux derniers termes désignent un capteur de plus grande taille et donc de puissance supérieure aux photopiles.

La jonction p-n

Un semi-conducteur (SC) est un matériau présentant une bande interdite (E_g) de quelques eV entre la bande de valence et la bande de conduction, avec le niveau de Fermi dans la bande interdite.

La position du niveau de Fermi dépend de la concentration des porteurs de charges. Le semi-conducteur est de type n lorsque les électrons sont les porteurs de charge majoritaires, dans ce cas, le niveau de Fermi se situe près de la bande de conduction. Il est de type p lorsque ce sont les trous, dans ce cas le niveau de Fermi est proche de la bande de valence. La figure (I.1) représente la position du niveau de Fermi E_f pour les deux types de semi-conducteurs [5].

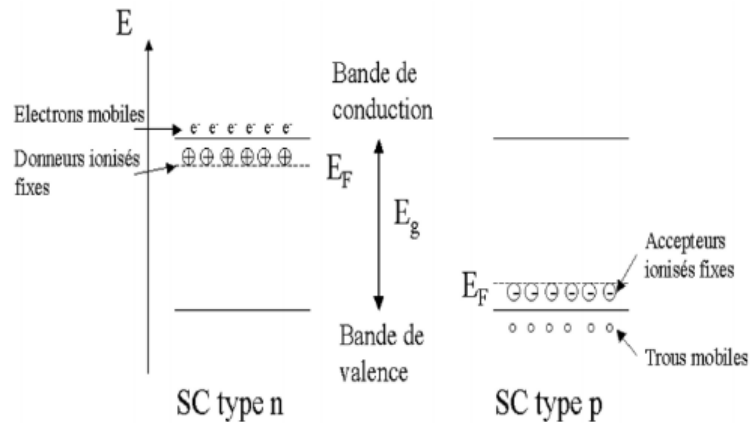


Figure I-1. Semi-conducteurs de type p et n et position du niveau de Fermi E_f [5].

L'assemblage de deux semi-conducteurs de types différents forme la jonction p-n ; lorsque les deux semi-conducteurs sont issus de deux matériaux différents, on parle d'hétérojonction, lorsque la jonction p-n est formée d'un seul matériau comportant des zones avec des dopages différents p et n, on parle alors d'homojonction (ex : homojonction Si). Lors du contact entre zones p et n, les porteurs majoritaires de chacune diffusent à travers la surface de contact, il se crée une zone chargée positivement du côté du semi-conducteur n et une zone chargée négativement du côté du semi-conducteur de type p. Cette zone de transition est appelée zone de charge d'espace (ZCE). Le gradient de concentration des porteurs majoritaires induit la présence d'un champ électrique permanent dans cette ZCE à l'équilibre [5].

Un champ électrique permanent, au sein du matériau, assure une séparation rapide de ces porteurs pour éviter des phénomènes de recombinaison [3] schématisé sur la figure I.1.

L'optimisation d'un dispositif photovoltaïque passe par une gamme de fréquence absorbante la plus large possible, couvrant la partie la plus dense du spectre solaire ; ainsi qu'une différence d'énergie entre deux niveaux de transition la plus petite qu'il soit. Leur structure de bande (interdite et de conduction) fait des semi-conducteurs le meilleur compromis pour la réalisation des cellules solaires. On en trouve actuellement en arséniure de gallium pour les applications spatiales, en silicium cristallin pour les applications terrestres et en silicium amorphe pour des cellules bas coût [3].

I.2.3. Mécanisme de la conversion photovoltaïque

Sous éclairement, les photons incidents créent des porteurs dans la zones N, P et dans la ZCE. Les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région [6] :

Dans la zone N ou P (les zones de base et d'émetteur): les porteurs minoritaires générés (trous dans l'émetteur et l'électron dans la base) qui atteignent la ZCE avant de se recombiner, sont envoyés par le champ électrique dans la zone P pour les trous et dans la zone N pour les électrons et deviennent majoritaires. On obtient ainsi un photo-courant de diffusion.

Dans la ZCE engendrée par la jonction p-n: les paires électrons-trous créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons sont accélérés puis injectés dans la région N (émetteur), les trous vers la région P (base). On aura un photo-courant de génération.

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

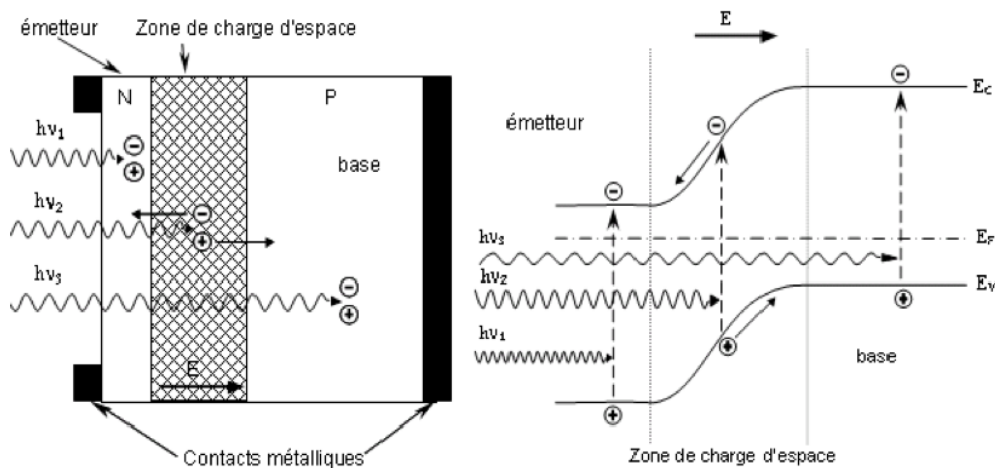


Figure I-2 : Schémas du principe de fonctionnement d'une cellule solaire (à gauche) et son diagramme de bande (à droite).

Enfin, les contacts métalliques permettent la collecte des charges vers le circuit extérieur : ils se présentent sous forme de grille sur la face avant, et généralement une plaque pleine sur la face arrière.

I.3. Techniques de caractérisation de la cellule photovoltaïque

Il existe principalement deux techniques électro-optiques pour caractériser les cellules photovoltaïques [7] :

- La première technique consiste à mesurer la caractéristique $I(V)$ sous un rayonnement polychromatique.

- La deuxième consiste à mesurer la réponse spectrale sous un rayonnement monochromatique.

I.3.1. la caractéristique courant-tension I(V).

Les performances de la cellule solaire sont représentées à travers la caractéristique courant- tension I(V). Cette dernière apporte une lecture claire des paramètres caractérisant la cellule solaire comme le rendement de la cellule, les différents types des résistances parasites et le facteur de forme. Le courant est mesuré en fonction de la tension appliquée sous obscurité et sous ensoleillement, la lumière permet de décaler la courbe I(V) vers le bas dans le quatrième quadrant, car le courant photoélectrique provoque la production de l'énergie [8].

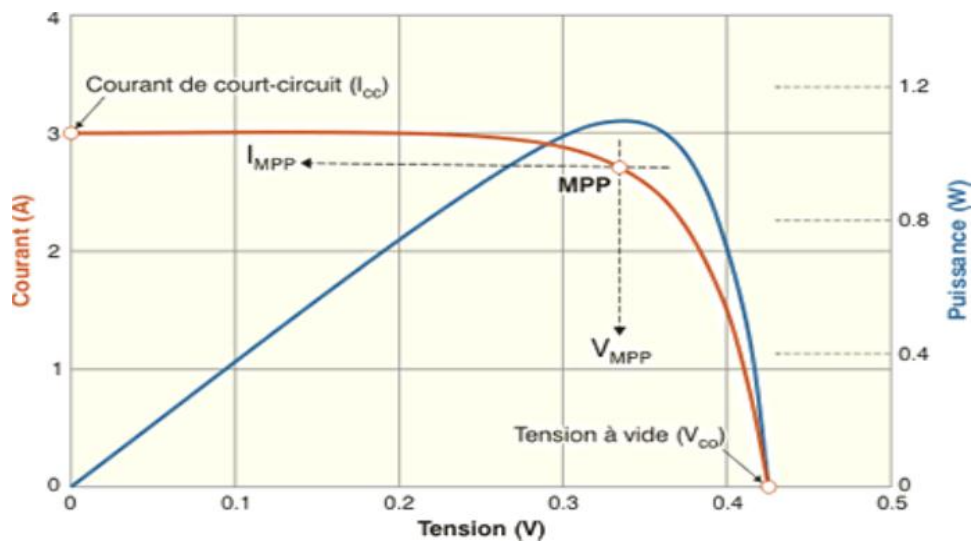


Figure I-3 : La courbe rouge : caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque, la courbe bleu : la puissance P(V) délivrée par la cellule photovoltaïque.

I.3.2. La réponse spectrale

A) Réponse spectrale externe

C'est la valeur de la densité du courant de court-circuit J_{sc} (photo courant) de la cellule par unité de flux monochromatique incident :

$$RS_{ext}(\lambda) = \frac{J_{sc}}{q \cdot F(\lambda)} \quad (I.1)$$

J_{sc} : La densité du courant de court-circuit.

$F(\lambda)$: Le flux monochromatique incident.

q : La charge électrique de l'électron. $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C.

B) Réponse spectrale interne

La réponse spectrale interne est la valeur de la densité du courant de court-circuit de la cellule, par unité de flux monochromatique traversant la surface de la cellule.

$$RS_{in}(\lambda) = \frac{J_{sc}}{q.F(\lambda).(1-R(\lambda))} \quad (I.2)$$

Où $R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion du matériau absorbeur (couche active).

La figure (I-4) donne, à titre de comparaison, les réponses spectrales d'une cellule à base du silicium cristallin et d'une cellule CIS (Cuivre-Indium-Sélénium) dans les domaines Visible et IR où on constate que la réponse maximale se situe vers 900 nm pour la cellule à base silicium cristallin et 940 nm pour la cellule à base de CIS [7].

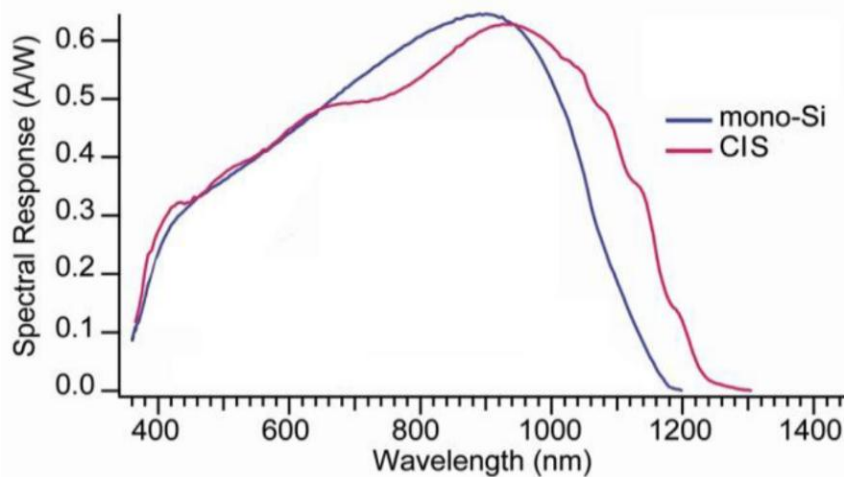


Figure I-4 : Réponse spectrale pour des cellules CIS et Silicium

I.4. Le modèle électrique d'une cellule photovoltaïque

Le circuit équivalent d'un système électrique est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, etc.). L'expérience montre qu'à l'obscurité, une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s .

I.4. 1. Le schéma équivalent idéal d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque peut être étudiée à partir d'un circuit équivalent donné par la figure (I-5) composé d'un générateur à courant et d'une diode en parallèle.

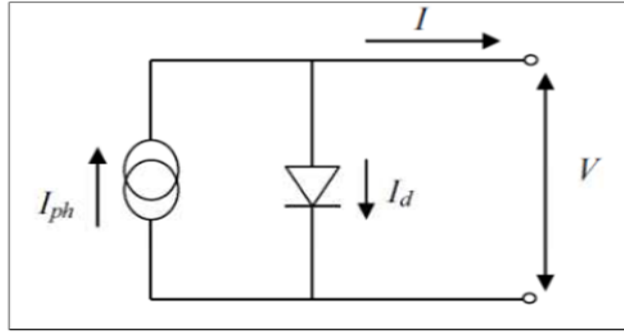


Figure.I-5 : Modèle électrique idéal d'une cellule photovoltaïque.

Sous obscurité, le courant dans une telle structure de type jonction p-n est appelé courant d'obscurité et a la forme suivante [4] :

$$I_{obs} = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

Avec :

q : charge élémentaire $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C

V : tension aux bornes de la jonction (V)

k : constante de Boltzmann $= 1.38 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹

T : température (K)

I_s : courant de saturation inverse de la jonction p-n

n : coefficient d'idéalité de la jonction

Ce courant d'obscurité correspond au courant de diode (I_d), il résulte de la polarisation de la jonction.

Sous éclairage, un terme I_{ph} , tenant compte du photo-courant généré est rajouté. On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairage qui est représenté par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (I.4)$$

I.4. 2. Le schéma équivalent réel d'une cellule photovoltaïque

Pour tenir compte des limitations et des pertes de la cellule, et pour calculer le courant réellement délivré par la cellule photovoltaïque, on introduit le modèle réel qui comporte en plus une résistance série et une résistance parallèle ainsi qu'une deuxième diode en parallèle.

Le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle est représenté sur la figure (I.6), par un générateur de courant I_{ph} , une diode et deux résistances parasites R_s et R_{sh} .

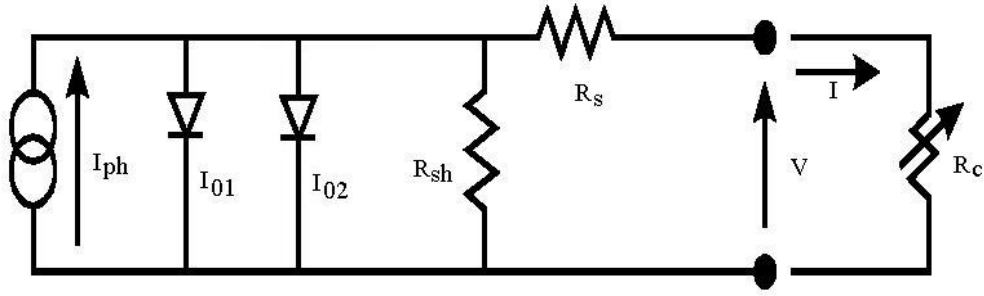


Figure I.6 : Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle à jonction PN.

Pour envisager le cas d'une cellule solaire réelle, le circuit équivalent doit intégrer :

- Une résistance série R_s , qui modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc les métallisations.
- Une résistance parallèle R_p modélisant les courants de fuite qui court-circuitent la jonction (fuites par les bords de la cellule et au niveau de la jonction).
- La première diode modélise la diffusion des porteurs de charge dans la base et l'émetteur de la cellule photovoltaïque.
- La deuxième diode modélise la génération et la recombinaison des porteurs de charge dans la zone de charge d'espace.

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

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs} \quad (I.5)$$

Où I_{ph} : Le courant photonique

I_{obs} : Le courant d'obscurité

$$I = I_{ph} - I_1 - I_2 - I_p \quad (I.6)$$

Soit :

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left[\exp^{q \left(\frac{V + IR_s}{n_1 kT} \right)} - 1 \right] - I_{S2} \left[\exp^{q \left(\frac{V + IR_s}{n_2 kT} \right)} - 1 \right] - \frac{V - IR_s}{R_p} \quad (I.7)$$

Dans cette expression, I_{S1} est le courant de saturation de la première diode qui résulte de la densité de courant de diffusion ; I_{S2} est le courant de saturation de la seconde diode qui résulte du courant de génération-recombinaison dans la zone de charge d'espace de la jonction n_1 et n_2 sont les facteurs d'idéalités de la première et seconde diode [3].

La représentation graphique de cette caractéristique est schématisée sur la figure suivante :

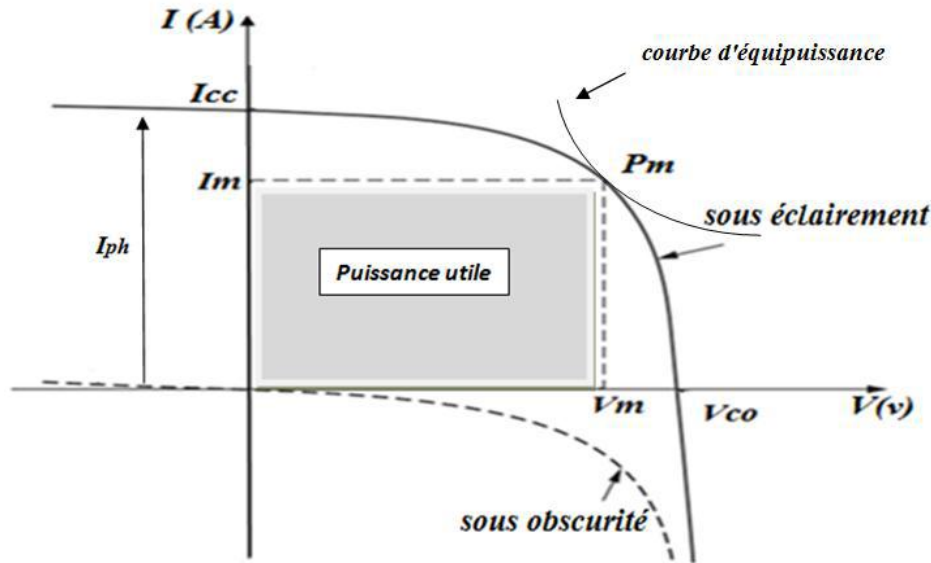


Figure I.7: Caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque

I.4. 3. Les paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

A partir de la caractéristique courant tension de la cellule photovoltaïque de la figure I.7 on peut déterminer ses paramètres physiques à savoir : la tension de circuit ouvert noté I_{CC} , le courant du court-circuit V_{co} , la puissance caractéristique, le facteur de forme FF , et le rendement η . Des brèves définitions de ces paramètres, ainsi que leurs déterminations de la caractéristique sont données ci-après.

A- Courant de court-circuit I_{CC} :

Le courant de court-circuit I_{CC} d'une cellule photovoltaïque obtenu lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul ($V = 0$), il augmente linéairement avec l'intensité d'éclairement de la surface éclairée, de la longueur d'onde de rayonnement incident, de la mobilité des porteurs et aussi de la température. On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule.

Il définit la quantité des paires électron-trou créé G et qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p) respectivement [9].

$$I_{ph} = q \cdot G \cdot (L_n + L_p) \quad (I.8)$$

Où I_{ph} est le photo-courant généré par la cellule Sous éclairnement.

B- Tension en circuit ouvert V_{co}

La tension en circuit ouvert V_{co} d'une cellule photovoltaïque est la tension pour laquelle la diode à l'obscurité fournit un courant égal au courant de court-circuit I_{cc} . C'est la tension obtenue quand le courant qui circule dans la cellule est nul ($I = 0$).

Dans le cas idéal, elle est déterminée à partir de l'équation de la caractéristique courant - tension d'une cellule photovoltaïque par l'expression :

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (I.9)$$

Avec :

n : Facteur d'idéalité de la diode

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T : Température effective de la cellule [Kelvin]

I_s : Courant de saturation.

I_{ph} : Courant photonique

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le \ln d' I_{ph} , donc avec le \ln de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme kT/q . En effet, le courant de saturation, dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme kT/q . Donc la tension de circuit ouvert V_{co} baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes [10].

C- Facteur de forme, FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} * V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.

$$P_{max} = V_M \times I_M \quad (I.10)$$

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (I.11)$$

Chacune de ces grandeurs (V_M , I_M , V_{oc} , I_{cc}) est représentée sur la figure ci-dessous.

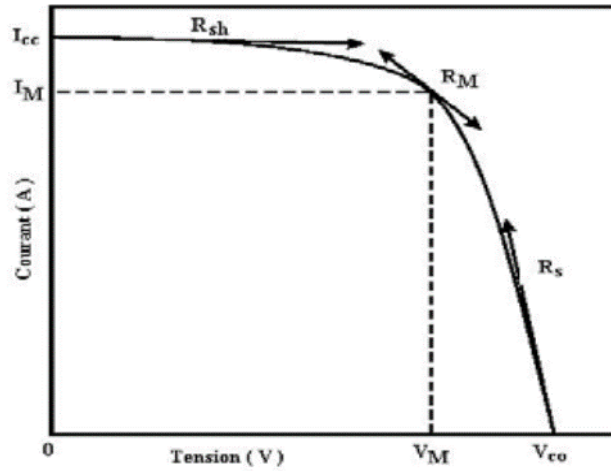


Figure I-8: Points et valeurs remarquables de la caractéristique courant-tension [9]

D- Rendement de conversion photovoltaïque η

Le rendement des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{G A} \quad (I.12)$$

Avec :

G : L'irradiance total du spectre de photons incidents (W/cm^2).

A : La surface de la cellule (cm^2).

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

I.5. Influence des différents paramètres sur la caractéristique I (V)

I.5.1. Influence de l'éclairement et de la température

a) Influence de l'éclairement

La puissance délivrée par un générateur PV dépend de l'irradiation qu'il reçoit. La tension V_{max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{max} qui augmente fortement avec l'éclairement [11].

b) Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules PV. Ces cellules sont assez sensibles aux variations de température. En effet, les résistances internes augmentent avec la température.

Si la température croît à irradiation constante, la tension à vide V_{co} décroît avec la température et le courant de court-circuit I_{cc} augmente. En effet, l'augmentation de la température entraîne une diminution de l'énergie de la bande interdite E_g [12], dont l'expression en fonction de la température est exprimée par:

$$E_g = E_{g_0} - \frac{a \cdot T^2}{b+T} \quad (\text{I.13})$$

Avec

E_{g_0} est l'énergie de la bande interdite à la température absolue 0 °K pour le semiconducteur considéré.

a : Constante du matériau en $\left(\frac{eV}{^\circ K}\right)$

b : Une seconde constante du matériau en (°K)

Ce qui provoque:

- Une augmentation du courant de saturation I_s , ce qui conduit à une augmentation notable du courant direct de diode I et à une diminution rapide de la tension de circuit ouvert V_{co} .
- Une absorption des photons moins énergétiques, ce qui conduit à une très légère augmentation du courant de court-circuit I_{cc} .

Donc, plus la température est élevée plus V_{co} est faible et l'influence de la température sur I_{cc} peut être négligée dans la majorité des cas [13]. Un fonctionnement à la température la plus basse possible permet l'obtention d'un meilleur rendement de conversion [3].

De ce fait, la température et l'éclairement sont les deux principaux paramètres qui vont modifier la caractéristique d'un générateur PV. Ces deux paramètres devront donc être étudiés avec soin lors de la mise en place d'une installation PV.

I.5.2. Influence de la résistance série et la résistance shunt

a) Influence de la résistance série :

La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. Elle caractérise les pertes de tension dans le semi-conducteur et à travers les contacts ohmiques de la cellule.

L'influence de la résistance série R_s s'exprime par une variation de la pente $I(V)$ dans la zone où la cellule PV est assimilable à un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension de circuit ouvert V_{co} , mais lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer la valeur du courant de court-circuit I_{cc} .

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone ou de la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit I_{cc} [14].

b) Influence de la résistance shunt :

La résistance shunt caractérise les fuites de courant dues aux pertes par recombinaison des porteurs, provoquée par les défauts structurales du matériau et les impuretés étrangères dans les régions N , P et de la zone de charge d'espace de la jonction PN.

L'existence des fissures et des défauts des structures complexes, siège des phénomènes physiques, devient assimilable à une résistance parallèle (R_p). L'ordre de grandeur de R_p pour une cellule au Si : $R_p = 10^2$ à $10^4 \Omega$.

L'impact de la résistance shunt R_{sh} se manifeste surtout au sein de la région où la cellule PV se comporte comme un générateur de courant par une modification de la pente de la caractéristique $I(V)$.

R_p augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle [15].

Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la photopile; à cause de cela une photopile dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclaircissement [16 - 17].

La résistance shunt doit être suffisamment grande pour une meilleure puissance de sortie et un bon facteur de remplissage. En effet, pour une faible résistance shunt, le courant s'effondre plus fortement ce qui signifie que la perte de puissance est élevée et le facteur de remplissage est faible [18].

I.5.3. Influence du courant de saturation et du facteur d'idéalité

a) Effet de facteur d'idéalité n sur la caractéristique $I(V)$.

Le facteur d'idéalité n résulte de la recombinaison accrue dans la jonction. L'augmentation de n provoque une augmentation de la tension de circuit ouvert (V_{oc}), par contre le courant de court-circuit (I_{cc}) reste constant [19].

L'augmentation du facteur d'idéalité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale. Lorsqu'il augmente, le point de puissance maximale est dégradé, et les valeurs les plus élevées du facteur d'idéalité ramollissent le genou de la courbe [20]. Cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement.

b) Effet de courant de saturation sur la caractéristique $I(V)$

L'augmentation du courant de saturation, est causée par l'augmentation du courant de recombinaison. L'augmentation de ce dernier est liée proportionnellement à l'augmentation de la densité des états de défaut dans la bande interdite [21].

Ces défauts sont provoqués par l'énergie libérée de la recombinaison des paires électrons-trous. Par conséquent, pendant que les électrons et les trous recombinent, les liaisons atomiques faibles sont cassées par l'énergie libérée. Ces liens cassés forment des états de défaut, créant plus d'emplacements de recombinaison. L'augmentation des emplacements de recombinaison, alternativement, augmente la recombinaison des paires électrons-trous.

De ce fait, l'augmentation du courant de saturation I_s , conduit à une diminution rapide de la tension en circuit ouvert V_{oc} , par contre le courant de court-circuit (I_{cc}) reste constant [22].

I.6. Différents types de cellules solaires

I.6.1. Cellules solaires au silicium

La filière silicium représente actuellement 87% du marché des cellules photovoltaïques. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque au silicium détaillées ci-après ; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, polycristallin, rubans) dites de première génération, et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules

photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince [23].

Cellules solaires en silicium monocristallin

Ce sont les premières photopiles élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal, elles se présentent sous forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo-carrées. Leur rendement est de 12 à 16%. Les avantages de l'utilisation du Silicium monocristallin sont :

- Très bon rendement (environ 150 W/cm^2).
- La très bonne stabilité et les durées de vie des dispositifs qui peuvent atteindre 30 ans.
- Rendement module commercial de 12 à 16%.

Toutefois ce matériau présente plusieurs inconvénients liés à sa rigidité, sa disponibilité parfois limitée, son coût de fabrication élevé et une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée [23]. La recherche s'est dirigée vers une méthode de cristallogénèse plus simplifiée et économique basée sur le Silicium poly-cristallin (multi-cristallin) [24].

Cellules solaires en silicium Polycristallines

Le silicium Poly-cristallin (multi-cristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A-t-elle seule elle représente près de 50% du marché photovoltaïque [15]. Car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés qui varie entre 11 à 15% avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin et une durée de vie estimée à 30 ans , mais qui reste toujours assez élevé.

I.6.2. Cellules solaires à couche mince

Les cellules PV dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. L'intérêt de la technologie couche mince vient de la faible quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules classiques. Contrairement aux cellules silicium cristallin de première génération, on ne dépose que la quantité de matériau photosensible efficace pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques microns d'épaisseurs suffisent). Par ailleurs, on utilise des méthodes de fabrication moins coûteuses des cellules qui permettent une intégration totale. Les trois technologies émergentes sont aujourd'hui [25] :

- le Silicium amorphe et microcristallin noté TFSi (Thin-Film Silicon en anglais).
- Le Semi-conducteur Poly-cristallin CdTe (Tellure de Cadmium).
- L'alliage Cu(In,Ga)Se₂ (Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium) noté dans la littérature CIGS

➤ **Cellule photovoltaïque en silicium amorphe**

Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe sont fabriquées par dépôts sous vide, à partir de plusieurs gaz, une des techniques les plus utilisées étant la PECVD. La cellule est grise très foncée. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires » [26].

Leur rendement est de l'ordre de 5 à 10%, plus bas que celui des cellules cristallines mais le courant produit est relativement bon marché. Elles sont appliquées dans les petits produits de consommation [23].

Avantage

- Fonctionnent avec un éclairage faible
- Rendement module commercial de 5 à 10%
- Moins sensible aux températures élevées

Inconvénients

- Rendement faible en plein soleil
- Faible densité énergétique (environ 60Wc/m²)
- Durée de vie courte (≈ 10 ans) [23].

➤ **Cuivre-indium-disélénium (CIS) ou cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS) :**

Leur rendement est égal à 11 % (17 .1 % au laboratoire). 99 % d'absorption, dégradation minime, mais fabrication très délicate [27].

➤ **Cadmium-tellure (CdTe) :**

Rendement 10.5 % (15.8 % en laboratoire). Haute absorption, mais n'oublions pas que le cadmium est très toxique [27].

Ces cellules, dont le prix est très élevé, sont très appréciées dans l'aérospatiale. Leurs principaux avantages sont :

- Une absorption très élevée. Ces cellules ne pas épaisses, ce qui traduit un gain en volume et en masse pour les sondes sur lesquelles le moindre gramme superflu est traqué.
- Leur puissance est, par rapport aux cellules simples au silicium, peu affectée par les augmentations de température que les sondes peuvent rencontrer.
- Ces Performances qui diminuent sensiblement avec le temps.

I.6.3. Cellules solaires organiques

Comme leurs noms les indiquent, les cellules organiques ; autrement dit, les cellules plastique, sont composés de semiconducteurs organiques. Ce type de cellules est apparu dans les années 90, elles constituent une tentative de réduction du cout de l'électricité photovoltaïque et elles bénéficient en effet du faible coût des semiconducteurs organiques ainsi que de nombreuses simplifications potentielles dans le processus de fabrication. Son record de rendement de conversion dépasse les 10% [28].

I.7. Constituants de base d'une cellule photovoltaïque

Comme nous l'avons vu précédemment le fonctionnement des cellules photovoltaïque est basé sur trois mécanismes : l'absorption des photons, la conversion de l'énergie optique en énergie électrique et la collecte de cette énergie sur un circuit extérieur. Les premières cellules étaient constituées seulement d'un émetteur et d'un contact ohmique. Mais leur architecteur a ensuite évolué, pour améliorer le rendement de conversion. La figure (Figure I-9) présente la structure générale d'une cellule solaire qui est composée des éléments suivants :

- La base qui est un substrat de type p (en général, dopé au bore).
- L'émetteur n^+ (en général, sur-dopé au phosphore) formant la jonction n^+p avec la base.
- La couche de passivation (en général d'oxyde de silicium SiO_2).
- La couche antireflet (CAR) en face avant (en nitrure de silicium SiN_x), qui joue également un rôle supplémentaire de passivation.
- Le champ de surface arrière (BSF : Back Surface Field).
- Les contacts en face avant et en face arrière.

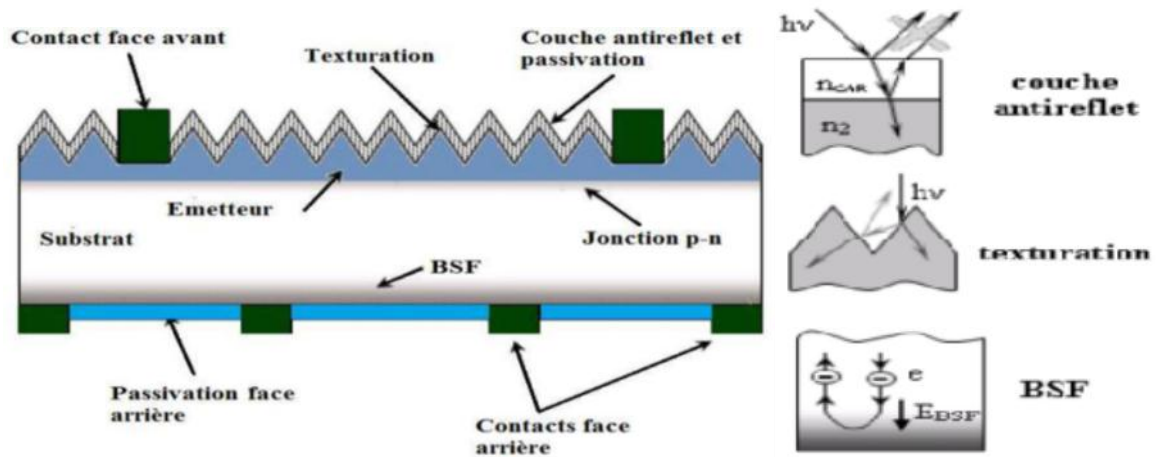


Figure I-9 : Compositions d'une cellule photovoltaïque

I.7.1 La passivation :

La passivation consiste à améliorer la qualité électronique de la surface et de volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs sur les surfaces de la cellule. Nous savons que sur les surfaces de la cellule le réseau cristallin s'interrompt brutalement. Certaines liaisons électroniques du silicium sont pendantes et deviennent des centres de recombinaison pour les porteurs de charge. A ces liaisons s'ajoutent les impuretés présentes dans le réseau cristallin et les défauts du cristal (dislocations...). Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque, mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium et le nitrure de silicium hydrogéné SiO_2 , SiN_x .

I.7.2 Contacts face avant et arrière

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photogénérés. La résistance des contacts est un paramètre très important, car une trop forte résistance des contacts augmente la résistance série R_s et baisse le facteur de forme FF et par conséquent le rendement η . Il existe plusieurs procédés pour réaliser les contacts: par exemple pour les cellules photovoltaïques industrielles en silicium, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous le vide sont utilisés [29].

I.7.3 Couche anti-reflet

Une couche antireflet déposée sur la face avant des cellules aide à améliorer le confinement optique. La CAR permet d'adapter l'indice optique entre le milieu extérieur et le silicium et

ainsi minimiser les réflexions. Pour cela, il est nécessaire que cette couche possède un indice de réfraction (n_{car}) ainsi qu'une épaisseur (e_{car}) adaptés au milieu extérieur d'indice n_{ext} . Les relations (I.13) et (I.14) permettent de déterminer la valeur de e_{car} et n_{car} en fonction du n_0 de milieu extérieur et du silicium (n_{si}). Le minimum de réflexion peut être atteint pour des valeurs périodique de e_{car} dépendant de l'entier m , il est en général préférable de prendre $m = 1$ afin de limiter l'épaisseur de la CAR [30].

$$e_{CAR} = \frac{(2m+1)\lambda}{4n_{CAR}} \quad (I.13)$$

$$n_{CAR} = \sqrt{n_{ext} n_{si}} \quad (I.14)$$

I.7.4 Texturation de surface

La texturation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. Le relief créé permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides. Un rayon incident perpendiculairement sur une pyramide sera réfléchi sur la pyramide adjacente. Cette double réflexion diminue le coefficient de réflexion total. D'autre part un rayon d'incidence normal sera transmis dans la surface avec un angle de réflexion différent de 0° . Ce qui aura pour effet d'augmenter la part des photons absorbés par le matériau [29].

Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturation : attaques chimiques basiques de la surface (KOH ou NaOH), texturation mécanique, plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 40 % à moins de 10 % en général.

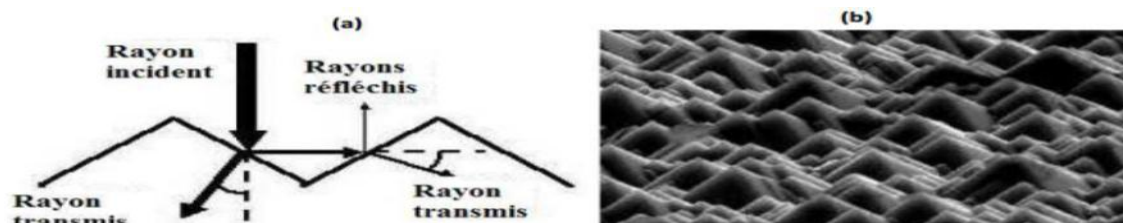


Figure I-10 : a) Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée ; b) Plaque de silicium après texturation.

I.7.5 Zone de champ électrique arrière BSF

Afin de collecter les paires électron-trous créées par les radiations de grandes longueurs d'onde du spectre solaire, on réalise un champ électrique par transition abrupte de dopage, sur la face arrière de la cellule solaire, dans la même zone du contact ohmique. Ce champ électrique arrière s'appelle BSF en anglais (Back Surface Field). Les porteurs excédentaires ainsi créés au voisinage de cette zone, au lieu de s'y recombinaison, sont repoussés vers la région de charge d'espace de la jonction. Ils participent au photo-courant dans la mesure où la longueur de diffusion de ses porteurs de charge est plus importante que l'épaisseur totale de la couche de base de la cellule.

I.8 Bibliographie

- [1] Djeriouat Khadidja, « Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions GaInP/GaAs ». Mémoire de magister. Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen. 2011.
- [2] Tarek Bouguerra. « Optimisation d'un système photovoltaïque ». Mémoire de Magister en électrotechnique. U. Mentouri Constantine. 2014.
- [3] Thuillier. B, « Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisés à partir d'encres métalliques sur les cellules photovoltaïques en silicium multicristallin », Thèse de doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées, Lyon-France, 2001.
- [4] Angel Cid Pastor. « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France. 2006.
- [5] Alphousseyni Sagna. « Etude et élaboration par Close Spaced Vapor Transport (CSVT), d'absorbants $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ en couches minces polycristallines destinées à la réalisation de photopile sa faible coût ». Thèse de doctorat. Université de Perpignan, France 2016.
- [6] Krour. Safia, « Optimisation Des Paramètres d'une Cellule Photovoltaïque Par les Algorithmes génétiques », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas Setif-I (Algérie), 21-12-2014.
- [7] Abdelhamid Benhaya. « Cellules photovoltaïques de la couche active au panneau solaire photovoltaïque ». Université Batna 2, Algérie. Journées portes ouvertes sur la Faculté des Sciences Exactes (JFSE 2017).
- [8] Mr. Abderrazek Mahfoude, « Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement ». Thèse de doctorat, Université Sétif, 2015.
- [9] W.C. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga. « Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin ». Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 301 – 306, Algérie.
- [10] A. Labouret and M. Viloz, Solar Photovoltaic Energy, 4th edition, Dunod, Paris. 2009.
- [11] B. Equer, Energie Solaire Photovoltaïque, Ellipses, Paris, 1993.
- [12] K. Nakazawa, J. Appl. Phys. 69 (3), 1 Février (1991), p. 1703.
- [13] Omeiri Amar. « Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau ». Mémoire de master. Université de Badji Mokhtar Annaba. 2017

- [14] Zouache Foudil, « Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïque ». Thèse de doctorat. Université de Mentouri Constantine.2009
- [15] Messas Rabah, Ourchane Mokhtar, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique ». Mémoire Master. Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana. 2016.
- [16] M. A. Green et al, Applied photovoltaics; 2ème edition, ARC Centre for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, 2007.
- [17] A. Luque, S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley, England, 2003.
- [18] Saad Motahhir, Abdelaziz Ghzizal, Aziz Derouich. « Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM ». Congrès International de Génie Industriel et Management des Systèmes, Fès, Maroc.hal-0135149, May 2015.
- [19] A. Jain, A. Kapoor, Solar Energy Materials & Solar Cells, 85: 391–396, 2005.
- [20] R. Merahi, R. Chenni, M. Houbes, «Modélisation et simulation d'un module pv par MatLab». 10ème Séminaire International sur la Physique Energétique, Journal of Scientific Research N° 0 vol. 1, (2010).
- [21] E.E. van Dyk, E.L. Meyer, Renewable Energy, 29: 333–344, 2004.
- [22] W. Kim, W. Choi, Solar Energy, 84: 1008–1019, 2010.
- [23] Boukheira Nassira, Mebarki Naima. « Etude et simulation l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux photovoltaïque. Master physique énergétique. Université. ADRAR. 30 Mai 2016.
- [24] Hamdani Khalida. «Elaborations et caractérisations des couches minces des semi-conducteurs absorbeurs pour les applications photovoltaïques ». Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba (2018).
- [25] Pétion Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France. (2009).
- [26] Metai Abdelkader. Chaab Aymen. « Etude et simulation d'un système de production d'énergie photovoltaïque en site isolé ». Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba (2018).

[27] Bensalem Salaheddine, « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires » MAGISTER Option : Energétique et Mécanique des Fluides. Université Ferhat Abbas – Setif: 06/01/2011

[28] Assia Bouraiou, « Élaboration et caractérisation des couches minces CuInSe₂ par Électrodépositions ». Thèse de Doctorat, Université des frères Mentouri de Constantine. 2009.

[29] Nichiporuk Oleksiy, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités », Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 2005.

[30] Thibaut Desrues, « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonction silicium et contacts en face arrière », Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Matériaux de Lyon, France, 2009.

II .1. Introduction

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé pour la fabrication de dispositifs microélectroniques ainsi que des cellules photovoltaïques. Cette filière reste la plus avancée sur le plan technologique à cause des nouveaux procédés de croissance du silicium, de la minimisation des étapes technologiques, de l'optimisation des différentes structures photovoltaïques et la réduction de l'épaisseur des cellules solaires.

Vu la diversité des méthodes d'élaborations des cellules photovoltaïques, les défauts de structure tels que les joints de grains, les dislocations, peuvent avoir un comportement différent sur les propriétés électriques du matériau. Par ailleurs la présence des impuretés dans des concentrations différentes dans les échantillons limite les propriétés photoélectriques du matériau.

Dans ce chapitre nous allons passer en revue les différents types de silicium avant de citer les notions fondamentales du silicium polycristallin, en décrivant sa structure cristalline et ses différentes propriétés cristallographiques, électriques ainsi que les différents modèles de conduction. Dans la dernière partie nous citerons quelques méthodes d'élaboration du silicium polycristallin en couche mince.

II.2. Les différents états du silicium

II.2.1. Etat monocristallin

Le silicium présente les meilleures propriétés électroniques vu sa grande pureté et sa structure constituée d'un seul grain, il est élaboré en phase liquide et à très hautes températures par le procédé CZ (CZochralski) ou par purification par fusion de zones.

La structure cristallographique du silicium monocristallin (Fig. II.1) est une structure cubique diamant dans laquelle deux réseaux cubiques à faces centrées s'interpénètrent. Chaque atome d'un des réseaux est entouré par 4 proches voisins équidistants de l'autre réseau formant un tétraèdre. Les liaisons entre les atomes sont de type covalent avec une distance interatomique de 2.35 \AA et un paramètre de maille $a = 5.43 \text{ \AA}$. La bande interdite (gap), séparant la bande de valence de la bande de conduction est égale à $E_g = 1.12 \text{ eV}$ à température ambiante. Il correspond à un gap indirect puisque le minimum de la bande de

conduction est repéré en un point autre que le maximum de la bande de valence dans la zone de Brillouin. La figure II.2 représente la répartition des niveaux d'énergie du silicium monocristallin et illustre le gap indirect [1].

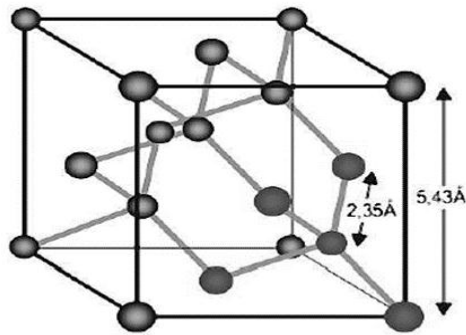


Figure. II.1 : Structure cristallographique du silicium

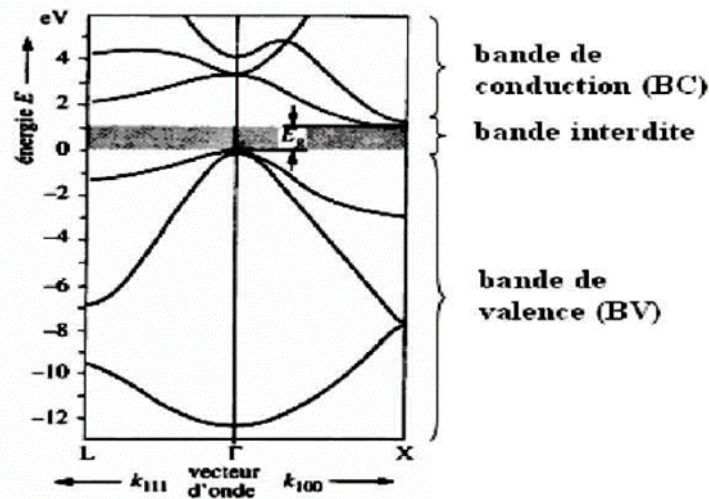


Figure. II.2 : Structure de bandes du silicium monocristallin [2].

II.2.2. Etat amorphe

Cet état est systématiquement défini comme étant dépourvu d'ordre cristallin à longue distance par rapport à la distance interatomique. Les angles inter-liaison et les distances interatomiques ne sont pas respectés et seul un ordre à courte distance peut exister comme l'indique la figure (II.3.b). Le Silicium amorphe (a-Si), présente un coefficient d'absorption plus élevé dans le visible d'un facteur d'environ 100 par rapport au silicium cristallin, du fait du processus d'absorption plus efficace, à transitions directes. [3]

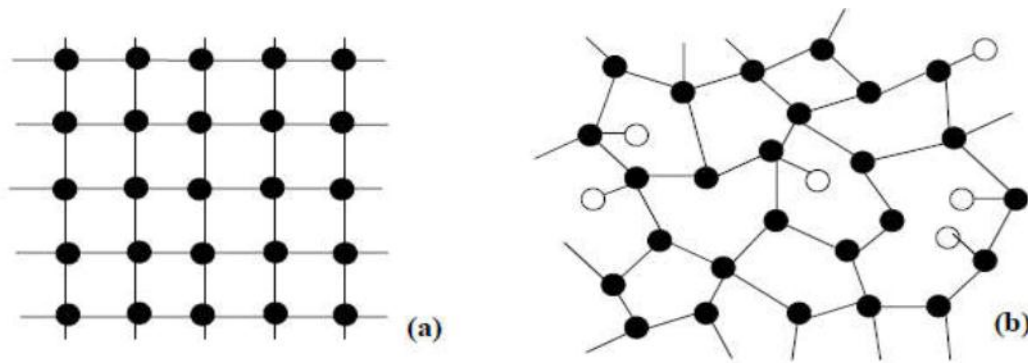


Figure II-3: Représentation schématique de la structure cristalline du silicium (a) : Structure monocristalline, (b) : amorphe.

Ce désordre engendre des queues de bandes de conduction et de valence dans la densité d'état du matériau (Figure II.4). D'autre part, ces distorsions peuvent devenir suffisamment importantes pour empêcher une liaison de se former et ainsi de donner lieu à des liaisons insatisfaites que l'on appelle également liaisons pendantes. Ces dernières ont une très grande influence sur les propriétés électroniques du silicium amorphe.

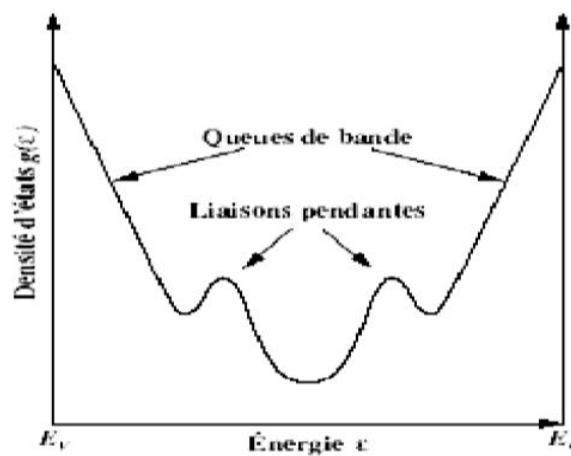


Figure II.4. Densité d'états en échelle logarithmique dans la bande interdite du silicium amorphe [4]

Le silicium amorphe est distingué du silicium cristallin par des avantages telles que :

- Possibilité de le déposer sur des grandes surfaces;
- Possibilité de le déposer sur des surfaces non planes ou souples : intéressant pour la déposition sur cylindres ou sphères (axes de symétrie) ;

- Facilité de fabrication;
- Forte absorption de la lumière visible;
- Peu de dégradation par les rayons X;
- Bande interdite plus élevée (1,75 eV; 1,12 eV pour le silicium cristallin), qui permet d'obtenir des courants inverses dans l'obscurité plus faible.

Le silicium amorphe a aussi quelques inconvénients :

- Beaucoup de défauts, dans la structure;
- Faible mobilité des porteurs libres.

II.2.3. Etat polycristallin

La structure du silicium polycristallin ou polysilicium, se situe entre celle du silicium monocristallin et celle du silicium amorphe. Elle est constituée de grains de silicium monocristallins d'orientations cristallines dont la taille diffère d'un grain à un autre mais reste comprise entre 1 μm et 1 mm qui sont séparés entre eux par des zones désordonnées et riches de défauts cristallins appelée les joints de grains. Les joints de grains délimitant des grains d'orientations différentes constituent des zones désordonnées, souvent assimilées à du silicium amorphe.

Les grains et les joints de grains sont les sièges de deux types de défauts :

- Les dislocations qui induisent l'apparition de liaisons pendantes électriquement actives.
- Les macles qui peuvent être électriquement actives ou non selon qu'elles se terminent à l'intérieur du grain (apparition de dislocations) ou en surface [5].

En fonction de la géométrie des grains, le polysilicium peut se présenter sous deux formes différentes : forme granulaire et la forme colonnaire, comme le montre la figure II.5.

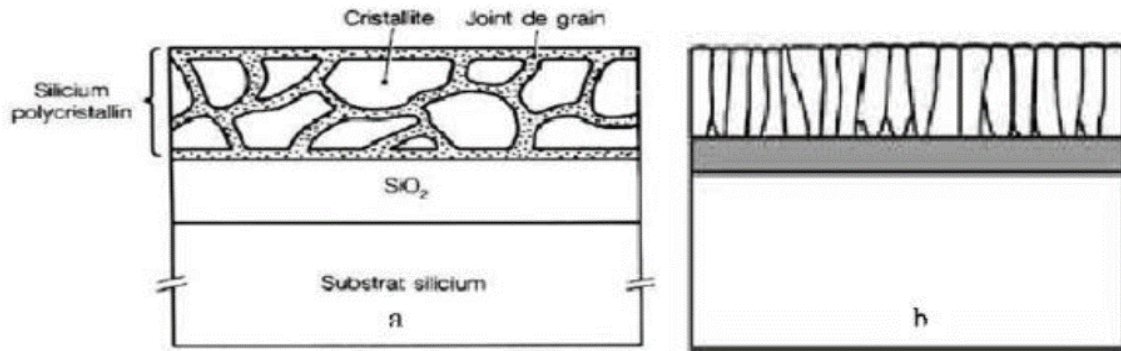


Figure II.5. Structure granulaire (a) et colonnaire(b) du poly silicium [4]

Les grains et joints de grains, possède des caractéristiques propres, Le grain peut être défini par sa taille et par sa qualité cristalline. Alors que les caractéristiques essentielles du joint de grains sont l'épaisseur et la densité de défauts. On peut donc distinguer plusieurs types de silicium poly-cristallin, que l'on peut définir selon certains critères :

- Texture et taille de grains.
- Densité de défauts intra et inter granulaire.
- Rapport du volume cristallin sur le volume amorphe.
- Porosité.

II .3. Propriétés électriques du silicium polycristallin

II.3.1. Phénomènes de conduction électrique dans les films de silicium polycristallin

La conduction électrique dans un matériau polycristallin est étroitement liée à sa microstructure, qui se présente comme un assemblage de grains séparés par les joints de grains. Ces derniers, présentant de nombreuses liaisons incomplètes, sont en grande partie responsables de la limitation de la conduction dans les films polycristallins [6].

Etant donné que la structure cristalline du grain est généralement assimilée à celle d'un monocristal de silicium, toutes les lois classiques relatives à la conduction dans un semi-conducteur sont applicables à l'intérieur du grain. Néanmoins, la qualité cristalline du grain joue un rôle important sur les propriétés structurales et électroniques de ces matériaux. Un grain peut présenter des sous-joints dus à des réseaux de dislocations ou de macles engendrés lors de la croissance du film. D'autre part, un très fort dopage des dépôts, peut entraîner, au

sein même du grain, l'apparition d'agrégats de nature amorphe et électriquement inactifs, qui conduisent également à une dégradation de la qualité du grain.

Les deux constatations précédentes montrent que les défauts inhérents au grain lui-même peuvent représenter également un facteur limitatif de la conductivité dans les films polycristallins. Mais il reste que l'influence du joint de grain est prépondérante sur les propriétés électriques des polycristaux de silicium.

D'une part, la concentration en porteurs libres (trous et électrons) dans le silicium polycristallin est inférieure à celle dans le silicium monocristallin [7]. Par conséquent, la résistivité du silicium polycristallin est supérieure à celle du silicium monocristallin sauf pour les fortes concentrations en éléments dopants pour lesquelles les résistivités deviennent identiques. D'autre part, plus les grains sont larges, plus la résistivité du Si polycristallin se rapproche de celle du monocristallin pour les faibles concentrations de dopage [8]. Donc, il existe une certaine concentration d'éléments dopants dite critique pour laquelle la résistivité décroît brusquement pour se rapprocher de celle du silicium monocristallin. L'origine de cette décroissance brutale a été expliquée par deux modèles : le modèle de ségrégation des éléments dopants et le modèle de piégeage des porteurs aux joints de grains.

a. Le modèle de ségrégation des éléments dopants:

Ce modèle [9] a été proposé pour expliquer la variation de la résistivité en fonction de la concentration de dopant. L'hypothèse de départ est que les joints de grains constituent des sites préférentiels pour la ségrégation des atomes de dopant. Il suppose que les atomes d'impuretés et notamment les dopants diffusent prioritairement vers les joints de grains où ils deviennent électriquement inactifs. Les éléments dopants s'accumulent aux joints de grains jusqu'à saturation des sites de ségrégation puis diffusent vers les grains provoquant alors la réduction de la résistivité et l'augmentation de la densité des porteurs libres.

Ce modèle, n'est pas en mesure d'expliquer la variation de la résistivité avec la température, et le minimum de la mobilité de Hall des porteurs, observé aux concentrations intermédiaires de dopant.

b. Le modèle de piégeage des porteurs [10] :

Il considère la présence d'états pièges dans les joints de grains qui attirent les porteurs majoritaires. Ils deviennent chargés et créent des barrières de potentiel qui s'opposent au déplacement des porteurs de charge. Lorsque le dopage est élevé et atteint la concentration critique, tous les pièges se retrouvent saturés et la hauteur de la barrière est à son maximum.

Une augmentation du dopage provoque alors une diffusion des porteurs dans le grain et la diminution de la barrière de potentiel. La mobilité des porteurs de charge augmente, provoquant une décroissance brutale de la résistivité. En conséquence, pour atteindre une résistivité proche du silicium monocristallin, il est nécessaire que les cristallites composant le silicium polycristallin soit très larges.

Ce modèle est basé sur un certain nombre d'hypothèses :

- Grains identiques de taille L .
- Les joints de grains ont une épaisseur négligeable par rapport à la taille des grains, et contiennent une densité d'états pièges Q_t , situés à un niveau d'énergie E_t par rapport au niveau intrinsèque dans la région neutre.
- Les pièges sont initialement neutres et se chargent en piégeant des porteurs.
- Présence d'un seul type d'atomes de dopant uniformément distribués et totalement ionisés avec une concentration N dans la couche de silicium polycristallin.

II.3.2. Propriétés des porteurs minoritaires dans le silicium polysilicium

Les propriétés de transport des porteurs minoritaires à savoir la durée de vie, la vitesse de recombinaison en surface et la longueur de diffusion jouent un rôle important dans la détermination des performances de cellules photovoltaïques. C'est pour cela qu'il est important de comprendre leurs comportements aux joints de grains, car leur phénomène de recombinaison et leur durée de vie influe directement sur la valeur du photocourant dans la cellule solaire. Dans le cas du silicium polycristallin, ces propriétés dépendent non seulement de la qualité cristalline, de la pureté et des dimensions du grain, du dopage mais aussi et surtout de l'activité électrique des joints de grain.

II.3.2.1. Mécanismes de recombinaison et durée de vie des porteurs minoritaires

Plusieurs travaux ont été consacrés à la problématique des mécanismes de recombinaison de ces porteurs minoritaires en développant la dépendance de la durée de vie des porteurs minoritaires en fonction de la concentration de dopant, de la dimension des grains et de la densité des états d'interface aux joints de grains dans le polysilicium [8].

Les porteurs minoritaires sont métastables et n'existeront en moyenne que pour un temps égal à la durée de vie τ . Elle correspond au temps moyen entre la création d'une paire électron-trou et sa recombinaison.

Les principaux mécanismes de recombinaison des porteurs de charge libres dans les semi-conducteurs sont:

(1) les mécanismes de recombinaison via les centres profonds (ou recombinaison Shockley-Read-Hall, SRH) introduits par les défauts cristallins (ponctuels, linéaires, 2D et 3D) et les atomes impurifiés (en insertion ou en substitution),

(2) les recombinaisons radiatives ou bande à bande et (3) les recombinaisons Auger.

Dans les semiconducteurs à gap indirects comme le silicium cristallin les recombinaisons sont, principalement, de type SRH et Auger. A ces trois mécanismes de recombinaison, on peut ajouter les recombinaisons de type SRH à la surface ou, tout simplement, recombinaisons en surface par opposition aux recombinaisons (SRH, radiatives et Auger) qui ont lieu dans le volume.

A chaque mécanisme de recombinaison des porteurs de taux R est associée une durée de vie τ par la relation :

$$R = \frac{\Delta n(p)}{\tau} \quad (1)$$

Avec $\Delta n(p)$: concentration de porteurs en excès.

Les quatre mécanismes de recombinaison peuvent exister à la fois dans le même matériau, mais avec des proportions différentes. Dans un matériau à gap indirect comme le silicium les recombinaisons radiatives sont négligeables devant les recombinaisons Auger et SRH. Dans les matériaux très dopés ce sont les recombinaisons Auger qui prédominent en volume. Les recombinaisons en surface sont plus influentes dans les couches minces que dans les substrats épais même avec passivation. En général, on parle plutôt d'un taux de recombinaison effectif englobant les taux de recombinaisons en volume et aux surfaces:

$$R_{\text{eff}} = R_{\text{SRH}}^{\text{volume}} + R_{\text{Auger}} + R_{\text{rad}} + R_{\text{SRH}}^{\text{s.arriere}} + R_{\text{SRH}}^{\text{s.frontale}} \quad (2)$$

A ce taux de recombinaison effectif correspond une durée de vie effective, définie par:

$$\frac{\Delta n}{\tau_{eff}} = \frac{\Delta n}{\tau_{SRH}} + \frac{\Delta n}{\tau_r} + \frac{\Delta n}{\tau_A} + \frac{S_f \Delta n_s}{W} + \frac{S_r \Delta n_s}{W} \quad (3)$$

En supposant que la concentration des porteurs à la surface égale à celle en volume $\Delta n = \Delta n_s$ (ce qui est valable pour une bonne passivation des surfaces) et qu'on a la même vitesse de recombinaison S des porteurs sur les deux surfaces, dans ce cas on trouve que:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_A} + \frac{2S}{W} \quad (4)$$

Dans les travaux de A. K. Ghosh [11] qui portent sur l'effet de la taille des grains sur les propriétés photovoltaïques du polysilicium (durée de vie, longueur de diffusion des minoritaires), montrent que la durée de vie augmente avec la taille des grains, de 10^{-11} s à 10^{-5} s lorsque les grains passent de $0.01 \mu m$ à $10^3 \mu m$. Ces faibles valeurs ainsi que leur dépendance linéaire avec d traduisent le fait que la durée de vie est entièrement contrôlée par la recombinaison aux joints de grains. La relation empirique déduite par Ghosh est donnée par :

$$\tau_{eff} = 5 \cdot 10^{-6} d \quad (5)$$

avec τ_{eff} en μs et d en μm .

Toujours d'après cet auteur, il est important d'indiquer la relation entre taille des grains et dopage. En effet, il se trouve une linéarité entre dopage et taille des grains et cette dernière diminue quand le dopage du silicium polycristallin augmente.

II.3.2.2. Vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires

Le calcul de la vitesse de recombinaison au joint de grain nécessite la connaissance détaillée de la distribution de $N_S(E)$ [12]. En général, il est approché par l'expression suivante :

$$S_{jg} = \sigma v_{th} N_T \quad (6)$$

Où σ est la section efficace de capture (cm^2), v_{th} est la vitesse thermique et N_T est la densité d'états d'interface effectivement actifs.

Dans cette expression, la vitesse de recombinaison est directement proportionnelle à la densité des états d'interface ionisés. Sa valeur maximale est fixée par la vitesse thermique des porteurs:

$$v_{th} = \left(\frac{3kT}{m^*}\right)^{\frac{1}{2}} \approx 10^7 \text{ cm/s à } 25^\circ\text{C} \quad (7)$$

Ce modèle prévoit que la vitesse de recombinaison aux joints de grains augmente de façon monotone avec N_T , avec le niveau d'injection et avec le dopage de base. Par ailleurs, en considérant dans le cas du régime stationnaire que les courants de recombinaison aux joints des grains et dans les grains sont égaux, le modèle de D. P. Bhatt prévoit un maximum de la vitesse de recombinaison aux joints des grains en fonction du dopage, pour une taille de grain donnée.

D'après ce modèle, la vitesse de recombinaison est d'autant plus élevée que le grain est petit. L'activité recombinante des joints des grains atteint un maximum en fonction du niveau de dopage. Afin d'éviter cette recombinaison très néfaste, nous devons choisir selon la taille de grains, un dopage soit plus faible soit plus élevé que celui où se situe le maximum.

Les travaux de Kazmerski [13] indiquent que l'ordre de grandeur de la vitesse de recombinaison aux joints de grains dans le polysilicium à applications photovoltaïques est compris entre 10 et 10^6 cm/s, et montre que cette vitesse augmente linéairement en fonction de la barrière de potentiel du joint de grain sous illumination, qui peut varier de 0.05 à 0.2 Volt.

II.3.2.3. Longueur de diffusion des porteurs minoritaires

La longueur de diffusion des porteurs minoritaires peut être vue comme la distance moyenne qu'un porteur excédentaire peut parcourir sans qu'il ne soient pas recombiné et elle est exprimée dans le cas du silicium de type p par :

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (8)$$

Où D_n est le coefficient de diffusion et τ_n est la durée de vie.

La longueur de diffusion L_n est généralement comparée à l'épaisseur de la cellule photovoltaïque: les porteurs photogénérés suffisamment proche de la zone de collecte seront collectés tandis que ceux générés au-delà seront perdus. On voit la nécessité d'une longueur de diffusion L_n élevée. Cependant, l'efficacité de collecte peut être facilitée par la diminution de l'épaisseur de la cellule. La longueur de diffusion est inhérente à la durée de vie des porteurs minoritaires et elle varie sur plusieurs ordres de grandeur.

Par rapport à la longueur de diffusion dans le silicium monocristallin, l'influence de la recombinaison aux joints des grains dans le silicium polycristallin se traduit par un minimum aux alentours de $4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (qui correspond au pic de la vitesse de recombinaison en fonction du dopage). Pour des dopages plus élevés, la longueur de diffusion ($N_A > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) est dégradée par effet Auger [14].

II .4. Procédés d'élaboration des couches minces

On appelle couche mince un matériau dont l'une des dimensions, en général l'épaisseur est très petite devant les deux autres dimensions, a été fortement réduite et que l'on exprimera habituellement en nanomètres (nm) ou en angströms (Å) [15].

Le but de la couche mince est de donner des propriétés nouvelles à la surface de l'élément avec l'avantage de garder des propriétés massives du substrat, cette perturbation des propriétés physiques est due à la faible distance entre les deux surfaces limites (quasi bidimensionnel) [16].

Les propriétés physiques originales des couches minces vont dépendre notamment de deux caractéristiques essentielles liées aux conditions de dépôt: la microstructure et les contraintes mécaniques. Ainsi, le changement des propriétés magnétiques d'une couche mince par rapport au matériau massif est lié à la forme, à la taille des grains, à la présence de joints, à leur composition, à la distribution des cations mais aussi aux contraintes. Les champs coercitifs peuvent en effet être plus forts à cause du phénomène de magnétostriction lié à la présence d'un état contraint. D'autre part, les propriétés électriques sont liées majoritairement à la densité de la couche et aux caractéristiques des zones inter-granulaires. Plus le revêtement est poreux plus la résistivité aura tendance à être élevée [17].

La réalisation des couches minces repose sur un certain nombre de variétés de techniques sous vide, classées en deux grandes familles en fonction du processus qui est utilisé : les méthodes physiques : les procédés de dépôts PVD regroupent principalement l'évaporation et la pulvérisation cathodique sous toutes formes, et les méthodes chimiques : les techniques de dépôt en phase vapeur chimique (CVD : Chemical Vapor Deposition).

II .4. 1. Dépôts physiques

II .4. 1. 1. Evaporation

L'évaporation est une technique d'obtention des films sous vide qui consiste à évaporer ou sublimer un matériau (figure II.6). Le dépôt se fait par condensation de la phase vapeur sur un substrat. Les vapeurs du matériau à déposer sont obtenues en chauffant celui-ci par différents moyens : effet Joule, induction (couplage d'un générateur haute fréquence), canon à électrons, faisceau laser ou arc électrique. L'évaporation est effectuée sous un vide poussé (pression de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} Pa) dans le but d'augmenter sa vitesse [18].

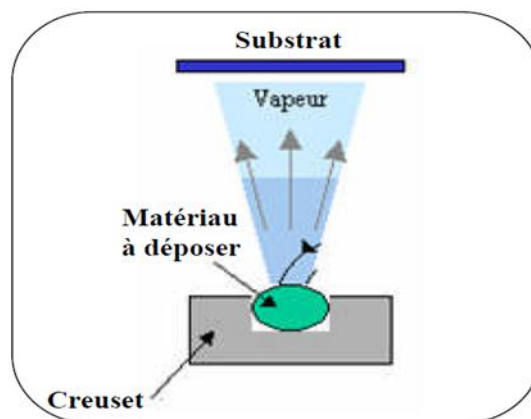


Figure II.6 : Principe de l'évaporation thermique [19]

Les dépôts sont réalisés sous vide poussé de façon à conférer une grande pureté aux couches. Plus la pression est basse, plus les trajectoires des particules vaporisées seront rectilignes. Dans ce cas, seules les parties du substrat directement en regard de la source seront recouvertes [20].

Cette technique nécessite l'utilisation d'une puissance suffisante pour mettre en vapeur les composés les plus réfractaires. De plus, l'énergie des particules arrachées à la source est relativement faible, ce qui entraîne une adhérence médiocre. En revanche, les inconvénients que présente cette technique sont l'élaboration de film souvent sous stœchiométriques, une faible adhésion des couches et la nécessité d'une densité de puissance assez importante pour produire la phase gazeuse des matériaux ayant un point de fusion très élevé [19].

II .4. 1. 2. Pulvérisation

La pulvérisation cathodique est un procédé de dépôt sous vide fonctionnant à froid en plasma lumineux permettant de déposer tout type de matériau : simple ou composé, réfractaire ou non, conducteurs ou diélectriques, tous les types de substrats qui acceptent la mise sous vide et un léger échauffement (60 à 70°C) peuvent être traités par ce procédé [21].

Cette technique consiste à éjecter des particules de la surface d'un solide par le bombardement de cette surface avec des particules énergétiques, en général des ions d'argon. L'application d'un champ électrique entre les électrodes formées par la cible et le substrat permet d'ioniser le gaz introduit formant ainsi un plasma. La cathode exerce une attraction sur les ions présents dans le plasma. La quantité de mouvement cédée au moment du choc entraîne l'éjection des atomes de la cible.

En pulvérisation cathodique, nous distinguons la pulvérisation simple et la pulvérisation réactive. Dans la pulvérisation simple, l'atmosphère de la décharge est chimiquement neutre, c'est-à-dire que l'on produit un vide de 10^{-6} torr. On injecte ensuite le gaz d'argon pur pour créer le plasma. Dans le cas de la pulvérisation cathodique réactive l'atmosphère du plasma est réactive, on introduit dans l'enceinte, en plus de l'argon, un gaz qui va réagir chimiquement avec les atomes pulvérisés du matériau à déposer.

Cette méthode permet d'avoir des dépôts de faible résistivité et des couches de bonne stoechiométrie ayant une transmission moyenne dans le visible [22]. De plus, elle permet de déposer des matériaux sur des grandes surfaces avec des vitesses de dépôt élevées, à la différence avec d'autres techniques. Ces caractéristiques rendent la pulvérisation cathodique très intéressante pour certains procédés industriels [23].

Il existe différents types de systèmes de pulvérisation cathodique, suivant le mode de création du plasma ou la nature de la cible (conductrice ou isolante) : diode à courant continu, triode à courant continu, ou haute fréquence.

a) Pulvérisation cathodique diode en courant continu (DC)

Un dispositif de pulvérisation cathodique diode est composé d'une enceinte à vide où règne une pression résiduelle inférieure à 10^{-3} torr, dans laquelle ont été disposées deux électrodes planes, cathode et anode, distante de quelques centimètres. La cathode froide, sur

laquelle le matériau à pulvériser est fixé, est reliée au pôle négatif d'un générateur de tension de quelques kilovolts. L'anode, sur laquelle se trouve le substrat, est reliée à la masse [24].

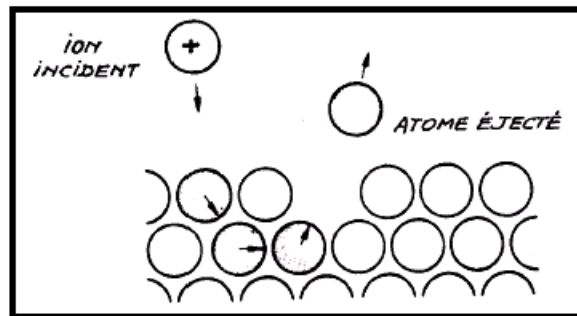


Figure. II.20 : Phénomène de collisions sur les atomes de la cible matériau à pulvériser

Dans le cas de la pulvérisation DC le plasma se forme lorsque le gaz qui se trouve entre les deux électrodes est mis sous tension, les électrons qui existent préalablement dans le gaz seront accélérés par le champ appliqué et ils vont rencontrer des atomes du gaz et les ioniser. Ces ions chargés positivement vont être attirés par la cathode (la cible) ou ils vont réagir avec les atomes de la cible produisant l'arrachage de ces derniers et comme les particules éjectées de la cible sont majoritairement neutres, elles traversent l'espace inter-électrode sans être soumises à l'action du champ électrique [21].

b) Pulvérisation cathodique à effet magnétron :

La décharge électrique continue (DC) est obtenue par application d'une tension continue V sur l'électrode qui crée un champ électrique. Quand on place derrière la cible des aimants de la manière présentée dans la figure II.71, on obtient devant la cible une zone où le champ magnétique est pratiquement parallèle à la cible, c'est-à-dire perpendiculaire au champ électrique, et la combinaison des deux, oblige les électrons à suivre un trajet non linéaire, généralement spiroïdal ou cycloïdal, ce qui provoque beaucoup plus de collisions avec l'argon et augmente son taux d'ionisation. L'augmentation de la concentration ionique se concrétise par une augmentation de la vitesse de pulvérisation donc de dépôt. Le seul inconvénient de cette pulvérisation est l'apparition d'une érosion non-uniforme de la cible [25].

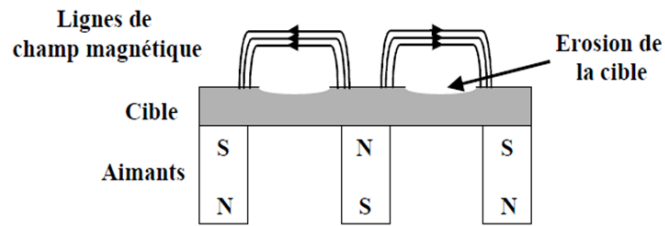


Figure II.7. Principe de la cathode à effet magnétron.

c) Pulvérisation radio fréquence (RF)

Dans le cas des matériaux isolants, l'alternance de polarité permet d'éviter l'accumulation de charges sur la cible, qui empêcherait sa pulvérisation en supprimant le puit de potentiel lié à la gaine. La polarisation RF de la cathode nécessite une boîte d'accord afin d'adapter l'impédance du générateur à celle du plasma et d'annuler ainsi la puissance réfléchi par celui-ci (figure II.8) [23].

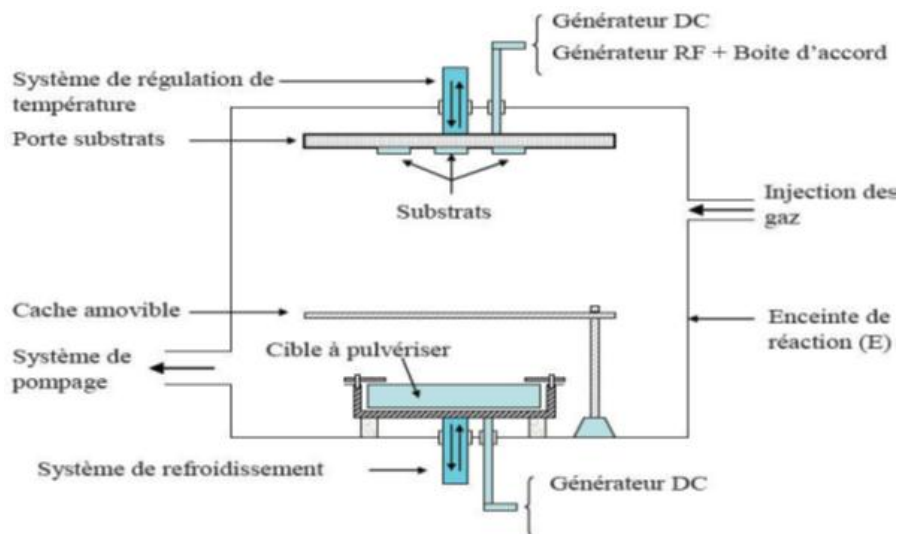


Figure II.8 : Principe de la Pulvérisation radio fréquence (RF)

La fréquence du signal utilisé en mode RF est de 13,56 MHz (d'où l'appellation RF : Radio Fréquence). Vu leur taille, les ions d'argon apparaissent immobiles par comparaison aux électrons qui jouissent d'une grande mobilité et peuvent suivre les variations du signal. Par conséquent, la cible se voit en permanence bombardée par des électrons ; de ce fait elle s'autopolarise négativement. Cette tension d'autopolarisation est un paramètre important pour le dépôt car elle joue le rôle de la tension accélératrice pour les ions qui vont pulvériser le

matériau de la cible : elle influe directement sur leur énergie par suite sur la vitesse de dépôt de la couche.

En pulvérisation RF le trajet des électrons est plus long que dans le cas de la pulvérisation DC, il en résulte un meilleur taux d'ionisation dans la première méthode où il est possible de travailler à faible pression de gaz dans la chambre de dépôt (jusqu'à une pression de 10^{-4} mb). Contrairement à la pulvérisation en mode DC la pression des gaz ne doit pas être inférieure à 10^{-2} mb [26].

II .4. 1. 3. Ablation laser

L'ablation laser (PLD pour **Pulsed Laser Deposition**) consiste à focaliser un faisceau laser (généralement les radiations laser sont dans l'UV), sur un matériau dans le but de le vaporiser puis de condenser les particules ionisées sur un substrat chauffé ou non. Il est à noter que les particules ionisées ont une haute énergie cinétique (quelques dizaines d'électronvolts).

Les avantages de la PLD sont multiples. C'est un procédé de laboratoire qui permet la possibilité de réaliser par ablation laser des couches minces possédant des propriétés particulières (supraconducteurs à haute température critique, ferroélectriques, lubrifiants solides...), ainsi le transfert stœchiométrique de la matière de la cible vers le substrat. la pureté des cibles est le seul paramètre influençant la pureté des dépôts (dépôt sous ultra vide ou en atmosphère résiduelle) [27].

Cette technique permet d'obtenir des films de meilleure qualité que ceux obtenus avec d'autres méthodes de dépôt comme l'évaporation ou la pulvérisation cathodique.

II .4. 1. 4. Epitaxie par jets moléculaires

Cette technique consiste à déposer les couches par épitaxie sur un substrat bien chauffé sous ultravide, c'est à dire on obtient des flux atomiques par la vaporisation d'un matériau comme Nickel puis on prend sa vapeur et la déposer sur un substrat. Le déroulement sous ultra vide ou bien à très basse pression a pour objectifs d'éviter toute sorte de contamination entre les espèces réactives, trouvées dans des cellules Knudsen et d'éventuel gaz résiduel. La très basse pression permet aussi le contrôle à l'échelle atomique. La croissance de ces couches minces très complexe se fera couche après couche sous une basse température qui ne

dépassera pas 900°C, contrairement aux précédentes techniques qui nécessitaient une haute température. Cependant, cette méthode à une faible vitesse de croissance de 2 $\mu\text{m}/\text{h}$ maximum [28].

II .4.2. Dépôts chimiques

II .4.2.1. Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Le dépôt en phase vapeur (CVD) est une technique dans laquelle, le ou les constituants d'une phase gazeuse réagissent pour former un film solide sur un substrat. Les composés volatils du matériau à déposer sont éventuellement dilués dans un gaz porteur et introduits dans une enceinte où sont placés les substrats. Le film est obtenu par réaction chimique entre la phase vapeur et le substrat chauffé [29]. Les principaux paramètres à contrôler lors des dépôts CVD sont : la nature et la température du substrat, la composition chimique des produits de départ, le ou les flux de gaz, la pression totale et la géométrie de la chambre de réaction. L'avantage de cette technique est la rapidité de mise en œuvre pour l'obtention des couches minces, et cela à des températures relativement basses. Les principales faiblesses associées à cette technique sont la déformation du substrat due au gradient thermique et la diffusion d'impuretés provenant du substrat (figure II.9).

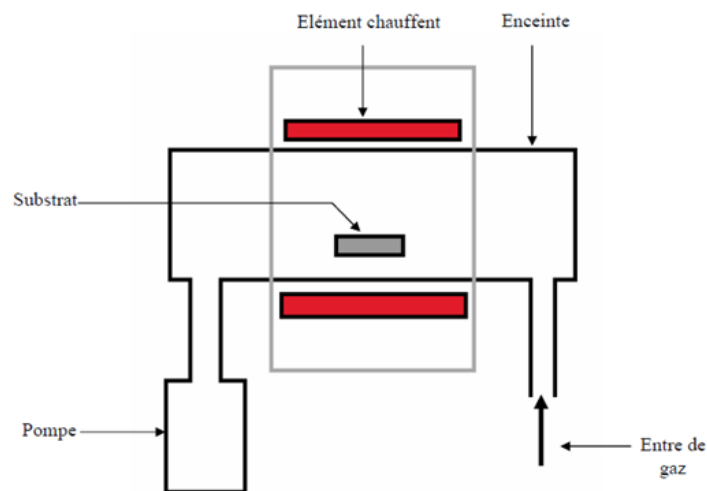


Figure II.9 : Dépôt en phase vapeur (CVD).

II.4.2.2. MOCVD

La MOCVD est une variante de CVD, qui a été classée ainsi en raison de l'utilisation des matériaux organométalliques comme précurseurs. La méthode peut être utilisée pour déposer une grande variété de matériaux sous forme amorphe, épitaxiale ou polycristalline. Le choix du dépôt CVD organométallique résulte de diverses considérations : l'instabilité thermique de ces composés permet d'obtenir leur décomposition et leur réaction à plus basse température ce qui minimise l'inter diffusion. L'intérêt industriel pour cette technique est encore limité du fait du prix élevé de ces précurseurs qui permettent de limiter le risque de toxicité [30].

Lorsque la température de dépôt est inférieure à 500°C, la réaction de MOCVD est cinétiquement limitée. Alors que dans une plage de température moyenne entre 550°C et 750°C, la réaction est limitée par la diffusion. A des températures supérieures à 800°C, la réaction est limitée par la réaction homogène et le dépôt parasite sur la paroi de réacteur [31]. Une illustration de cette technique est représentée par la figure II.10.

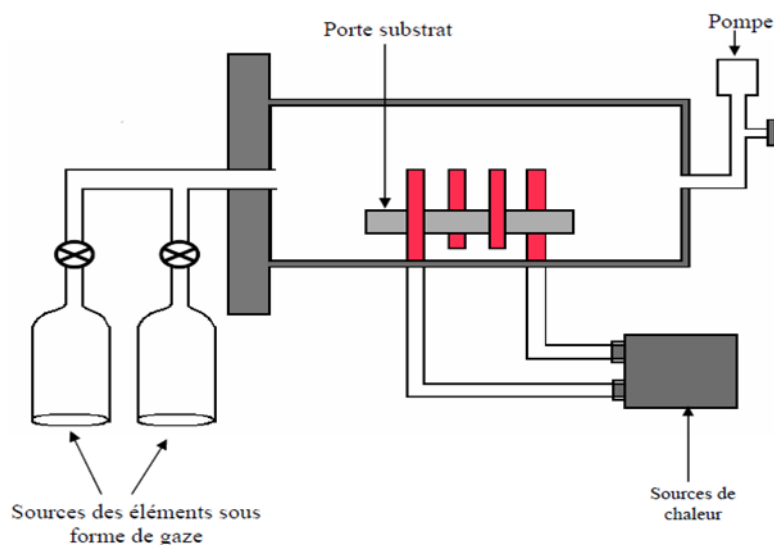


Figure II.10 : Dépôt CVD organométallique (OMCVD).

II.4.2.3. Transport chimique en phase vapeur à court distance (CSVVT)

La CSVVT est une technique d'élaboration de couches minces qui utilise le principe qui consiste à faire croître sur un substrat une couche relativement mince à partir de composés en phase gazeuse avec l'obtention d'un équilibre chimique réversible. La distance qui sépare le

substrat de la cible dans la CSVT est de l'ordre du millimètre, tandis qu'elle est de plusieurs centimètres pour la CVD. Cette faible distance confère à la CSVT beaucoup d'avantages tels qu'un gain de matière (taux de dépôt élevé et faible perte de matière) et une grande homogénéité des couches. La CSVT peut ainsi donc être une solution crédible pour la fabrication de photopiles solaires à grandes surfaces [32]. Elle permet d'avoir des échantillons à faible coût.

II .4.2.4. Electrodeposition

Le but de cette technique est d'appliquer une couche superficielle sur un métal pour conférer à cette surface les différentes propriétés désirées. L'électrodeposition est une réaction d'oxydoréduction qui est déclenchée par une source de courant. Le dépôt est réalisé en créant une charge négative sur l'objet, qui est recouvert par son immersion dans une solution contenant un sel du métal à déposer. Les ions métalliques du sel portant une charge positive sont ainsi attirés par l'objet (figure II.11) [33].

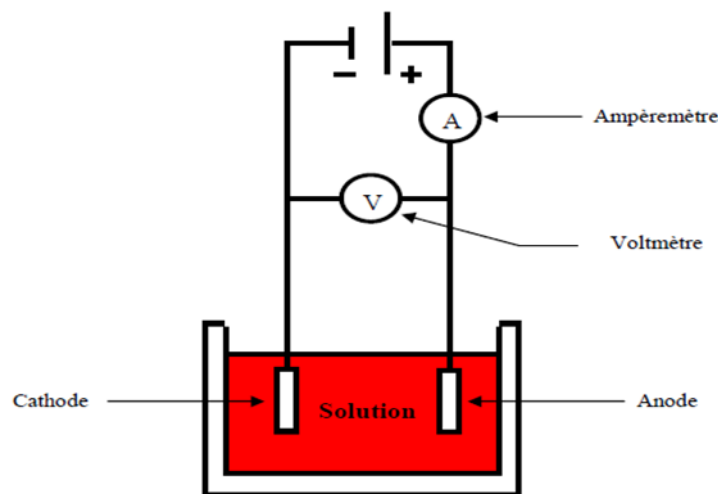


Figure II.11 : Technique d'électrodeposition

II .4.2.5. La Sérigraphie

La sérigraphie est une technique économique qui permet de reproduire un motif sur différents types de supports (les contraintes sont alors liées au type d'encre utilisée et à l'étape de cuisson que le substrat doit pouvoir supporter). Une racle mouvante permet d'étaler la pâte posée sur un écran. Sous l'effet de la pression, la pâte traverse les mailles de l'écran au niveau des motifs ouverts. Le dépôt sur le substrat reproduit ainsi le motif. La sérigraphie est très

répandue dans l'industrie textile, papeterie, céramique, et électronique pour la réalisation des circuits hybrides, des électrodes de multicouches et des épaisseurs de diélectriques comme de conducteur. Ainsi cette technique est utilisée pour fabriquer les contacts en face avant et arrière des cellules solaires.

Les dépôts par sérigraphie font de quelques microns à plusieurs centaines de microns. L'épaisseur du dépôt dépend de nombreux paramètres tels que la viscosité de l'encre, la vitesse de dépôt, la pression etc... [34].

II .4.2.6. Sol gel

L'appellation sol-gel est l'abréviation des termes « solution-gélification » consiste à hydrolyser grâce à l'humidité de l'air un précurseur de la solution qui se présente sous forme d'une suspension colloïdale d'oxydes. Ces sols vont évoluer au cours de l'étape de gélification par suite réaction chimique de type polymérisation entre les espèces en suspension et le solvant, pour former un réseau réticulé tridimensionnel (état gel) lequel formera le film après un séchage dont les conditions détermineront les propriétés finales du film [35].

Pour réaliser le dépôt deux techniques sont utilisées : le dip-coating (revêtement d'une pièce par trempage), et le spin-coating (étalement du dépôt par la force centrifuge).

II.5 Bibliographies

- [1] Zabardjade Saidbacar. « Élaboration et caractérisations du silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe ». Thèse de doctorat. Université paris sud. 2012.
- [2] Francis Levy, Traite des Matériaux : Physique et technologie des semi-conducteurs. Vol. 18, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1995.
- [3] Benyettou Fathi. « Etude et Modélisation d'une cellule photovoltaïque au silicium polycristallin à l'aide de PSpice ». Magister en Physique. Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2013.
- [4] Hamida Ayed. « Contribution à l'étude des propriétés du silicium microcristallin ». Thèse Doctorat en Science. Université Badji Mokhtar Annaba, 2017.
- [5] Emmanuel Jordana. « Conception, réalisation et caractérisation de grilles en silicium polycristallin déposé amorphe à basse température et dopé bore in situ ». Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier - Toulouse III, France. 2005.
- [6] H. J. Moller, '*Semiconductors For Solar Celles*', Artech House. Inc. Norwood, MA (1993).
- [7] Fella Boulgamh. « Etude du comportement électrique des semi-conducteurs multi cristallins à base de silicium – effet des joints de grains ». Thèse de Doctorat en Sciences. Université des frères Mentouri Constantine 1, 2018.
- [8] Ghennou Souad. « Etude et simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de silicium polycristallin ». 5ème Conférence International des Energies Renouvelables, vol 31.pp2-17, Université Tahri Mohamed Bechar, (cier-2017).
- [9] M. E. Cowher, T. O. Sedgwick, J. Electrochem. Soc, 119, 1565, (1972).
- [10] J. Y. W. Seto, J. Appl. Phys, 46, 47, 52, (1975).
- [11] Benloucif Nisrine. « Potentialités de films de silicium polycristallin LPCVD destinés à l'étude d'une cellule solaire multicouches ». Thèse de doctorat. Université des frères Mentouri Constantine.
- [12] D. P. Joshi and D. P. Bhatt, *Solar Energy Materials*, Vol.22, p.137 (1991)

- [13] L. L. Kazmerski, *Solid-State Electron*. 21, 1545 (1978).
- [14] Abdellatif Zerga, « Caractérisation, Modélisation et Simulation Numérique des cellules photovoltaïques à base de silicium polycristallin en couche mince déposée par "RT-CVD" ». Thèse de doctorat. Université Abou Bakr BELKAÏD – Tlemcen, (2005).
- [15] M. Khechba, « Elaboration et étude des couches minces d'oxyde d'étain ». Thèse de doctorat, Université de Constantine, Algérie, (2008).
- [16] Béchir Dridi Rezgui, "Etude des propriétés optiques, électriques et structurales de nanoparticules de silicium insérées dans une matrice diélectrique et étude de leur intégration pour des cellules photovoltaïques à haut rendement". Thèse de doctorat, Institut des Nanotechnologies de Lyon, France, (2010).
- [17] Bruno Mauvernay, « Nanocomposites d'oxydes de fer en couches minces. Études de leur élaboration et de leurs propriétés en vue de leur utilisation comme matériaux sensibles pour la détection thermique », Thèse de doctorat. Université de Toulouse, (2007).
- [18] T. Minami, S. Ida, T. Miyata, Y. Minamino, *Thin Solid Films*, 445 (2003) 268.
- [19] M. Khechba, « Caractérisation de la réaction interfaciale entre une couche mince de tungstène et un substrat d'acier », Thèse de magister. Université Constantine, (2008).
- [20] A. Mennad. *Revue des Energies Renouvelables* Vol 18 N°4 (2015) 713 - 719
- [21] H. Berkane. *Sciences et Technologie A – N°40*, Décembre 2014, 39-44
- [22] Noua Bouhssira. « Elaboration et Caractérisation des Couches Minces d'Oxyde de Zinc par Evaporation ». Mémoire de Magister. Université Mentouri Constantine, 2005.
- [23] Majda Mokhtari. « Produits de pulvérisation cathodique magnétron d'alliages légers à base d'aluminium. -Caractérisations microstructurales et physico-chimiques ». Thèse doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba, 2016.
- [24] http://www.pulvérisation.fr/cathodique/ymj02_ch1word4.htm.

[25] Abdellah Moustaghfir, "Elaboration et caractérisation de couches minces d'oxyde de zinc. Application à la photoprotection du polycarbonate", Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal –France (2004).

[26] M. S. Aida, «Elaboration et caractérisation des couches minces de silicium amorphe Hydrogéné préparées par pulvérisation cathodique : étude des effets de la puissance R.F ». Thèse de Doctorat. Université de Constantine, (1994).

[27]: <http://www.univ-st-etienne.fr/tsi/slaser/recher.html>

[28] Mohamed Mimoune. « Etude des capteurs photovoltaïques basés sur les nanotechnologies Maitrise en génie électrique ». Universités du Québec À Trois-Rivières. (2016).

[29] Younsi Ahmed Memdouh, « Elaboration et caractérisation des couches minces CuInSe₂ par électrodéposition (effet de recuit) ». Mémoire de Magister, Université Ziane Achour-Djelfa, (2015).

[30] I.H. Choi, D.H. Lee, Thin Solid Films, 515, 4778–4782, (2007).

[31] Monica Larissa Djomeni Weleguela. Etude de l'intégration de vias traversant réalisés par MOCVD en vue de l'empilement en 3D des composants microélectroniques. Thèse de doctorat en Electronique, microélectronique, photonique, Université de Strasbourg, France, 2014.

[32] Alphousseyni Sagna. « Etude et élaboration par Close Spaced Vapor Transport (CSVT), d'absorbeurs Cu₂ZnSnS₄ en couches minces polycristallines destinées à la réalisation de photopile sa faible coût ». Thèse de doctorat. Ecole doctorale ED 305 et des unités de recherche (PROMES CNRS UPR 8521) Perpignan, France/de l'école doctorale ED-PCSTUI et du Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire (LASES),Dakar, SENEGAL, (2016).

[33] A.M. Fernandez, R.N. Bhattacharya, Thin Solid Films, 474, 10–13, (2005).

[34] Florian Very-Alvergnas. « Capteur acoustique sérigraphie pour application haute température ». Thèse de doctorat. Ecole doctorale I2S: Informations, Structures et Systèmes Et de l'unité de recherche IES UMR5214: Institut d'Électronique et des Systèmes, 2015.

[35] Kadis. Daoudi « Élaboration et caractérisation de films minces d'oxyde d'indium dopé à l'étain obtenus par voie Sol-Gel ». Thèse de doctorat. Université Claude Bernard-Lyon 1, (2003).

III.1. Introduction

La simulation numérique est la représentation initiative du fonctionnement d'un système ou d'un phénomène physique quelconque sans expérimentation. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène comme s'il s'était réellement déroulé. Ces dernières années, les chercheurs se sont orientés vers la simulation numérique, en raison des coûts élevés de l'expérimentation et la fabrication des cellules solaires. Elle permet d'éviter la fabrication de plusieurs prototypes de la cellule avec des paramètres différents, indépendante de la technologie utilisée, ainsi elle est très rapide, donc gagnant du temps et de l'argent.

Dans ce chapitre, nous allons étudié l'influence des paramètres géométriques et physiques tel que l'épaisseur de la cellule, la vitesse de recombinaison sur les faces avant et arrière, les résistances série et parallèle ainsi que la température sur les caractéristiques de sortie d'une cellule solaire à base du silicium polycristallin en couche mince de type n+/p.

III.2. Structure simulée :

La cellule étudiée dans ce mémoire est de type n+/p qui présente une surface de 150 mm x 150 mm ainsi qu'une couche Antireflet (CAR) et une texturisation à la surface avant.

La cellule solaire est à base de Silicium polycristallin (poly-Si) d'épaisseur H (μm) avec un émetteur de type n+ dopé Phosphore, d'épaisseur variable ℓ μm .

Elle présente une résistivité de $\rho_n = 7,7 \times 10^{-4} \Omega.cm$ sur la face avant (face éclairée), recouverte d'une couche Antireflet (CAR), composée de Nitrure de Silicium SiN_x d'épaisseur de 80 nm et d'un coefficient de réfraction $c_n = 2,03$ à $\lambda = 605 nm$. Quant au substrat, il est de type p avec une résistivité $\rho_p = 1,6 \Omega.cm$.

III.3. Principe et objectif de l'étude :

A partir de la cellule de référence décrite plus haut, nous avons tous d'abord fait varier l'épaisseur de la cellule, la vitesse de recombinaison sur les faces avant et arrière ainsi que les résistances série et parallèle. Puis nous avons étudié l'influence de la température pour déterminer les meilleurs paramètres géométriques de la cellule, qui assure un rendement maximal.

III.4. Introduction au simulateur PC1D

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaire PC1D a été développé par P.A Basore et ses collaborateurs à l'université « New South Wales of Sydney » en Australie. Grâce à son interface simple et sa vitesse d'exécution et son unidimensionnalité, il permet de simuler des cellules solaires à structures simples ou comme un intermédiaire de calcul pour les simulateurs multidimensionnels selon les matériaux disponibles en fichiers data, en jouant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc...). La dernière version vérifiée 6.2 de PC1D a été lancée à partir de février 2016.

Le logiciel se divise en quatre parties distinctes. Les trois premières sont consacrées à la programmation où il faut introduire respectivement les paramètres du dispositif, les paramètres des régions et les paramètres de l'excitation. Dans la quatrième partie sont affichés les résultats de la simulation.

PC1D permet de créer plusieurs régions (5 régions maximum) selon leurs géométries et leurs propriétés. La simulation de la structure photovoltaïque est réalisée en introduisant en premier lieu ses différents paramètres (géométrie, dopages, paramètres électriques et optiques, etc...), ensuite, on choisit l'excitation caractéristique et enfin, l'exécution du programme.

Paramètres du dispositif

Les paramètres du dispositif (Device) à introduire sont classés par ordre d'apparition comme suit :

- La surface du dispositif,
- La texturation (avant et/ou arrière),
- La densité de charge surfacique (avant et/ou arrière),
- La réflectance externe (avant et/ou arrière),
- La réflectance interne,
- Les résistances séries internes,
- Les résistances shunt internes.

Paramètres des régions

Dans chaque région, les paramètres introduits sont les suivants:

- L'épaisseur du matériau,
- Le matériau utilisé : les paramètres qui le décrivent sont stockés dans des fichiers d'extension (*.mat). Ils sont soit, fournis avec le logiciel pour les matériaux les plus utilisés comme le silicium, le germanium et l'arséniure de gallium, ou changés. Les paramètres placés dans ce fichier sont : les mobilités (**cm²/V.s**), la constante diélectrique,

l'énergie du gap (eV), l'indice de réfraction, la concentration intrinsèque (cm^{-3}), le coefficient d'absorption optique (cm^{-1}) et l'absorption des porteurs libres,

- Le type et la concentration du dopage (pour la base),
- Le profil de dopage des faces (avant et/ou arrière),
- Les durées de vie des porteurs dans le volume,
- Les vitesses de recombinaison (avant et/ou arrière).

Paramètres d'excitation

Selon les résultats recherchés, on choisit comme suit le type de fichiers d'excitation à introduire :

- Le fichier « **One-Sun.exe** » (intensité globale de tout le spectre d'un seul soleil : généralement celui d'AM1.5 Global) permet de simuler différentes caractéristiques (courant/tension-puissance/tension, etc...),
- Le fichier « **Scan-qe.exe** » (intensité de chaque longueur du spectre) pour simuler de la réponse spectrale.
- Ensuite, on choisit un mode d'excitation parmi trois qui sont le mode d'équilibre, stationnaire et transitoire. Les derniers paramètres à introduire sont les suivants :
- La température,
- Le circuit (résistance, tension),
- L'éclairement (intensité, fichier d'air masse).

Résultats

La quatrième partie est consacrée à la visualisation des résultats. Lorsqu'on utilise le fichier « **One-Sun.exe** » comme excitation, les résultats obtenus sont :

- La valeur du courant de court-circuit (I_{cc}),
- La valeur de la puissance maximale (P_m),
- La valeur de la tension en circuit ouvert (V_{co}).

Ces résultats permettent de calculer le rendement de conversion (η) ainsi que le facteur de forme (FF). Ce mode permet aussi de visualiser les courbes courant- tension (I-V) et puissance -tension (P-V). Le fichier « **Scan-qe.exe** » permet d'obtenir :

- La valeur de courant de court-circuit,
- La valeur de la puissance maximale.

Ce mode permet aussi de visualiser les trois courbes de réflectance, du rendement quantique externe (EQE) et du rendement quantique interne (IQE).

III-5. Effets des caractéristiques géométriques et physiques sur Les paramètres de sortie d'une cellule photovoltaïque

III-5-1. Effets de l'épaisseur de la base

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de la base sur les différentes caractéristiques de sortie de la cellule, à savoir le courant de court circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} et le rendement η , en fonction de l'épaisseur H de la région de base, nous avons varié cette dernière tout en fixant les autres paramètres.

Sur les figures (III.1, III.2 et III.3) nous avons représenté la variation du courant de court circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} et le rendement η , en fonction de l'épaisseur H de la région de base.

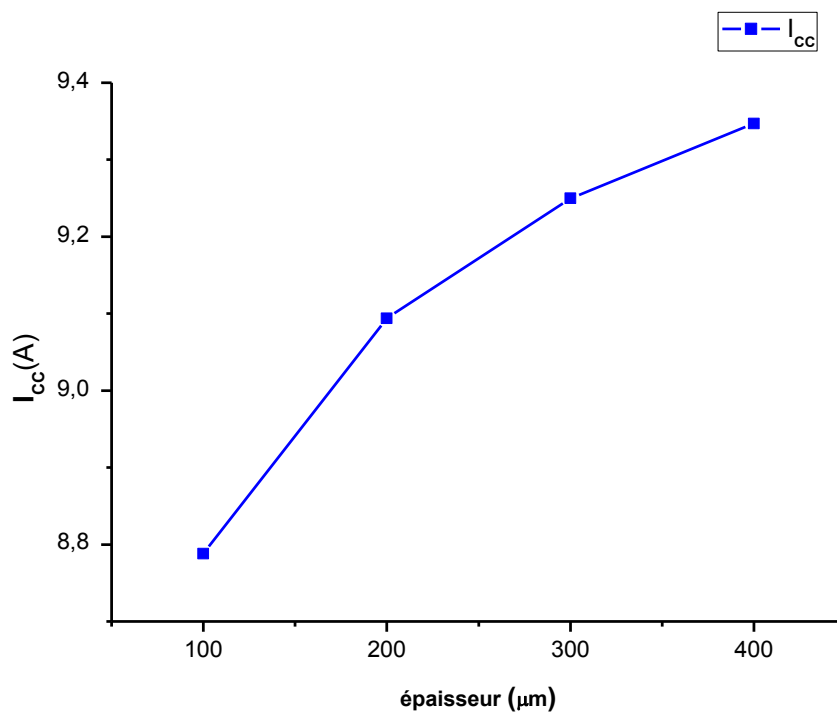


Figure III.1: Effet de l'épaisseur de la base sur courant de court-circuit.

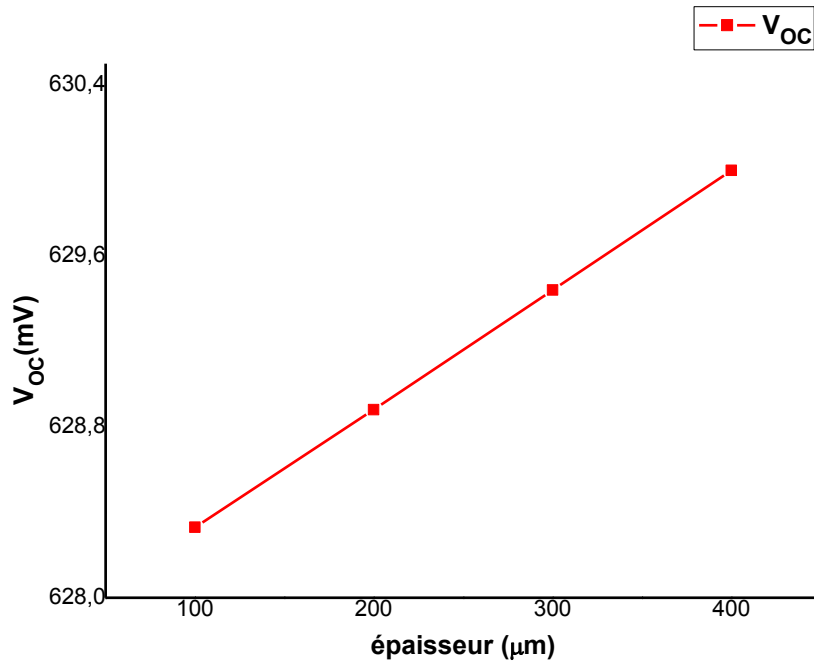


Figure III-2: Effet de l'épaisseur de la base sur la tension de circuit-ouvert.

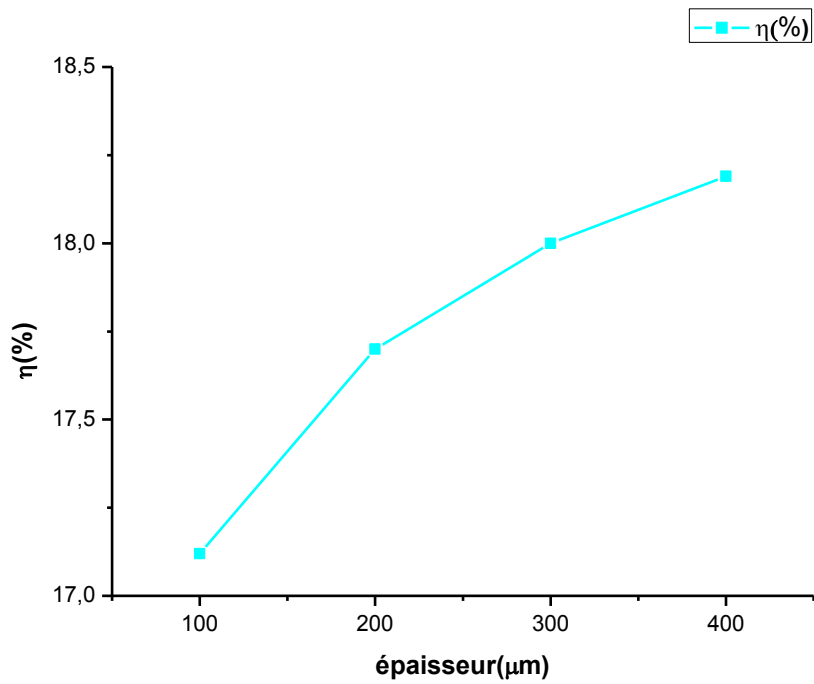


Figure III.3: Effet de l'épaisseur de la base solaire sur le rendement.

Pour le Silicium, le coefficient d'absorption α augmente lentement avec l'énergie des photons, qui, de ce fait, pénètrent profondément dans le matériau comparativement à d'autres matériaux. L'essentiel du spectre solaire utile pour le silicium reçu au sol est collecté par la base. Il faut donc privilégier cette zone. Parmi les solutions idoines pour l'optimisation de la base, c'est de varier son épaisseur.

Les figures (III.1, III.2 et III.3) indiquent clairement une augmentation du courant de court circuit I_{cc} avec l'élargissement de l'épaisseur de la base pour H allant de 100 μm à 400 μm . La tension de circuit ouvert V_{oc} augmente aussi sur cette gamme d'épaisseur. Le rendement quant à lui suit les variations du courant de court circuit I_{cc} en montrant une nette augmentation. Ce résultat indique que l'épaisseur optimale de la région de base devrait être la plus large possible.

Lorsqu'on fait varier l'épaisseur de la base, on constate que le courant de court-circuit croît jusqu'à une valeur optimale 9.347A pour une épaisseur d'environ 400 μm , donc la variation de l'épaisseur de la base influe sur la densité de courant (I_{cc}).

Nous remarquons aussi que le courant de court-circuit (I_{cc}) et le rendement η , leurs variations sont peu affaiblies par l'augmentation de l'épaisseur de la base, notamment pour les épaisseurs supérieures à 400 μm et presque constant. Ceci peut s'expliquer par le fait que cette épaisseur est suffisante pour exploiter une large gamme du spectre solaire permettant d'atteindre un rendement de 18.9%.

III-5-2. Influence de la vitesse de recombinaison en surface de la base :

La vitesse de recombinaison des porteurs en surface est aussi un paramètre important qui a une grande influence sur le rendement de la cellule solaire. Elle dépend indéniablement de la longueur de diffusion des porteurs. Pour examiner l'influence de la recombinaison sur la face avant de la cellule solaire (en surface de la base), nous avons varié la vitesse de recombinaison des porteurs en surface de la base S_b dans une gamme de 10 cm/s à 10⁵ cm/s tout en fixant les autres paramètres. Les résultats de l'influence de la vitesse de recombinaison en surface de la base S_b de la cellule solaire sur le courant de court circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} et le rendement η , sont présentés sur les figures III.4, III.5 et III.6.

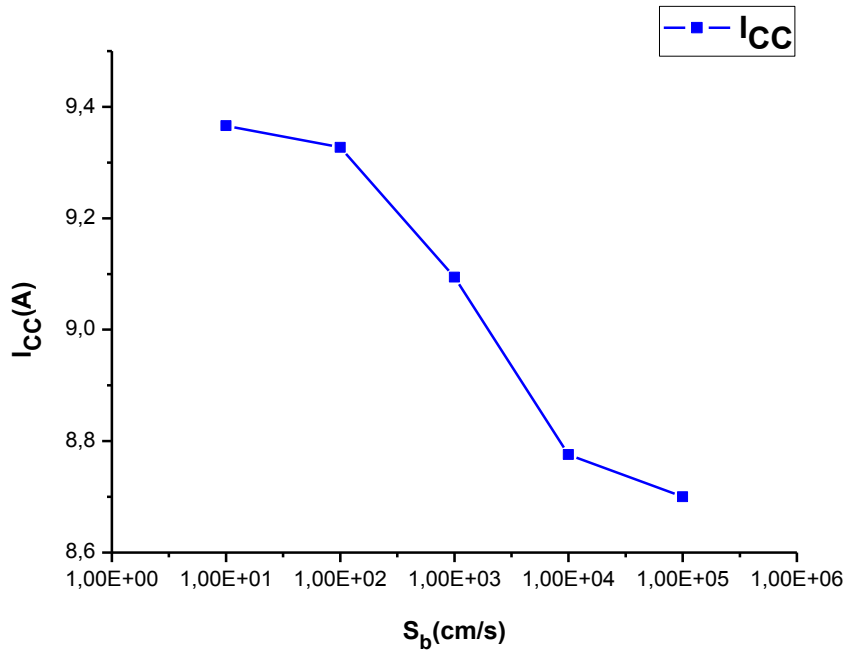


Figure III.4: Influence de la vitesse de recombinaison en surface de la base sur le courant court-circuit.

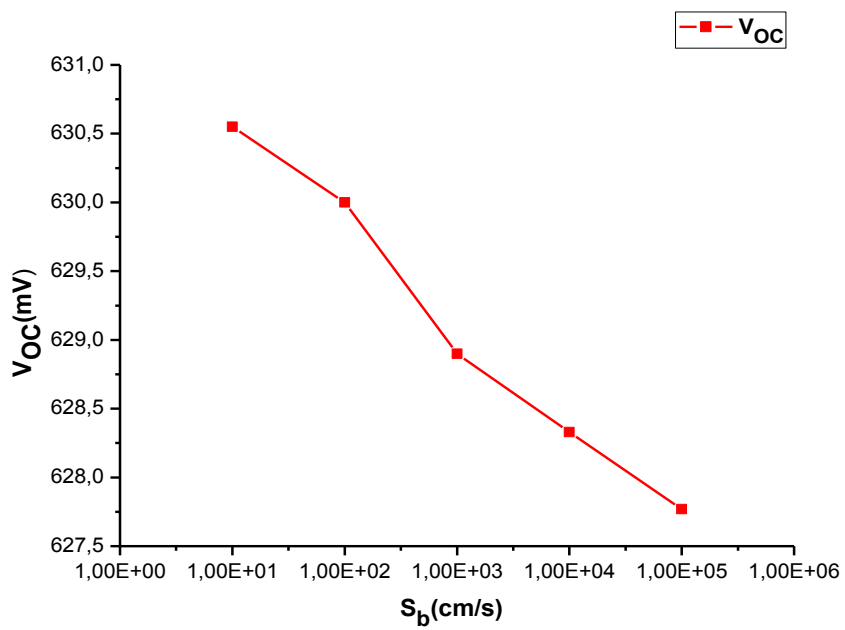


Figure III.5: Influence de la vitesse de recombinaison en surface de la base sur la tension circuit ouvert.

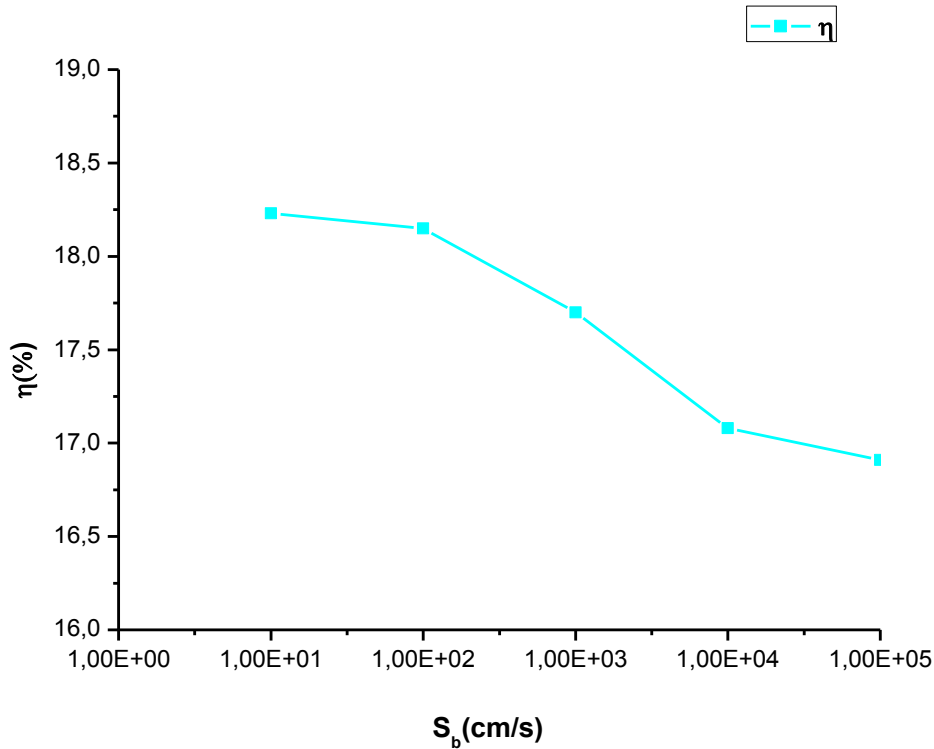


Figure III.6: Influence de la vitesse de recombinaison en surface de la base sur le rendement.

On constate sur ces figures que la vitesse de recombinaison en surface joue un rôle majeur dans le rendement des cellules solaires où le rendement atteint une valeur minimale de 16.91% pour une vitesse de l'ordre de 10^5 cm/s. Cependant, la valeur optimale de la vitesse de recombinaison S_b est 10 cm/s donne un rendement optimum de 18.23%. La longueur de diffusion des électrons minoritaires dans la base $L_n = 490 \mu m$ est comparable à l'épaisseur de la base, la raison en est que les porteurs minoritaires photo-crées dans la base atteindront la surface arrière de la cellule avant toute recombinaison.

Le rendement photovoltaïque prend la même allure que le courant de court circuit I_{cc} où il décroît rapidement avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison. Une grande vitesse de recombinaison en face avant peut dégrader complètement le rendement. Par contre, si la vitesse de recombinaison est inférieure à 10^4 cm/s, elle n'a pas d'influence importante sur les caractéristiques de la cellule. Nous constatons aussi que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la phototension est maximale. La phototension décroît avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison.

III-5-3. Influence de la vitesse de recombinaison en surface de l'émetteur :

Pour examiner l'influence de la recombinaison sur la face avant de la cellule solaire (en surface de la base), nous avons varié la vitesse de recombinaison des porteurs en surface de la base S_b dans une gamme de $5 \cdot 10^2 \text{ cm/s}$ à $5 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$ tout en fixant les autres paramètres. Les résultats de l'influence de la vitesse de recombinaison en surface de la base S_b de la cellule solaire sur le courant de court circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} et le rendement η , sont présentés sur les figures III.7, III.8 et III.9.

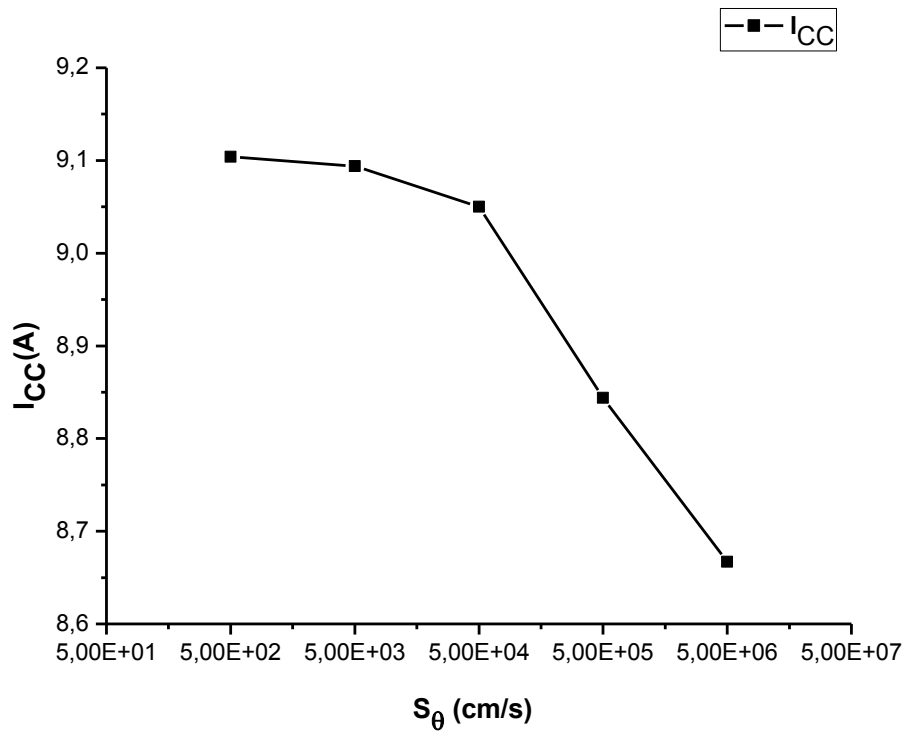


Figure III.7: Influence de la vitesse de recombinaison de l'émetteur de la cellule solaire sur le courant de court-circuit

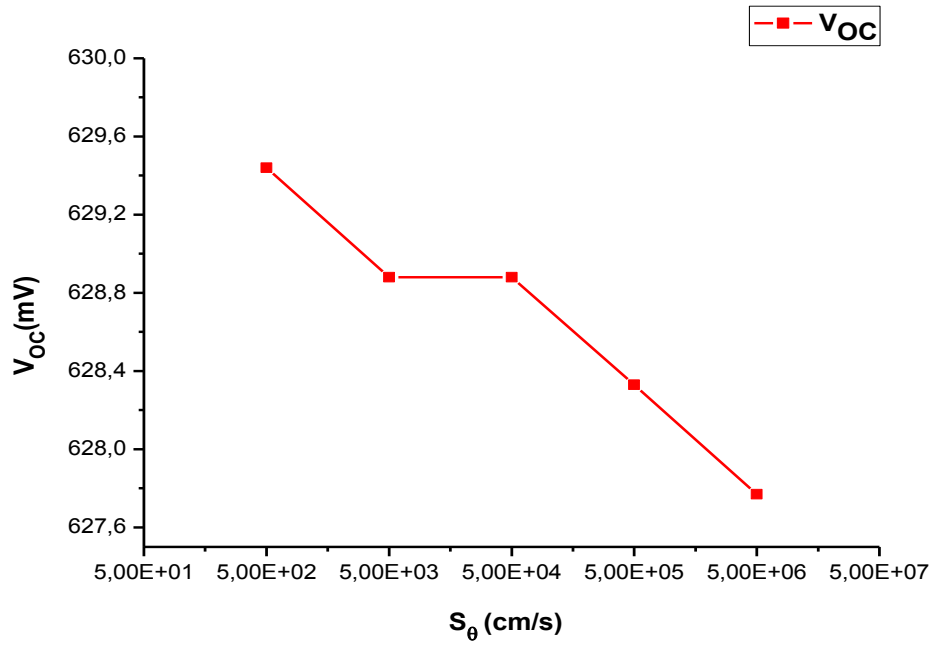


Figure III.8: Influence de la vitesse de recombinaison de l'émetteur de la cellule solaire sur la tension de circuit-ouvert

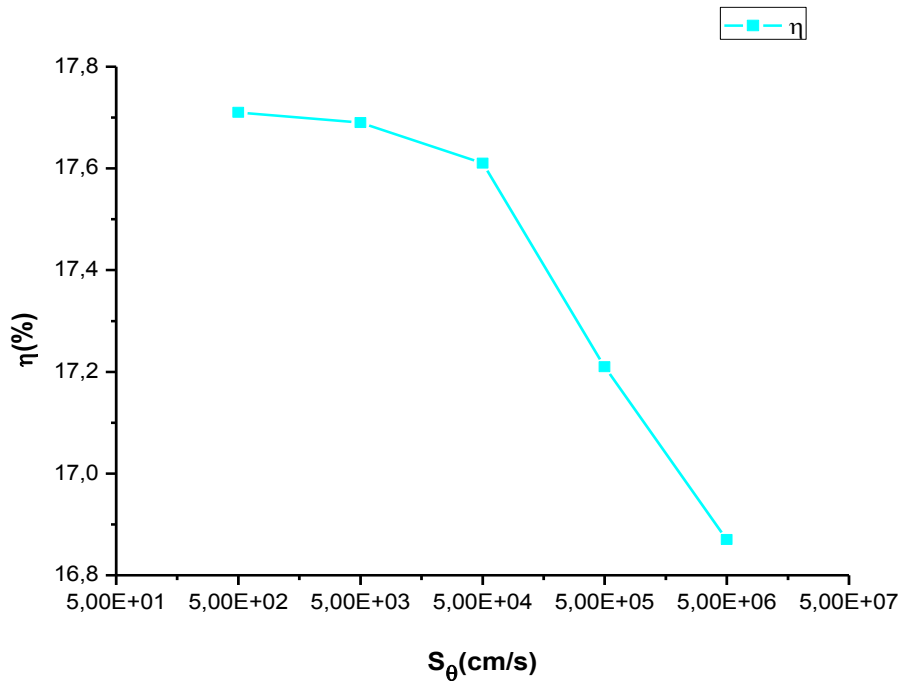


Figure III.9: Influence de la vitesse de recombinaison de l'émetteur de la cellule solaire sur le rendement

Sur les figures III.7, III.8 et III.9, nous constatons que le rendement photovoltaïque prend la même allure que le courant de court circuit I_{cc} et la tension en circuit ouvert V_{oc} où il décroît faiblement avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison.

Dans la gamme de vitesse des porteurs $[10, 10^5] \text{ cm/s}$, le courant de court circuit I_{cc} varie de 9,104 A à 8,667 A, soit une diminution de 0,437 A. De même pour la tension en circuit ouvert V_{oc} qui varié de 629.44 mV à 627.77 mV, soit une diminution de 1,67 mV. Aussi pour le rendement qui varié de 17,71% à 16.87 %, soit une diminution de 0,83 %.

On conclue que la vitesse de recombinaison en surface de l'émetteur n'a pas beaucoup d'influence sur les caractéristiques de la cellule.

III-5-4. Influence de la variation de la résistance série R_s :

Pour examiner l'influence de la variation de la résistance série R_s sur les paramètres de la cellule, nous avons varié cette dernière dans une gamme de $5.2 \cdot 10^{-5} \Omega$ à 5.2Ω tout en fixant les autres paramètres. Les résultats de l'influence de la résistance série R_s sur le courant de court circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} et le rendement η , sont présentés sur les figures III.10, III.11 et III.12 ci-dessous.

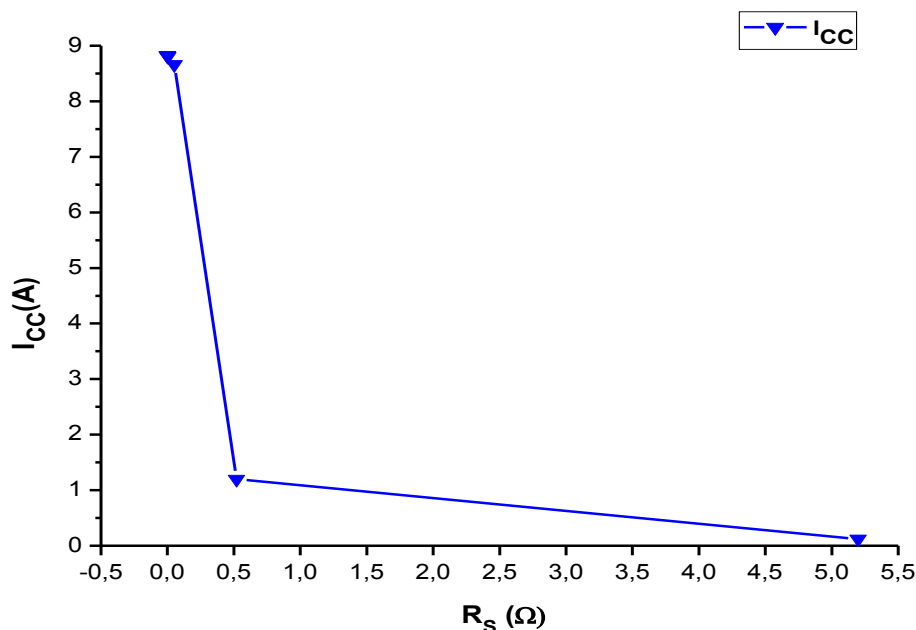


Figure III.10 : Influence de la variation de la résistance série sur le courant de court-circuit

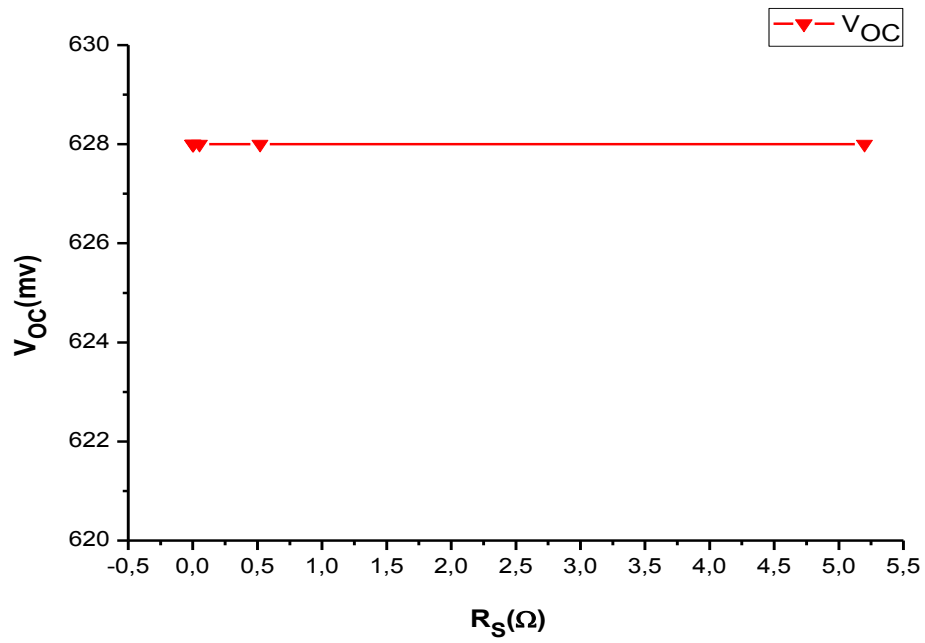


Figure III.11 : Influence de la variation de la résistance série sur la tension de circuit-ouvert

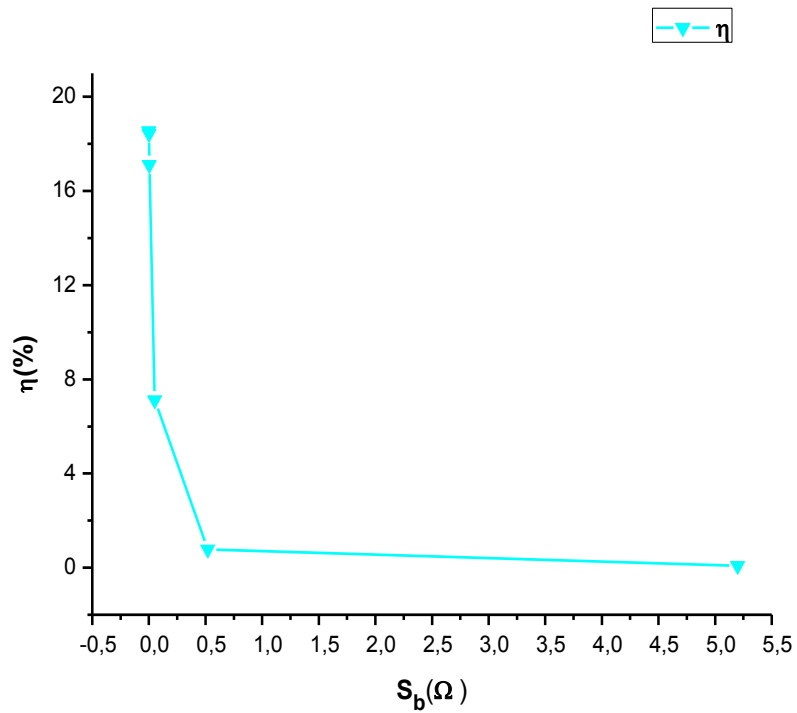


Figure III.12 : Influence de la variation de la résistance série sur le rendement

Les figures III.10, III.11 et III.12 montrent clairement une importante diminution du courant de court-circuit I_{CC} relative à l'augmentation de la résistance série (R_s) jusqu'à la valeur $5.2 \cdot 10^{-4} \Omega$ où la diminution du courant de court-circuit I_{CC} devient minime. Le courant de court-circuit I_{CC} présente des valeurs maximales lorsque la valeur de la résistance série R_s est très faible.

Aussi, on observe que le rendement présente des valeurs maximales pour des moindres résistances séries ($R_s = 5.2 \cdot 10^{-4} \Omega$ et $R_s = 5.2 \cdot 10^{-4} \Omega$). Par ailleurs, on remarque une importante dégradation du rendement pour des résistances séries un peu plus grandes $R_s = 5.2 \cdot 10^{-1} \Omega$ et $R_s = 5.2 \Omega$. La tension de circuit ouvert V_{oc} est pratiquement constante sur la gamme de variation des résistances séries.

On peut donc conclure que pour un bon fonctionnement de la cellule solaire, les valeurs de la résistance série doivent être les plus réduites possibles par l'utilisation des techniques à l'exemple de celles de la technologie de l'émetteur sélectif (le haut niveau de dopage présent sous les contacts réduirait la résistance de contact sur la face avant de la cellule solaire $R_c \propto \exp(1/N_D)$ et se répercute par conséquent de manière bénéfique sur la résistance série totale).

III-5-5. L'influence de la résistance shunt R_p :

Pour examiner l'influence de la variation de la résistance parallèle R_p sur les paramètres de la cellule, nous avons varié cette dernière tout en fixant les autres paramètres. Les résultats de l'influence de la résistance parallèle R_p sur le courant de court circuit I_{CC} , la tension en circuit ouvert V_{oc} et le rendement η , sont présentés sur les figures III.13, III.14 et III.15 ci-dessous.

Dans cette partie, nous avons variés la valeur de la résistance série R_s dans une gamme de entre $0,3015 \Omega$ à $0,3015 \cdot 10^5 \Omega$.

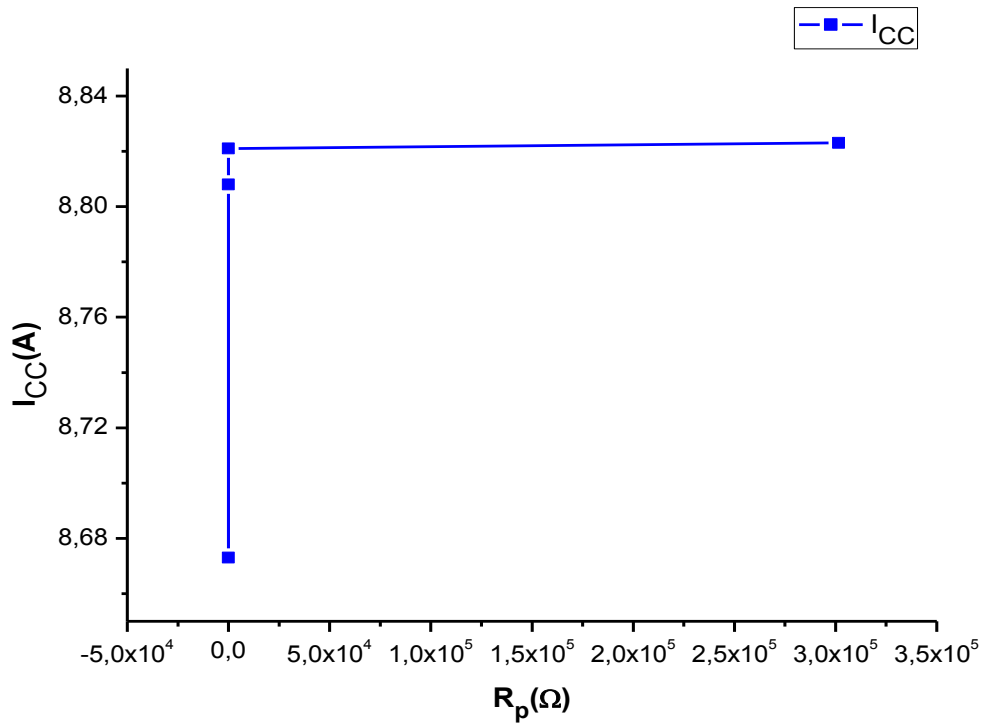


Figure III-13 : Effet de la résistance de shunt sur les caractéristiques

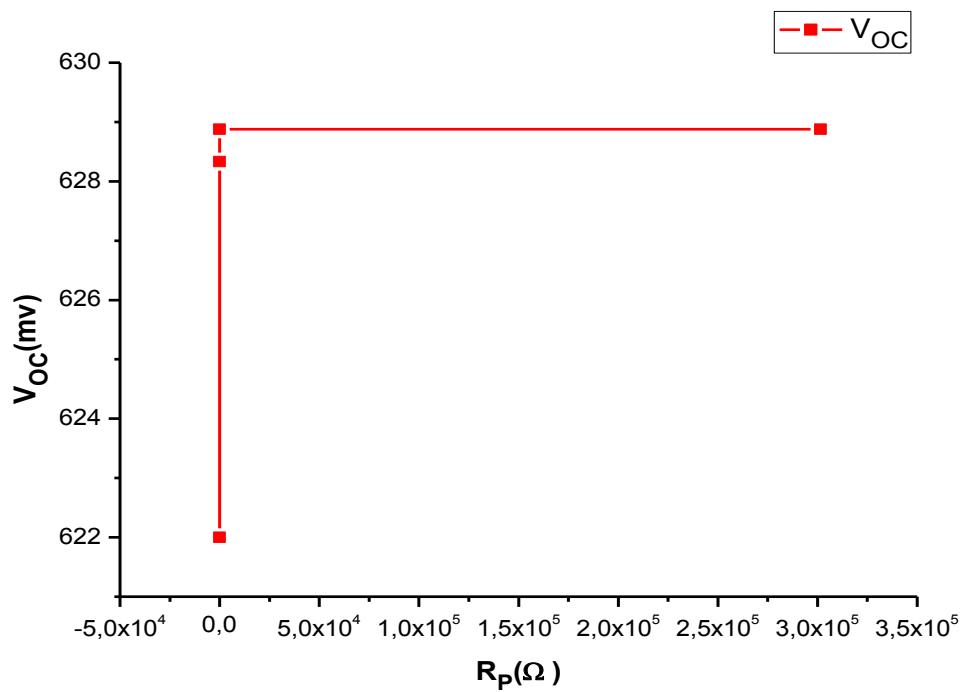


Figure III-14 : Effet de la résistance de shunt sur la tension de circuit-ouvert (V_{CO})

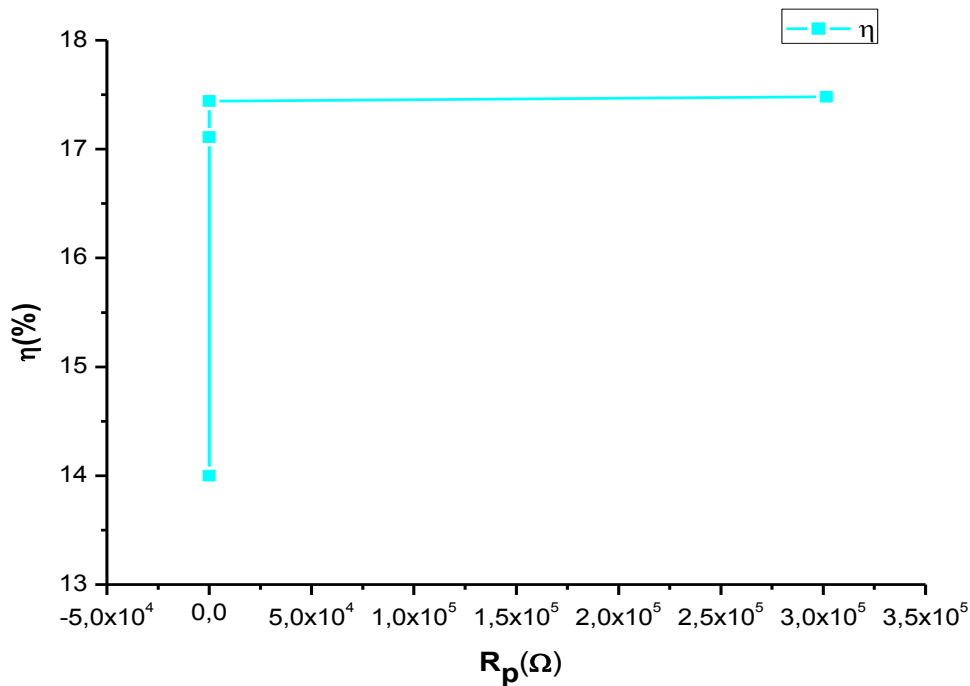


Figure III-15 : Effet de la résistance de shunt sur le rendement.

Les figures III.13, III.14 et III.15 montrent clairement une importante augmentation du courant de court-circuit I_{cc} relative à l'augmentation de la parallèle R_p jusqu'à la valeur $30,15 \Omega$ où la variation du courant de court-circuit I_{cc} devient minime et augmente légèrement avec une petite déférence pour les résistances shunt plus grandes. Le courant de court-circuit I_{cc} présente des valeurs minimales lorsque la valeur de la résistance série R_p est très faible.

Nous remarquons aussi que le rendement prend la même allure que le courant de court-circuit I_{cc} , et le rendement présente des valeurs maximales pour des plus grandes résistances parallèle ($R_p = 0,3015 \cdot 10^5 \Omega$). D'autre part, on distingue qu'il n'y a pas une grande différence entre les rendements pour les résistances shunt $R_p = 0,3015 \Omega$ et $R_p = 0,3015 \cdot 10^5 \Omega$. Il suffit donc d'augmenter dix fois la résistance shunt de la cellule solaire pour une améliorer le rendement de 0,33%.

Nous constatons aussi qu'une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la photopile V_{oc} ; à cause de cela une photopile dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclairnement vue au premier chapitre. Aussi la résistance shunt doit être suffisamment grande pour une meilleure puissance de sortie. En

effet, pour une faible résistance shunt, le courant s'effondre plus fortement ce qui signifie que la perte de puissance est élevée.

III-5-6. L'influence de la température T :

La température de fonctionnement de la cellule solaire a un important effet non moins négligeable sur la réponse électrique de cette dernière. Pour examiner l'influence de la température sur les paramètres de la cellule, nous avons varié cette dernière entre $0,3015 \Omega$ à $0,3015 \cdot 10^5 \Omega$. tout en fixant les autres paramètres. Les résultats de la température sur le courant de court circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} et le rendement η , sont présentés sur les figures III.16, III.17 et III.18 ci-dessous.

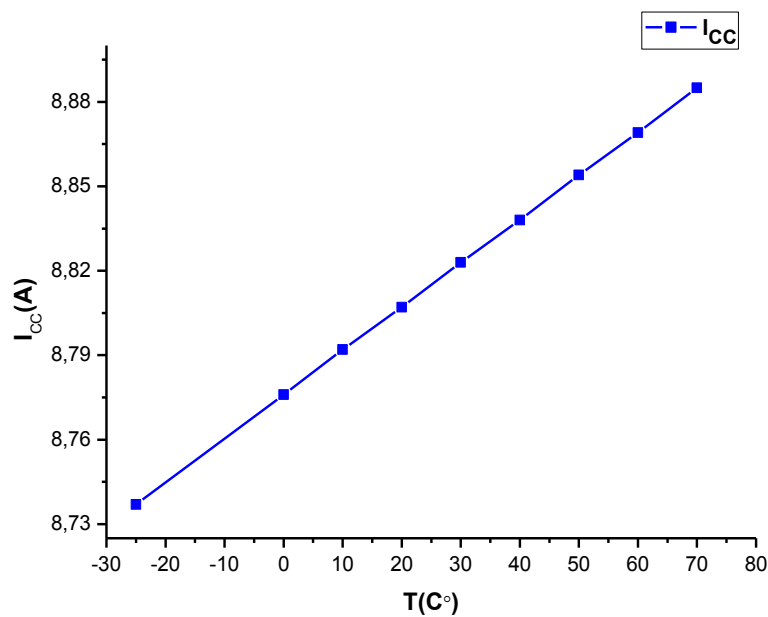


Figure III-16 : Effet de la température sur le courant de court-circuit.

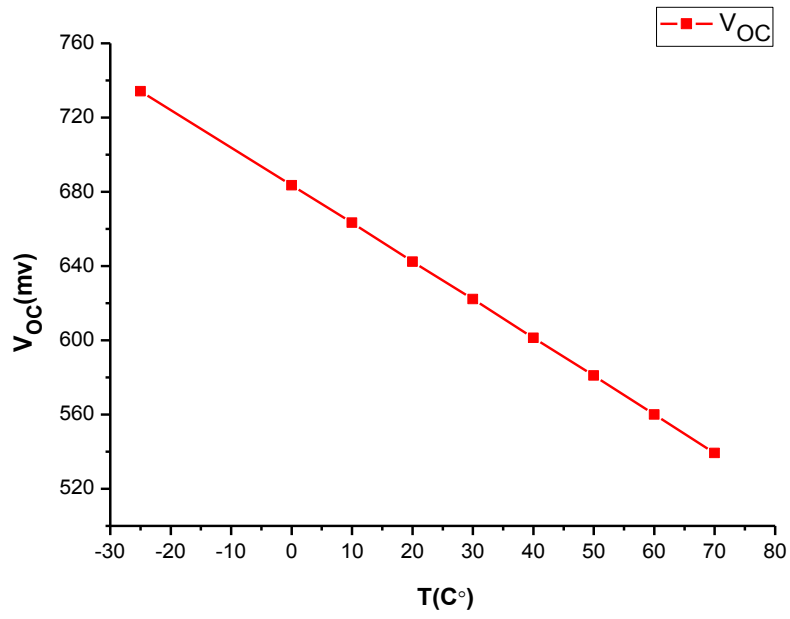


Figure III-17 : Effet de la température sur la tension de circuit-ouvert (V_{OC})

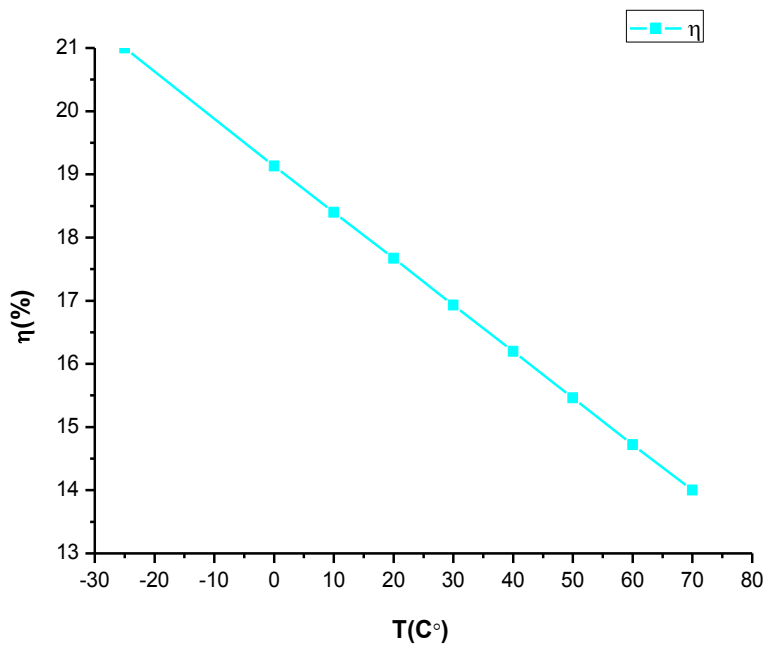


Figure III-18 : Effet de la température sur le rendement

Les figures III-16, III-17 et III-18 montrent clairement la dégradation des caractéristiques de la cellule photovoltaïque et l'influence néfaste d'une température élevée. Cela est dû principalement à la dépendance le courant de court circuit I_{cc} et la tension en circuit ouvert V_{oc} implicitement avec la température donnée par la relation :

$$J_0 = B \cdot T^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_{g0}}{KT}\right)$$

Avec B , une constante indépendante de la température mais dépendante des paramètres de transport du matériau.

Par contre, aux basses températures on observe une amélioration du fonctionnement de la cellule photovoltaïque. On peut ainsi conclure que les cellules solaires privilégient un meilleur fonctionnement dans des environnements froids et en même temps ensoleillés.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques et physiques tel que l'épaisseur de la cellule, la vitesse de recombinaison sur les faces avant et arrière ainsi que les résistances série et parallèle et la température sur les caractéristiques de sortie d'une cellule solaire à base du silicium polycristallin en couche mince de type n+/p. Nous avons observé que la variation de l'épaisseur de la cellule solaire influe considérablement sur les paramètres de sortie de la cellule entre autre le courant de court circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} et le rendement η . Aussi la vitesse de recombinaison sur les faces avant et arrière a un effet majeur sur le rendement de la cellule solaire. Ensuite, nous avons observé l'influence des résistances série et shunt où une résistance série sur le rendement.

On a également montré qu'une température élevée de la cellule solaire dégrade ses performances contrairement aux basses températures qui favorisent le bon fonctionnement de la cellule solaire.

Conclusion Générale

L'augmentation du coût des énergies traditionnelles d'une part et les ressources limitées de celles-ci d'autre part, ont poussé de nombreux domaines de recherche à l'utilisation d'énergies renouvelables, dont l'énergie solaire. Cette dernière utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le soleil. Donc il fallait continuer à investir et à améliorer ce domaine pour obtenir une technologie durable, non polluante et surtout à faible coût.

Quelle que soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un rendement optimal. Habituellement, les paramètres à optimiser d'une cellule peuvent être, en général, géométriques, électriques et optiques tels que l'épaisseur de la cellule, les vitesses de recombinaison des faces avant et arrière etc....

L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ses paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum.

Ce modeste travail a porté, principalement, sur l'étude de l'influence des paramètres géométriques et physiques tel que l'épaisseur de la cellule, la vitesse de recombinaison sur les faces avant et arrière ainsi que les résistances série et parallèle et la température sur les caractéristiques de sortie d'une cellule solaire à base du silicium polycristallin en couche mince de type n+/p en se basant sur des données théoriques expérimentales trouvés dans des travaux de recherches.

Dans un premier temps, nous avons présenté les notions générales d'une cellule solaire, son principe de fonctionnement ainsi que ses caractéristiques principales, et nous avons cité les différents types de cellules solaires.

Nous avons rappelé dans le deuxième chapitre les différents états du silicium, les différentes propriétés électriques et optiques du polysilicium, comme la mobilité, la durée de vie des minoritaires. A la fin de ce chapitre, nous avons décrit les différentes procédés d'élaboration des couches minces.

Dans le dernier chapitre nous nous sommes intéressés à la variation des paramètres (I_{cc} , V_{co} et Γ) de la cellule en fonction la variation d'autres paramètres, à savoir, l'épaisseur de la cellule, la vitesse de recombinaison, la résistance série et shunt ainsi que la température.

Les résultats obtenus nous ont permis de déduire :

- La variation de l'épaisseur de la cellule vers des valeurs plus grandes fait augmenter le courant de court-circuit et la tension de circuit-ouvert ainsi que le rendement. Une épaisseur de 400 μm de la cellule solaire permet d'obtenir un rendement de 18,19%.
- Quant à la vitesse de recombinaison, elle a un effet majeur sur le rendement de la cellule solaire. Une grande vitesse de recombinaison en face avant peut dégrader complètement le rendement. Par contre, si la vitesse de recombinaison est inférieure à 10^4 cm/s, elle n'a pas d'influence importante sur les caractéristiques de la cellule. Nous constatons aussi que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la phototension est maximale. La phototension décroît avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison. Nous avons aussi constaté que la vitesse de recombinaison en surface de l'émetteur n'a pas beaucoup d'influence sur les caractéristiques de la cellule.
- Par ailleurs, nous avons remarqué une importante dégradation du rendement pour des résistances séries plus grandes et pour un bon fonctionnement de la cellule solaire, les valeurs de la résistance série doivent être les plus réduites possibles.
- Nous constatons aussi qu'une résistance shunt trop faible aura un impact sur le rendement et une photopile dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclairement. donc la résistance shunt doit être suffisamment grande pour une meilleure puissance de sortie.
- D'autre part, nous avons remarqué qu'aux températures élevées, les performances de la cellule se dégradent proportionnellement à ces élévations contrairement aux basses températures. Nous avons conclu que les cellules solaires privilégient un meilleur fonctionnement dans des environnements froids et en même temps ensoleillés.

Résumé

L'énergie photovoltaïque basée sur la conversion du rayonnement électromagnétique solaire en électricité, représente l'une des ressources énergétiques renouvelables. Avec les diverses applications de l'énergie solaire photovoltaïque, l'amélioration de l'efficacité de conversion des cellules solaires devient indispensable. La filière silicium polycristallin en couches minces suscite un intérêt majeur dans l'industrie photovoltaïque puisqu'elle permet une réduction du coût matière. Ce travail contribue à la simulation d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin (poly-Si), on optimise les performances de la cellule par l'étude de l'influence de certains paramètres comme l'épaisseur de la jonction, les vitesses de recombinaisons, la résistance shunt, la résistance série et la température sur les meilleures performances de sortie (I_{cc} , V_{co} , η et FF) de la structure.

MOTS-CLES: Silicium polycristallin, Cellule solaire photovoltaïque, paramètres physiques, simulation.

Abstract

Photovoltaic energy, based on the conversion of solar electromagnetic radiation into electricity, represents one of the renewable energy resources. With the various applications of photovoltaic solar energy, improving the conversion efficiency of solar cells becomes essential. The polycrystalline silicon thin film process is of major interest in the photovoltaic industry as it allows a reduction in material cost. This work contributes to the simulation of a polycrystalline silicon (poly-Si) based solar cell. The performance of the cell is optimized by studying the influence of certain parameters such as junction thickness, recombination rates, shunt resistance, series resistance and temperature on the best output performance (I_{cc} , V_{co} , η and FF) of the structure.

KEYWORDS: Polycrystalline silicon, Photovoltaic solar cell, physical parameters, simulation.

ملخص

الطاقة الكهروضوئية، القائمة على تحويل الإشعاع الكهرومغناطيسي الشمسي إلى كهرباء، هي أحد مصادر الطاقة المتجددة. ومع التطبيقات المختلفة للطاقة الشمسية الكهروضوئية، يصبح تحسين كفاءة تحويل الخلايا الشمسية أمرًا ضروريًا. يثير قطاع السليكون ذو الأغشية الرقيقة متعدد الكريستالات اهتمامًا كبيرًا في صناعة الخلايا الكهروضوئية لأنه يتيح خفض تكاليف المواد. يساهم هذا العمل في محاكاة خلية شمسية تعتمد على السيليكون متعدد الكريستالات (poly-Si)، ويتم تحسين أداء الخلية من خلال دراسة تأثير معلمات معينة مثل سمك التقاطع وسرعات إعادة التركيب، ومقاومة التحويل، ومقاومة السلسلة ودرجة الحرارة على أفضل أداء الإخراج (I_{cc} ، V_{co} ، η و FF) للهيكل.

الكلمات الرئيسية: السيليكون متعدد الكريستالات، الخلايا الشمسية الكهروضوئية، المعلمات الفيزيائية، المحاكاة.