

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Hadj Lakhdar de Batna

Faculté des Sciences

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Magister
en Physique

Option : Physique des matériaux métalliques et semi-
conducteurs

Par

Benmachiche Samira

**Etude des paramètres limitant le rendement d'une
photopile à base d'une structure MIS**

Soutenu le : / / 2009, devant le jury :

Président :	Mohamed CHAHDI	Pr., U. Batna
Rapporteur :	Abdelhamid BENHAYA	M.C, U. Batna
Examineurs :	Azzedine Telea	Pr., U. Constantine
	R. Mahamdi	M.C, U. Batna

Dédicaces

A mes très chers parents

A mon mari

A mon petit fils Midou

A mes sœurs, mon frère

A toute ma famille

A tous ceux que je connaisse et qui me sont chers

Je dédie ce travail.

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire à été effectué au département de physique, faculté des sciences, université de Batna.

Il m'est agréable d'exprimer ma profonde reconnaissance à monsieur Abdelhamid Ben haya, maitre de conférences à l'université de Batna pour ses encouragements, de son expérience dans l'orientation et la direction de ce travail.

Monsieur le professeur Mohammed Chehdi, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire, je lui exprime mon respect et mes sincères remerciements.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à monsieur Azzadine Telea professeur au département de physique, faculté des sciences de l'université de Constantine, d'avoir accepté d'être examinateur.

J'exprime de même mes remerciements les plus sincères aux honorables membres de jury : monsieur R. Mhamdi maitre de conférence à l'université de Batna d'avoir accepté d'être examinateur.

Sommaire

La conversion photovoltaïque

Introduction générale.....	1
Chapitre I	
<i>I-1-Introduction.....</i>	<i>3</i>
<i>I-2-L'énergie solaire.....</i>	<i>3</i>
<i>I-2-1-la ressource solaire.....</i>	<i>3</i>
<i>I-2-2-Le spectre solaire.....</i>	<i>4</i>
<i>I-2-3-L'absorbtion et la réflexion de la lumière.....</i>	<i>5</i>
<i>I-2-4-Mécanisme de génération et de recombinaison.....</i>	<i>7</i>
<i>I-2-4-1-La recombinaison.....</i>	<i>7</i>
<i>I-2-4-2-La recombinaison bond à bond.....</i>	<i>8</i>
<i>I-2-4-3-La recombinaison par piège.....</i>	<i>8</i>
<i>I-2-4-4-La recombinaison Auger.....</i>	<i>8</i>
<i>I-2-4-5-La génération.....</i>	<i>9</i>
<i>I-3-L'effet photovoltaïque.....</i>	<i>10</i>
<i>I-3-1-L'énergie photovoltaïque.....</i>	<i>10</i>
<i>I-3-2-La photopile.....</i>	<i>10</i>
<i>I-3-3-Principe photovoltaïque.....</i>	<i>10</i>
<i>I-4-Les matériaux photovoltaïques.....</i>	<i>11</i>
<i>I-4-1-Les matériaux cristallins.....</i>	<i>12</i>
<i>I-4-1-1-le silicium monocristallin</i>	<i>12</i>
<i>I-4-1-2-le silicium poly cristallin.....</i>	<i>14</i>
<i>I-4-1-4-Le silicium amorphe.....</i>	<i>14</i>
<i>I-4-1-3-GaAs.....</i>	<i>14</i>
<i>I-4-2-autre matériau en couche mince.....</i>	<i>14</i>
<i>I-5-description de la cellule photovoltaïque.....</i>	<i>15</i>
<i>I-6-Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque.....</i>	<i>18</i>
<i>I-7-Facteur limitant le rendement.....</i>	<i>19</i>
<i>I-8-Chémat électrique équivalent.....</i>	<i>21</i>
<i>I-9-Structure des cellules photovoltaïque.....</i>	<i>22</i>
<i>I-9-1-Structure PERL.....</i>	<i>22</i>

<i>I-9-2-Structure à Jonction multiple.....</i>	<i>23</i>
<i>I-9-3-Hétérostructure.....</i>	<i>24</i>
<i>I-9-4-Structure BSF.....</i>	<i>24</i>
<i>I-9-5-Structure tandem.....</i>	<i>25</i>
<i>I-9-6-Structure Shotkky.....</i>	<i>26</i>
<i>I-9-7-Structure MIS.....</i>	<i>27</i>
<i>I-9-8-Fabrication de la cellule solaire MIS.....</i>	<i>28</i>
<i>I-9-8-1-Cellule solaire MIS en métal transparent.....</i>	<i>28</i>
<i>I-9-8-2cellule solaire en réseau.....</i>	<i>28</i>
<i>I-10-Conclusion.....</i>	<i>29</i>

Chapitre II

Les caractéristiques électriques d'une cellule solaire MIS

<i>II-1-Introduction.....</i>	<i>30</i>
<i>II-2-D'escription la structure MIS.....</i>	<i>30</i>
<i>II-3-Structure MIS idéal.....</i>	<i>31</i>
<i>II-3-1-Régime d'accumulation.....</i>	<i>33</i>
<i>II-3-2-Régime désertion.....</i>	<i>33</i>
<i>II-3-3-Régime d'inversion.....</i>	<i>33</i>
<i>II-4-Les caractéristique électrique du modèle étudié.....</i>	<i>34</i>
<i>II-4-1-Les caractéristique courant tension sous l'obscurité.....</i>	<i>34</i>
<i>II-4-2-Les caractéristique courant tension sous l'éclairement.....</i>	<i>39</i>
<i>II-5-L'efficacité de conversion de la cellule.....</i>	<i>41</i>
<i>II-6-Principe de calcule (sous l'obscurité et sous l'éclairement).....</i>	<i>43</i>
<i>II-7-L'organigrame de calcule.....</i>	<i>44</i>
<i>II-8-Conclusion.....</i>	<i>45</i>

Chapitre III

Résultats et interprétations

<i>III- 1-Introduction.....</i>	<i>46</i>
<i>III-2-Méthodologie de travail.....</i>	<i>46</i>
<i>III-2-1-présentation de la cellule.....</i>	<i>46</i>
<i>III-2-2-procedure des calculs.....</i>	<i>47</i>

<i>III-2-2-1-les caractéristique électrique de courant d'obscurité.....</i>	<i>47</i>
<i>III-2-2-2-les caractéristique électrique de courant d'éclairement.....</i>	<i>48</i>
<i>III-2-2-3-Effet des déférents paramètre sur la densité de courent de court circuit la cellule</i>	<i>49</i>
<i>III-4-3-L'effet de l'épaisseur de l'isolant sur la tension de circuit ouvert.....</i>	<i>49</i>
<i>III-4-4-L'effet de la couche BSF.....</i>	<i>51</i>
<i>III-4-5-L'effet de la variation de la longueur de diffusion.....</i>	<i>51</i>
<i>III-4-6-L'effet de la température sur les caractéristique I-V.....</i>	<i>52</i>
<i>III-4-6-1- Effet de la température sur les caractéristiques J(V) sous obscurité.....</i>	<i>54</i>
<i>III-4-6-2-Effet de la température sur les paramètres d'une cellule solaire MIS sous éclairement</i>	<i>55</i>
<i>III-4-7-Effet de dopage sur les caractéristique J(V) de la cellule solaire MIS.....</i>	<i>58</i>
<i>III-4-7-1-Effet du dopage sur les caractéristique J(V) sous obscurité.....</i>	<i>58</i>
<i>III-4-7-2-Effet du dopage sur les caractéristique J(V) sous éclairement.....</i>	<i>59</i>
<i>III-4-8- Effet de la densité d'états de surface sur les caractéristiques J(V) de la cellule SolaireMIS.....</i>	<i>60</i>
<i>III-4-8-1- Effet de la densité d'états de surface sur les caractéristique J(V) sous obscurité... </i>	<i>60</i>
<i>III-4-8-2-Effet de la densité d'états de surface sur les caractéristique J(V) sous éclairement</i>	<i>60</i>
<i>III-5- Conclusion.....</i>	<i>61</i>
<i>Conclusion générale.....</i>	<i>62</i>

Introduction générale

L'utilisation des sources d'énergie conventionnelles (charbons, pétrole, gaz naturel ou uranium) est l'un des fondements principaux des sociétés industrielles. Cependant, nous sommes confrontés avec elles sur deux problèmes insurmontables.

1. Elles produisent divers types de pollution atmosphérique aussi bien à l'échelle locale que planétaire. Si nous n'y prenons pas garde, la pollution atmosphérique, le changement climatique où les déchets nucléaires peuvent remettre en cause les conditions même de la vie sur terre.
2. elles sont issues de stocks limités de matières qui doivent être extraites du sous-sol de la terre et vont inexorablement s'épuiser d'ici quelques décennies (un siècle pour le charbon). Elles ne peuvent pas donc garantir la sécurité d'approvisionnement énergétique à long terme.

A l'opposé, les sources d'énergie renouvelables (solaire, géothermique, biomasse, éolienne,...) ont recours à des flux naturels qui traversent de façon plus ou moins permanente la biosphère qui abrite tous les êtres vivants de la planète terre. Comme elles n'utilisent qu'une infime partie de ces flux, les énergies renouvelables sont considérées comme inoffensives pour l'environnement naturel aussi bien localement que globalement et elles le seront éternellement [1].

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables sont en forte croissance. On prévoit que, d'ici 20 à 30 ans, la plupart des systèmes énergétiques basés sur l'utilisation des sources traditionnelles auront recours accru aux énergies renouvelables naturellement décentralisés. Il est donc intéressant de les exploiter et de s'orienter vers leur consommation en les transformant directement, selon les besoins, soit en chaleur soit en électricité. Ainsi, la production d'électricité décentralisée par les sources d'énergies renouvelables tel que le solaire offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [2].

Cependant, pour exploiter l'énergie solaire, il faut tout d'abord mettre au point des dispositifs capables de la convertir directement sous forme électrique avec un rendement compétitif avec les autres formes d'énergie traditionnelles. Dans ce contexte, les cellules photovoltaïques peuvent jouer un rôle décisif dans la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Les cellules étudiées, jusqu'à ce jour, ont montré des rendements importants, du moins au stade des études au laboratoire (19.6 % pour les photopiles à base de structure MIS). Cependant, de nombreux

paramètres (géométriques, technologiques, ...) nécessitent une étude attentive pour appréhender leur influence afin de les optimiser.

Dans le cadre du présent travail, on se propose d'étudier les éléments suivants :

- Phénomènes impliqués dans le fonctionnement d'une photopile à base d'une structure MIS ;
- Les différents procédés technologiques utilisés pour élaborer ces structures ;
- Les paramètres influant le rendement de ces structures ;
- Etude de l'effet de ces paramètres sur le rendement de ces photopiles.

Pour faire aboutir notre travail, nous avons utilisé le logiciel Matlab pour la modélisation numérique de l'effet des différents paramètres sur la caractéristique courant tension et le rendement de la photopile. Le présent mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la présentation des différents matériaux photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, on aborde les caractéristiques électriques et les mécanismes de transport des porteurs de charge dans une cellule solaire à base d'une structure MIS.

Dans le troisième et dernier chapitre, on présente la simulation numérique et les résultats obtenus dans cette étude.

Enfin, une conclusion générale couronne le mémoire.

I-1 Introduction:

Ce chapitre présente les concepts de base de l'énergie solaire et de la production de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. On s'intéresse plus particulièrement au fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs principales caractéristiques ainsi que les matériaux utilisés pour les réaliser.

I-2-L'énergie solaire

I-2-1- La ressource solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10 microns. La Fig. I.1. : représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :

- 9% dans la bande des ultraviolets (<0.4 cm).
- 47% dans la bande visible (0.4 à 0.8 cm).
- 44% dans la bande des infrarouges (> 0.8 cm).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1.37 kilowatt au mètre carré (kW/m^2) à plus ou moins 3% selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci.

L'atmosphère en absorbe toute fois une partie de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement (1.2 kW/m^2). La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison.

L'utilisation du rayonnement solaire comme source d'énergie pose donc un problème bien particulier. En effet, le rayonnement solaire n'est pas toujours disponible ; on ne peut ni l'emmagasiner ni le transporter.

Le concepteur d'un système qui emploie le rayonnement solaire comme source d'énergie doit donc déterminer la quantité d'énergie solaire disponible à l'endroit visé et au moment où cette énergie est disponible [3]

I-2-2-Spectre solaire

Le soleil se comporte comme un corps noir dont la surface est à la température d'environ 5800 K. A la traversée de l'atmosphère, la lumière est absorbée et dispersée en particulier par les composants atmosphériques importants tels que le CO₂ et la vapeur d'eau (H₂O), de sorte que le spectre atteignant la surface de la terre soit atténué et changé dans la forme. Une mesure pour le spectre solaire est l'air Mass (noté AM). Elle est définie comme suit :

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

Où θ est l'angle entre le soleil et le zénith. Le spectre standard pour la latitude tempérée est AM1.5 qui correspond à l'angle de 48 du vertical [4].

AM 1.5G donne une irradiance de 970 w/m², mais a été arrondi à 1 kW/m². L'intensité I_D reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante.

$$I_D = 1.33(0.7^{AM})^{0.678} \quad (I-2)$$

Avec I_D en kW/m²

Il est clair, d'après ce qui précède, que la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et de proche infrarouge. Les irradiances définies par le nombre AM ne tiennent toutefois pas compte de la variété des conditions climatiques et de l'altitude du lieu.

La terre présente ainsi de grandes disparités dans la répartition de la puissance solaire: les ensoleillements moyens sur l'année peuvent atteindre 7 kW/m²/jour dans le nord de l'Australie et au Botswana. En Europe occidentale, la puissance se situe autour de 3kW/m²/jour pour les pays comme l'Espagne, à moins de 1KW/m²/jour pour le sud de la Suède. La France est soumise à une moyenne annuelle comprise entre 1.5et 3.1kW/m²/jour selon les régions [5].

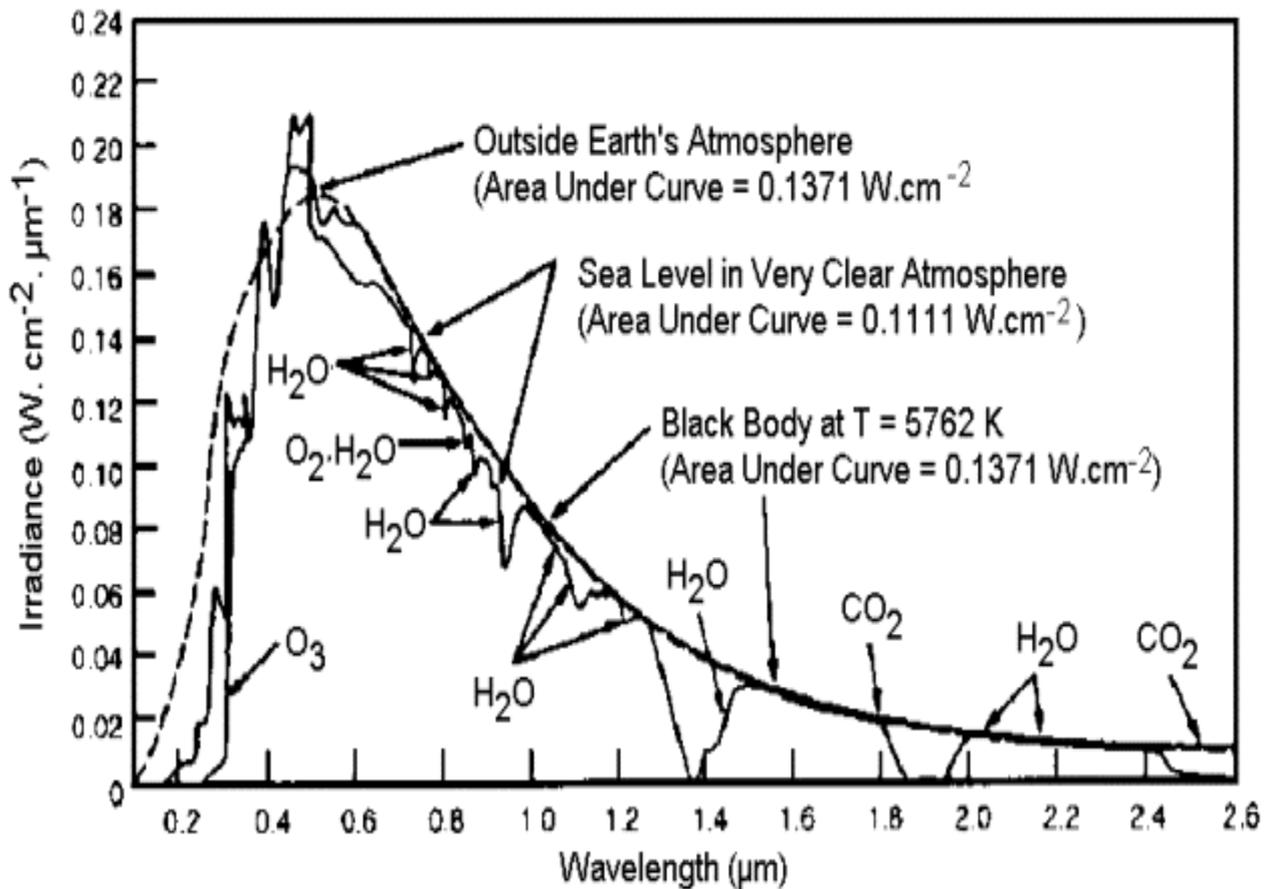


Fig. I.1. Influence de l'atmosphère sur l'irradiation solaire [20]

I-2-3- Absorption et réflexion de la lumière

L'absorption de la lumière par le matériau solaire étant sans doute le mécanisme principal du phénomène de la génération, la majorité des semi-conducteurs de base des cellules solaires absorbe convenablement le spectre visible. En effet, on utilise toujours les semi-conducteurs ayant un coefficient d'absorption élevé. Le taux de l'absorption des photons par un matériau semi-conducteur est lié directement aux énergies des photons incidents.

L'absorption n'a lieu que si l'énergie des ces photons est égale ou est supérieure à l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur E_g . Les photons qui ne satisfont pas cette condition ($E_{ph} < E_g$) ne seront pas absorbés et ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.

Que se passe-t-il s'il y a une énergie supérieure à E_g ? Le photon du diagramme de la Fig. I.2. génère une paire électron-trou à niveau supérieure, mais l'excédent d'énergie est perdu par un

processus de désexcitation spontané qui produit de la chaleur et ramène son énergie vers les niveaux du bas de bande et sachant que chaque photon absorbé ne crée qu'une seule paire électron-trou[6].

Bien que le phénomène d'absorption joue un rôle positif dans la conversion photovoltaïque, le phénomène de la réflexion est au contraire l'un des problèmes qui réduisent le rendement de la conversion d'énergie. Ces pertes affectent principalement le courant de court circuit de la pile solaire. Généralement, la lumière incidente subit des pertes sous deux formes : soit par réflexion, soit par transmission.

Il est à noter que, dans une structure photovoltaïque, les pertes par réflexion ont trois composantes à savoir :

- Réflexion par les contacts ohmiques.
- Réflexion par la surface avant du semi-conducteur.
- Réflexion par la couche arrière (BSR)

La Fig. I.3 ci-dessous illustre ces différentes réflexions.

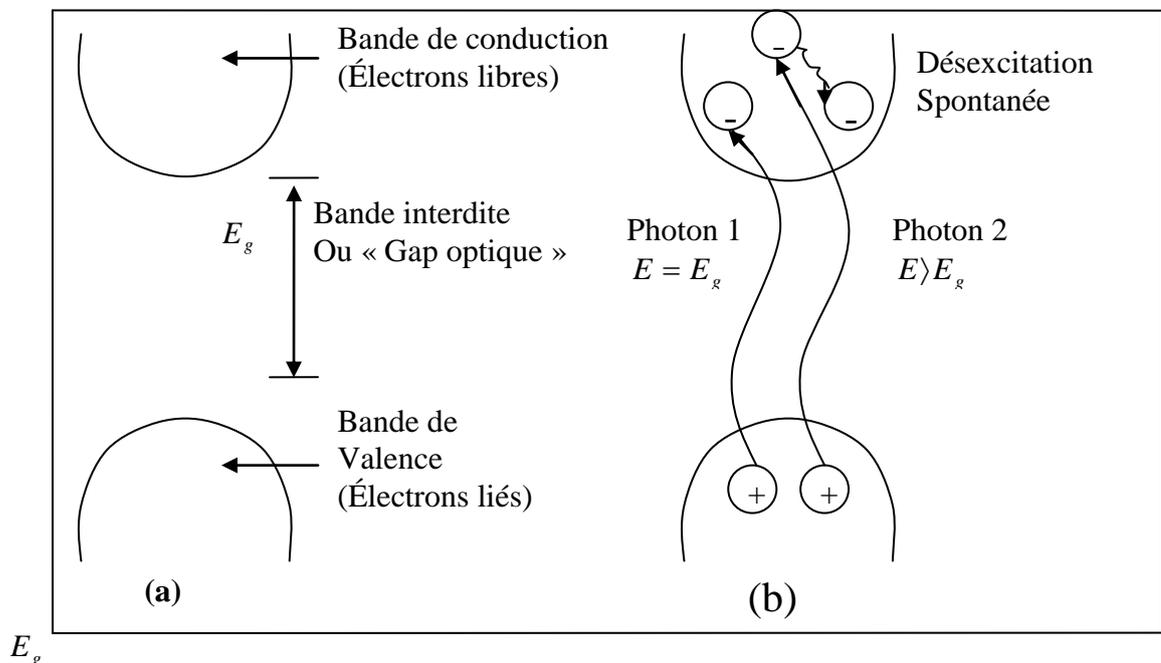


Fig. I.2. : Diagramme d'énergie d'un semi-conducteur
a)- dans l'obscurité. b)- sous illumination

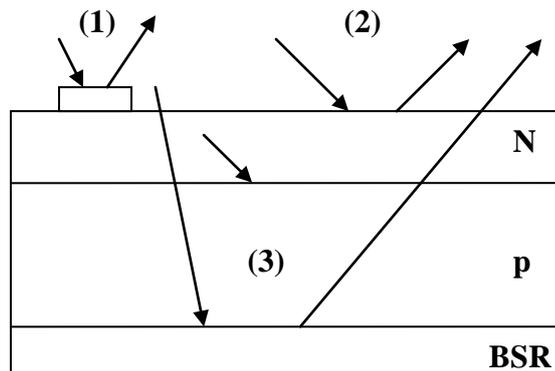


Fig. 1.3 : Les trois composantes de la réflexion

I-2-4-Mécanisme de génération et de recombinaison

I-2-4-1-La recombinaison

La recombinaison des électrons et des trous est un processus par lequel les deux porteurs s'annihilent. Les électrons arrivant à la bande de conduction retournent à la bande de valence selon différents mécanismes, soit en une seule étape ou par des étapes multiples. Ces sauts se font éventuellement vers des états vides qui sont associés aux trous. Les deux porteurs, électrons et trous, disparaissent par la suite au cours de ce processus. La différence d'énergie entre l'état initial et final de l'électron est libérée selon différentes formes. Ceci mène à une classification possible des mécanismes de recombinaison.

Dans le cas de recombinaison radiative, cette énergie est émise sous forme de photons. Dans le cas de la recombinaison non radiative, elle est transmise à un ou plusieurs phonons. Dans la recombinaison Auger, elle est dégagée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron [7] [8].

La recombinaison fait partie d'un processus pour reconstituer l'équilibre d'un semi-conducteur qui a été perturbé ou mis hors équilibre. Les perturbations peuvent être sous forme de champ électrique appliqué, de changement de la température ou d'exposition à la lumière. La recombinaison se produit généralement quand il y a un excès de porteurs dans un semi-conducteur, elle est liée fortement à cet excès.

Les trois mécanismes de recombinaison sont semblables par le fait qu'ils contribuent tous pour annihiler les porteurs en excès.

I-2-4-2-La recombinaison bande à bande

Ce mécanisme se produit quand un électron de la bande conduction tombe dans l'état vide de la bande de valence associée au trou. Cette transition de bande à bande est en général une transition radiative dans les semi-conducteurs à gap direct. En d'autre terme, c'est

l'annihilation d'un électron de la bande de conduction et d'un trou de la bande de valence. Ce processus est expliqué par l'attraction de la charge négative de l'électron et de la charge positive du trou qui conduit ces porteurs à l'annulation. L'énergie libérée pendant le processus produit un photon qui émet de la lumière [8] [9].

I-2-4-2La recombinaison par pièges

La recombinaison se produit quand un électron arrive dans un état d'énergie permise qu'on appelle « piège ». La force responsable de ce mécanisme se situe dans la bande interdite. Elle est provoquée par la présence d'un atome étranger ou un défaut structural, tel que les macles ou les dislocations. Une fois le piège rempli, il ne peut pas accepter un autre électron, puis l'électron occupant cet état d'énergie de piège va encore faire un deuxième saut vers un état vide dans la bande de valence. On peut envisager ce processus comme une transition en deux étapes d'un électron de la bande conduction à la bande de valence, ou comme étapes d'un électron qui passe de la bande de conduction à la bande de valence ou comme disparition de l'électron et du trou qui se rencontrent dans ce piège. Ceci s'appelle la recombinaison indirecte. Dans cette recombinaison non radiative, l'énergie dégagée est transmise à un ou plusieurs phonons. Souvent, elle libère l'énergie thermique ou produit des vibrations du réseau [7, 8, 9,10].

I-2-4-3-La recombinaison Auger

C'est un processus dans lequel un électron et un trou se recombinent dans une transition de bande à bande, mais l'énergie résultante est transmise à un électron ou à un trou différent. La participation d'une troisième particule affecte le taux de recombinaison de sorte que nous devrions traiter la recombinaison Auger différemment de la recombinaison bande à bande.

Généralement, la recombinaison provient de la qualité de matériau, des micros défauts, les impuretés métalliques, de la taille de grain et la densité de dislocation. Souvent, dans les cellules solaires épaisses, on néglige la vitesse de recombinaison en surface qui est en revanche importante dans le cas des cellules actuelles à base de couche mince ou bien en couche

ultramince, autrement dit, les effets en volume dans les couches minces deviennent moins importants que ceux en surface.

La recombinaison en surface et en interface du semi-conducteur peut avoir un impact significatif sur le comportement des dispositifs. Ceci est dû au fait que les surfaces et les interfaces contiennent un grand nombre de centres de recombinaison en raison de la non périodicité du cristal à ces endroits. Cette interface comprend un grand nombre de pièges liés aux contraintes de fabrication de dispositif [7, 8, 9,10].

I-2-4-4-La génération

La génération peut être considérée comme le mécanisme inverse de la recombinaison. La génération des porteurs est un processus pour reconstituer l'équilibre d'un semi-conducteur qui a été perturbé. La génération se produit quand il y a un déficit de concentration en porteur comparée à la concentration d'équilibre. Des porteurs doivent être créés dans le semi-conducteur pour atteindre cet équilibre.

Lorsqu'on expose l'une des faces de la cellule solaire à un flux solaire, on constate immédiatement un phénomène intéressant (apparition d'une tension) au niveau de cette structure ; ce qui est la preuve que la lumière a pu ainsi atteindre le volume du cristal semi-conducteur, et en particulier la jonction. Cette radiation est donc capable de générer une paire électron- trou.

On peut faire une analogie entre les deux processus génération et recombinaison, autrement dit, les trois mécanismes de la recombinaison peuvent être inversés pour créer des porteurs. Il s'agit de la génération bande à bande, intrinsèque, de la génération extrinsèque par l'intermédiaire du niveau de dopage ou bien le piège et la génération Auger.

La génération bande à bande peut se produire quand un électron atterrit directement dans la bande de conduction. Ceci peut se produire par l'absorption de la lumière c.à.d. la photogénération. Des centres d'impuretés peuvent être utilisés pour la génération, l'électron n'aurait pas besoin d'ample énergie pour atteindre la bande de conduction comme dans le cas de la génération bande à bande. La génération Auger se produit souvent quand un champ électrique est appliqué [7,9].

I-3-L'effet photovoltaïque

I-3-1 L'énergie photovoltaïque : L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation direct de la lumière en électricité. Elle n'est pas une forme de l'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité.

L'effet photovoltaïque a été découvert par E. Becquerel en 1839: il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène physique.

L'utilisation des cellules solaires a débutée dans les années quarante dans le domaine spatiale. Les recherches d'après guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leurs tailles, mais il faudra attendre la crise énergétique des années soixante dix pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres [5,11].

I-3-2-La photopile : La photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire, est fabriquée à partir de matériaux semi-conducteurs. On peut la présenter comme une jonction plate sensible à la lumière, car lorsqu'elle est éclairée par le rayonnement solaire, elle développe une force électromotrice capable de débiter un courant dans un circuit extérieur [3].

I-3-3-Principes photovoltaïques : Le principe de fonctionnement d'une photopile ou cellule solaire repose sur l'effet photovoltaïque qu'on peut expliquer comme suit dans le cas d'une photopile à base d'une jonction pn.

Si la lumière éclairant la couche de type n de la jonction (Fig. I.4.) contient des photons dont l'énergie $h\nu$ est supérieur à E_g , alors des électrons de la bande de valence reçoivent une énergie suffisantes pour passer dans la bande de conduction en laissant derrière eux des trous dans la bande de valence. Le même phénomène se produit au niveau de la zone de charge d'espace et de la région P. On a ainsi création de paires électron-trou. Par diffusion, les électrons se propagent dans le cristal constituant la jonction. Dans le cas où des électrons atteignent la frontière de la zone de charge d'espace (ZCE), ils sont happés par le champ électrique qui y règne pour les faire pénétrer dans la région où ils sont majoritaires. Inversement, ce même champ s'oppose au mouvement des trous qu'il retient dans la région où ils ont été créés. Le résultat de cet effet photoélectrique se traduit par un courant qui circule de la région n vers la région p qui est un courant négatif selon les conventions habituelles. Cet effet photoélectrique qui conduit à la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique est connu sous le nom d'effet photovoltaïque [12].

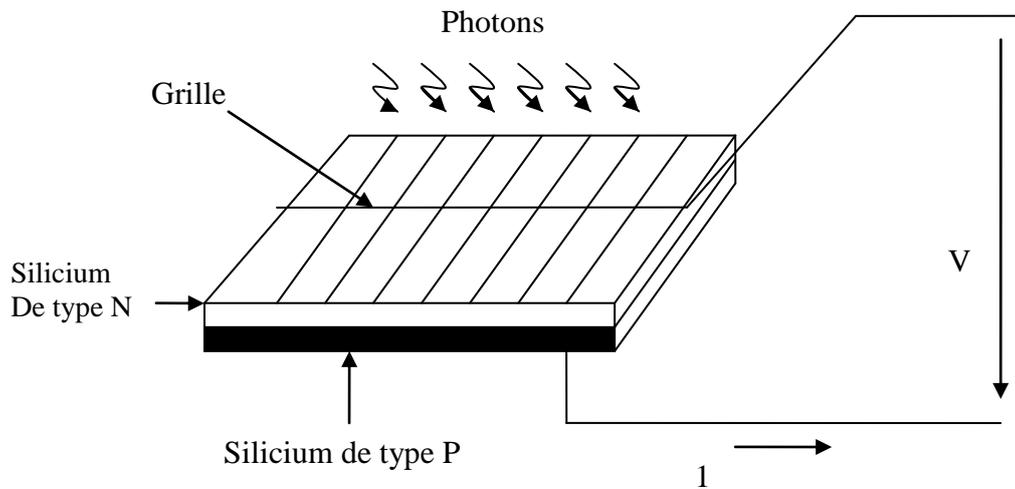


Fig. 14. Schéma d'une cellule élémentaire. [12]

I.4. Les matériaux photovoltaïques

Les photopiles ou cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à base de matériaux semi-conducteurs. Le matériau de base dans la plupart des cas est le silicium.

Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, polycristalline, ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellurure de Cadmium (CdTe).

Malgré que le silicium n'est pas le matériel idéal pour la conversion PV, mais il est le plus utilisé à ce jour pour la réalisation des cellules solaires. Ce semi-conducteur présente en effet différents avantages :

- Il est abondant à la surface du globe terrestre ;
- Il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs. III .V ;
- Il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques
- Il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore).

Son seul véritable inconvénient est son gap indirect qui entraîne une faible absorption du rayonnement par rapport à un matériau à gap indirect. Pour absorber 90% du spectre solaire, il faut utiliser une épaisseur de 100 μm alors que seulement 1 μm de GaAs suffit.

Les conditions pour un matériau idéal pour une cellule solaire sont :

- Bande interdite entre 1.1 et 1.7 eV
- Gap direct.

- matériaux disponibles est non toxiques.
- Bonne efficacité de conversion photovoltaïque.
- Fiabilité à long terme.

Actuellement, le silicium s'accapare de la quasi-totalité du marché mondial du photovoltaïque. Il est utilisé dans une variété de formes : cristalline, polycristalline et amorphe.

1.4.1. Matériaux cristallins

1.4.1.1. Silicium monocristallin : Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes. Les techniques principales pour produire le silicium cristallin sont la méthode de Czochralsky (CZ) et la technique de la zone flottante (ZF).

Dans le processus de CZ, un germe cristallin est plongé dans un creuset de silicium fondu est retiré lentement, tirant un cristal simple cylindrique pendant que le silicium se cristallise sur le germe.

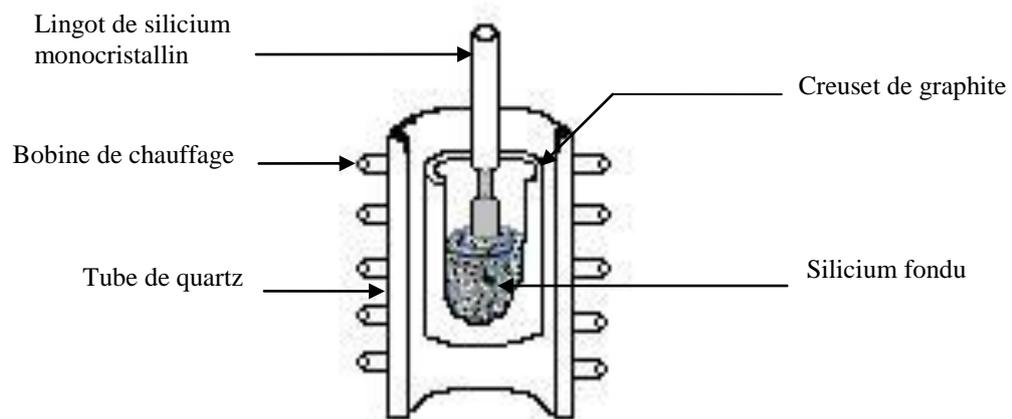


Fig. 1.5. La méthode de Czochralsky[20]

Dans le processus de ZF, une tige de silicium est placée sur un germe cristallin est balayé par un enroulement parcouru par un courant HF. Le champ magnétique de l'enroulement induit un champ électrique dans la tige, chauffant et fondant l'interface entre la tige et le germe. Le matériau

se solidifie et cristallise à l'interface donnant naissance à une tige monocristalline. Ces matériaux permettent d'atteindre une efficacité de conversion de l'ordre de 24% au laboratoire et entre 15-20% dans la production industrielle. Les photopiles à base de matériaux cristallins sont connues par leur fiabilité et stabilité et elles sont utilisées dans la production de forte puissance.

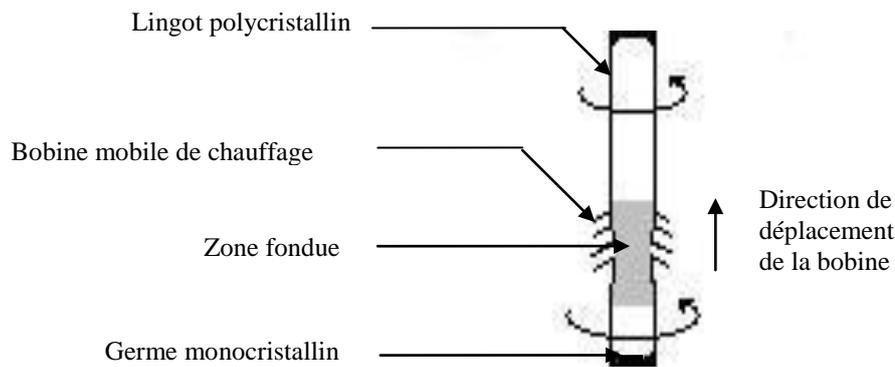


Fig. 1.6. Schéma de la méthode ZF [20]

I.4.1.2 Silicium polycristallin : Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium polycristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium polycristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium polycristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14%.

I.4.1.3. Silicium amorphe (a-si) : Le silicium amorphe a été le premier matériau utilisé pour réaliser une cellule solaire en couche mince grâce à sa forte absorption. Cependant, le rendement de conversion reste médiocre à cause du taux de recombinaison élevé qui caractérise la structure amorphe. Le silicium amorphe a été d'abord utilisé pour des applications «portables» de faible puissance pour des produits électroniques comme les calculettes ou les montres à quartz. L'amélioration des performances joint au coût inférieur au silicium cristallin lui ont permis de pénétrer le marché des panneaux solaires dans certaines applications où le coût importe plus que le rendement. Les recherches actuelles se concentrent sur l'amélioration des performances des

cellules et la mise au point de techniques de dépôt plus rapides pour développer des cellules multi-jonctions.

I.4.1.4. Arséniure de gallium (GaAs): L'arséniure de gallium est un matériau composé binaire. Son principal avantage par rapport au silicium est son gap direct ; ce qui lui confère une efficacité d'absorption supérieure à celle des différentes variétés du silicium. Ainsi, pour une même quantité d'énergie absorbée, quelques micromètres suffit pour le GaAs alors que le silicium exige quelques centaines de micromètres. En outre, le GaAs a une efficacité de conversion d'énergie beaucoup plus élevée que le silicium cristallin s'échelonnant entre 25 et 30%. [13, 14, 15, 16,17]

I.4.2. Autre matériau émergents en couches minces

Les recherches intensives entreprises depuis de nombreuses années sur d'autres matériaux que ceux à base de silicium enfin aboutissent vers la fin de cette décennie au stade de l'industrialisation. En 1999, ils occupaient une part négligeable du marché ($\approx 0.5\%$), car dans les 7.9% d'autres matériaux, il y a les rubans de silicium ($\approx 4\%$) et les hétéro-structures a-S/S cristallin qui représentent également une production de l'ordre de 3%. Parmi ces matériaux on peut citer :

I.4.2.1. Tellurure de cadmium : C'est un matériau de choix à cause de ses propriétés optiques optimales, c'est-à-dire un gap direct de l'ordre de 1.5 eV et une forte absorption dans tout le spectre solaire.

Ce matériau a vu le jour vers 1960 sous forme de couches minces et les premières hétérojonctions CdTe/CdS/SnO₂/verre sont apparues en 1964 et le premier modèle CdS /CdTe date de 1972. Malgré des rendements excédant les 15%, des problèmes non négligeables se posent, à savoir :

- La difficulté de réaliser des contacts électroniques ohmiques stables ;
- Les meilleurs rendements ont été obtenus sur des cellules utilisant comme substrat le silicate de bore, substrat très coûteux.
- La diffusion du sodium de verre ne semble pas profiter au CdTe et au contraire, il donne lieu à un effet négatif sur la durée de vie des porteurs minoritaires dans les cellules de CdTe.

- La sensibilité de cette cellule à la vapeur d'eau.
- L'agressivité pour l'environnement, du fait de la présence du Cd qui est toxique et polluant.

I.4.2.2. Matériaux chalcopyrite Cu – III. VI₂ : Des cellules solaires émergentes, basées sur les matériaux à structures chalcopyrites a fait suite à la réalisation de détecteurs photovoltaïques Cu InSe₂ /Cds par S. Wagner et coll. de Bell téléphone en 1974-1975. S. Wagner et coll. avaient rapporté la préparation d'hétérojonction. CaInSe₂/CdS à partir d'un monocristal CuInSe₂, dont la conductivité est de type P, sur lequel une couche mince de Cds de 5-10 μm d'épaisseur avait été déposée. La réponse photovoltaïque de ces détecteurs pour une lumière incidente à travers « la fenêtre » CdS donnait lieu à de très hauts rendements quantiques uniformes (70%) entre 0,55 et 1,25 μm. Ces hétérojonctions avaient des rendements de conversion de l'ordre de 5%.

I.5. Description d'une cellule solaire

I.5.1. Les couches principales : Les technologies utilisées par les différents fabricants varient, mais les caractéristiques de base des composants d'une cellule sont les mêmes. La structure de ces cellules se compose d'une jonction n⁺p peu profonde (environ 0.3 μm de la surface) pour une épaisseur moyenne d'environ 250 μm. La partie supérieure du semi-conducteur dopée N⁺ est

appelée l'émetteur par opposition à la partie inférieure du semi- conducteur dopée p située sous la zone de charge d'espace (ZCE) appelée base.

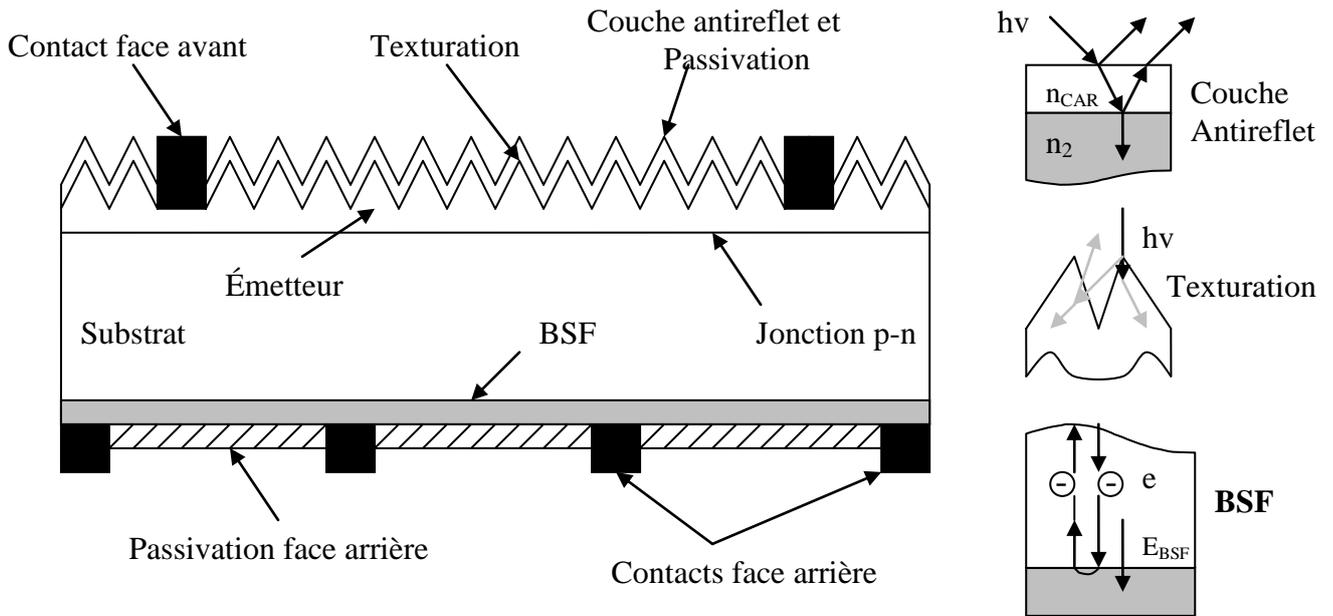


Fig. 1.7. Composition d'une cellule solaire [5]

Dans le but de diminuer la recombinaison des porteurs minoritaires sur la face avant, et à augmenter la tension de circuit ouvert, les deux faces présentent une couche de dioxyde de silicium dite couche de passivation. La passivation consiste donc à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets des défauts électriquement actifs.

Notons que diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitrure de silicium hydrogéné ($\text{Si}_3\text{N}_4\text{:H}$).

Afin de réduire les pertes par réflexion, une couche antireflet sur la face avant vient compléter le dispositif. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces. Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à.

$$d_{CAR} = \frac{(2N + 1)\lambda}{4n_{CAR}}, \quad N=0, 1, 2, 3, \dots \quad (I-3)$$

on obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'influence air/CAR et CAR/semi-conducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée

(avec deux diélectriques différents). Les principales CAR utilisées en photovoltaïque sont: TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 , SiN_x ,... [5,18]

I.5.2. Texturisation de la surface: La texturisation du silicium 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. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique.

L'insertion sur la Fig. I.7 présente le principe de réflexions multiples propre à la texturation. Le relief de la surface entraîne une baisse de réflexion en face avant: un rayon arrivant à l'incidence normale (par rapport au plan de la cellule) sur une pyramide sera réfléchi sur la face d'une pyramide adjacente, cette double réflexion sur les pyramides diminue le coefficient de réflexion totale, qui ne vaut plus R mais R^2 . D'autre part, un rayon d'incidence normale sera transmis dans la cellule avec un angle de réfraction θ différent de 0° . Le trajet de ce rayon au sein du silicium sera donc augmenté d'un facteur $1/\sin\theta$ par rapport au cas d'une surface plane et perpendiculaire à l'éclairement, ce qui aura pour effet d'augmenter la part de photons absorbés par le matériau. Pour finir, la texturisation de la surface entraîne un piégeage plus important de la lumière pénétrant dans la cellule. Sur la face arrière de la cellule, il existe un angle d'incidence critique θ_c à partir duquel le rayon est totalement réfléchi et prolonge son trajet au sein du semi conducteur, augmentant là aussi l'absorption des photons. En appliquant la loi de Descartes, on trouve que cet angle vaut 17° dans le cas du silicium dans l'air. Ce phénomène est particulièrement important dans le cas des cellules de faible épaisseur, et peut être renforcé par une texturation de la face arrière et/ou une couche antireflet sur cette même face. Différents procédés sont utilisés pour texturer la surface du silicium: attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH,) texturisation mécanique, texturisation laser.[5]

I.5.3. Contacts face avant et arrière : Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, car la résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement.[5]

I.5.4. BSF : Le champ électrique arrière ou back surface Field (BSF) consiste à créer une barrière de potentiel entre la base et le contact arrière pour limiter la recombinaison sur la face arrière.

I.6. Caractéristique électrique d'une cellule PV:

La mesure de la caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire permet de déterminer le courant en fonction de la tension pour une illumination donnée. Cette mesure s'effectue sous un simulateur solaire dont le spectre d'illumination est contrôlable.

La caractéristique $I(V)$ est d'une grande importance, parce qu'elle caractérise la cellule solaire comme générateur de puissance [12].

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

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs}(V) \quad (I-4)$$

Avec : I_{ph} densité de courant photogénéré et I_{obs} : densité de courant d'obscurité.

Pour une cellule photovoltaïque idéal, l'équation peut être écrite sous la forme suivante :

$$I(V) = I_{ph} - I_s (\exp(qV/kT) - 1) \quad (I-5)$$

Avec: I_s courant de saturation de la diode, q : charge élémentaire, k : constante de Boltzmann et T : température.

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant photogénéré et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à la cellule d'une cellule sous éclairage, **Fig. 1.8.** .

A partir de la caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule, notamment :

- **Courant de court –circuit I_{CC} :** C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule est nulle. Dans le cas idéal (R est nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photocourant I_{ph} .
- **Tension en circuit ouvert V_{CO} :** C'est la tension de circuit ouvert pour la quelle le courant débité par le générateur PV est nul.

- **Facteur de forme FF** : Défini comme étant le rapport $\frac{U_m I_m}{V_{CO} I_{CC}}$ avec U_m et I_m la tension et le courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque
- **Rendement de conversion** : Défini comme étant le rapport de la puissance électrique maximal fournie à la puissance solaire incidente.

$$\eta = \frac{U_m I_m}{P_i S} = \frac{FF V_{CO} I_{CC}}{P_i S} \quad (I-6)$$

avec P_i puissance d'éclairement reçue par unité de surface ; et S : la surface de la cellule PV et FF : facteur de forme[5,12]

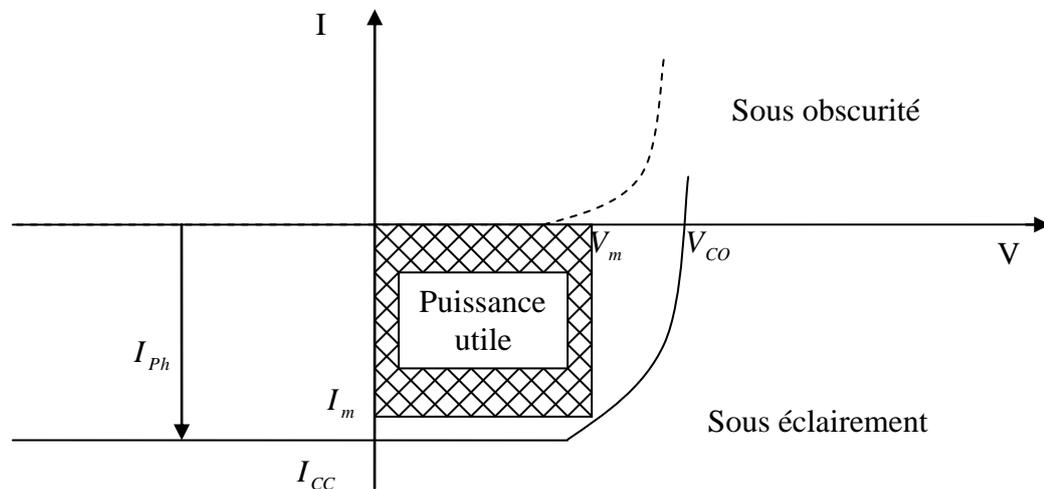


Fig. 1.8. Caractéristiques $I=f(v)$ sous obscurité et sous éclaircissement d'une cellule photovoltaïque.[5]

I.7. Facteurs limitant le rendement

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plupart des cas dues à la nature du matériau et la technologie utilisée. Ces pertes sont évoquées ci-après :

- La première limitation correspond aux photons utiles dans la conversion. Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent générer de paire électron-trou, et sont donc perdus. Un modèle plus détaillé du phénomène permet toutefois de considérer les mécanismes d'absorption

- assistée par phonons .Ceci repousse la limite de l'énergie du gap du silicium de 1.124 eV à 1.052 eV dans le cas d'une absorption assistée par un phonon.
- Les photons d'énergie supérieure au gap ne pourront générer qu'une seule paire/électron trou. L'excès d'énergie est perdu pour la conversion thermalisé. Sous un éclairage AM1.5, cette perte est évaluée à 33% dans le cas du silicium.

La tension maximale aux bornes de la cellule (V_{oc}) ne pourra pas dépasser la tension de gap E_g / q , de plus, en raison des recombinaisons Auger, V_{oc} ne pourra dépasser 0.65 V pour le silicium, sauf dans le cas de cellules très minces ($V_{oc}=0.72$ V pour une cellule de 20 μ m).

Le facteur de forme FF, même dans le cas d'une cellule idéale, ne peut dépasser 0.89, puisque les équations courant/tension sont régies par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle: $\exp(V/kT)$. Il ne pourra donc pas exister de courbe courant/tension rectangulaire (voir la caractéristique courant/tension de la **Fig. 1.8.**). Ce paramètre dépend de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction p-n, du matériau, de la résistivité des contacts métalliques, etc.....

Le rendement d'une cellule dépend aussi à la base du nombre de photons y pénétrant. Cette quantité est limitée par le coefficient de réflexion R de la surface de la cellule, qui pondère toutes les équations des courants photo-générés par un coefficient (1-R). Afin de réduire les réflexions, la surface de la cellule est texturée et recouverte d'une couche anti-reflet.

De manière analogue, le taux d'ombrage tient compte de la couverture partielle de la surface de la cellule par une partie opaque correspondant à la surface des contacts métalliques de la face avant. Notons que pour certaines structures de cellules, le taux d'ombrage est égal à zéro (par exemple pour les cellules photovoltaïques à contacts arrière).

Il y a une partie des photons qui, bien qu'ayant l'énergie nécessaire, traversent l'épaisseur de la cellule sans être absorbés, Ce terme devient important quand la cellule est très mince (<100 μ m), et peut être minimisé en utilisant une couche réfléchissante sur la face arrière de la cellule (réflecteur arrière).

Le rendement de collecte correspond au rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés et le nombre total de porteurs photo-générés. Ce terme tient donc compte des recombinaisons de porteurs survenant dans le volume et en surface de la cellule, et il dépend directement de la durée de vie des porteurs survenant dans le volume et en surface de la cellule[5].

I.8. Le Schéma électrique équivalent

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma équivalent électrique ci-dessous. Nous pouvons considérer le cas d'une cellule photovoltaïque idéale comprenant une source de courant et deux diodes en parallèle. La source de courant J_{ph} modélise le courant photo généré. Les branches de chacune des diodes représentent respectivement le courant de diffusion dans la base et l'émetteur J_1 , et le courant de génération et de recombinaison J_2 dans la zone de charge d'espace (ZCE) de la Jonction.

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

- Une résistance 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 (fuite par les bords de la cellule est au niveau de la jonction)

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

$$J(V) = J_{ph} - J_{obs} \quad (I-7)$$

où J_{ph} : la densité de courant photonique

J_{obs} : La densité de courant d'obscurité

Soit

$$J = J_{ph} - J_{01} \left[\exp\left(\frac{q\{V + JR_S\}}{n_1KT}\right) - 1 \right] - J_{02} \left[\exp\left(\frac{q\{V + JR_S\}}{n_2KT}\right) - 1 \right] - \frac{V + JR_S}{R_p} \quad (I-8)$$

Dans cette expression, J_{01} est la densité de courant de saturation de la première diode qui résulte de la densité de courant de diffusion, J_{02} est la densité de courant de la seconde diode qui résulte de courant de génération et recombinaison dans la zone de charge d'espace de la jonction.

[18]

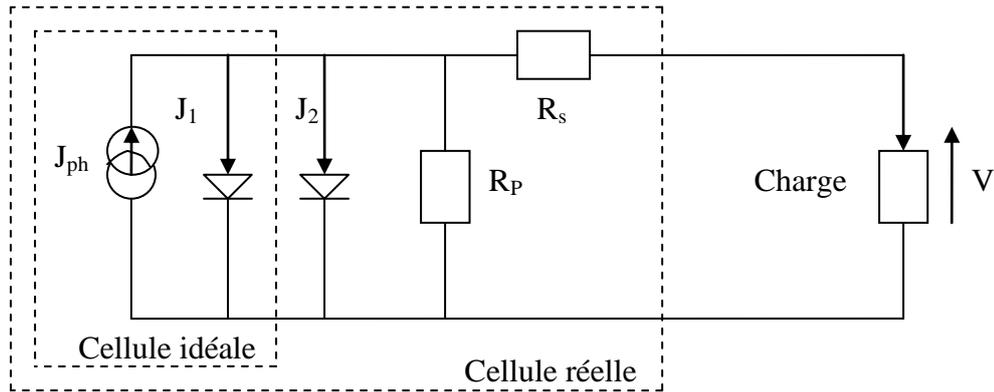
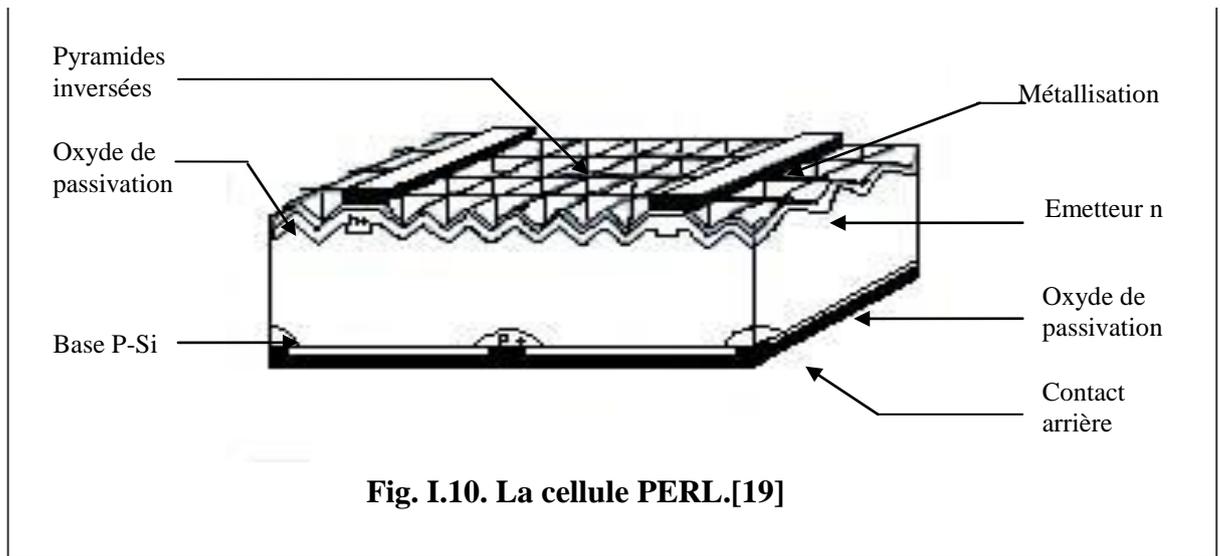


Fig. I.9. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.[18]

I.9. Structure des cellules photovoltaïques

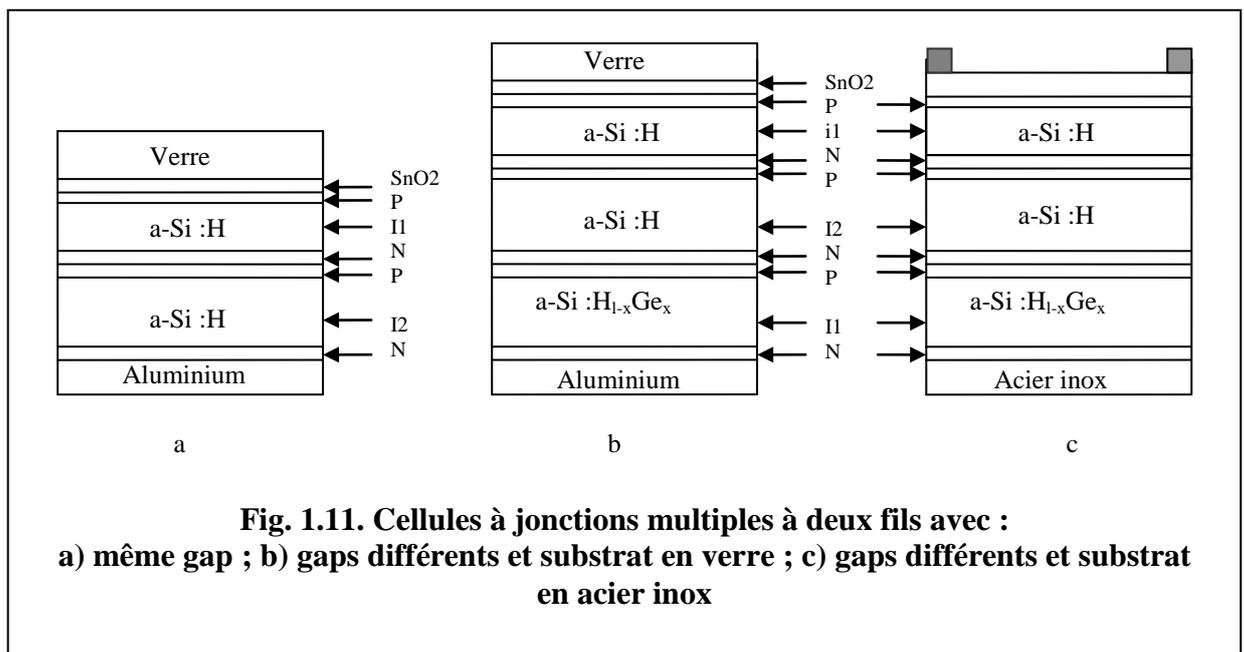
Les dispositifs photovoltaïques récents tendent à convertir convenablement le maximum de l'énergie lumineuse en électricité et réduire efficacement les pertes électriques et optiques, et optimiser les propriétés des surfaces. Les structures photovoltaïques liées aux exigences technologiques et industrielles, doivent se rapprocher d'une cellule idéale et minimiser les pertes dans les contacts ohmiques, de la réflexion et recombinaison (amélioration de qualité cristalline). Dans cette optique, la technologie photovoltaïque a vu plusieurs variantes au niveau des structures solaires ces dernières années, grâce aux méthodes d'élaboration et aux techniques de dépôt et du traitement thermique.

I.9.1-structure d'une cellule photovoltaïque à haut rendement (PERL): La structure de la cellule photovoltaïque à haut rendement (PERL) « Passivated Emitter with Rear, Locally diffused » est présentée sur la **Fig. 1.10**. Cette cellule est réalisée sur un substrat de Si-FZ (Float zone) de type p. La face avant (face éclairée) de la cellule texturée en «pyramide inversées». Ce type de texturation permet une réduction importante du coefficient de réflexion et ainsi les pertes optiques [5]. La réduction des pertes résistives d'environ 50% a permis aussi aux photopiles d'atteindre des rendements de l'ordre de 24% pour le silicium. [19]



I.9.2. Cellules à jonctions multiples : La contrainte de la dégradation des cellules soumises à la lumière poussé les chercheurs et les industriels à trouver des astuces dans l'architecture du dispositif pour minimiser cet effet. Les cellules à jonctions multiples, en plus de leur rendement étendu dans le rouge répondent à ce souci. En effet, en multipliant le nombre de jonctions avec des matériaux à gap légèrement différent, tout en réduisant l'épaisseur de chacune, les difficultés à surmonter sont :

- un bon appariement des courants puisque c'est la cellule la plus mauvaise qui va imposer son courant ;
- des interfaces fortement recombinantes, le plus souvent réalisées avec du silicium microcristallin. [20]



I.9.3. Hétérostructure : En déposant un autre semi conducteur sur le silicium, on obtient une hétérojonction. On s'arrange pour que l'essentiel du processus photovoltaïque ait lieu dans le silicium. Les matériaux envisageables pour cette utilisation doivent posséder les propriétés suivantes :

- Transparence pour le spectre solaire, ($E_g > 3\text{eV}$).
- Conductivité électrique élevée pour faciliter et éventuellement remplacer la métallisation des contacts ohmiques.
- Créer une barrière de potentiel élevé.
- Posséder un indice de réfraction voisin de « 2 » pour jouer le rôle d'une couche anti réflexion.

Deux matériaux remplissent ces conditions, l'oxyde d'étain (SnO_2) et l'oxyde d'indium (InO_3). Les rendements pour ce type de cellules sont compris entre 10 et 12%. [20]

I.9.4. La structure du BSF ,: Le BSF (champ de surface arrière), aussi appelé « High-low-Junction » est une zone très dopée sur la totalité de la face arrière des photopiles avec un dopage de même type que celui de la base pour obtenir une structure n^-p-p^+ . Le principal dopant utilisé est le bore et l'épaisseur de la couche p^+ (W_{BSF}) est d'environ 5 à 15 μm . En créant ainsi un gradient d'accepteurs en face arrière de la cellule, il est possible d'obtenir.

- Une augmentation du courant de court-circuit.
- Une augmentation de la réponse spectrale aux grandes longueurs d'onde.
- Une réduction de la résistance des contacts.

L'effet du BSF est compréhensible à partir du diagramme de bandes de la structure illustrée par la Fig. I.12. La barrière de potentiel ϕ_B induite par la différence de niveau de dopage entre la base p et le BSF p^+ , tend à confiner les électrons (porteurs minoritaires) dans la base, ce qui permet de les tenir à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison S_p très élevée [18].

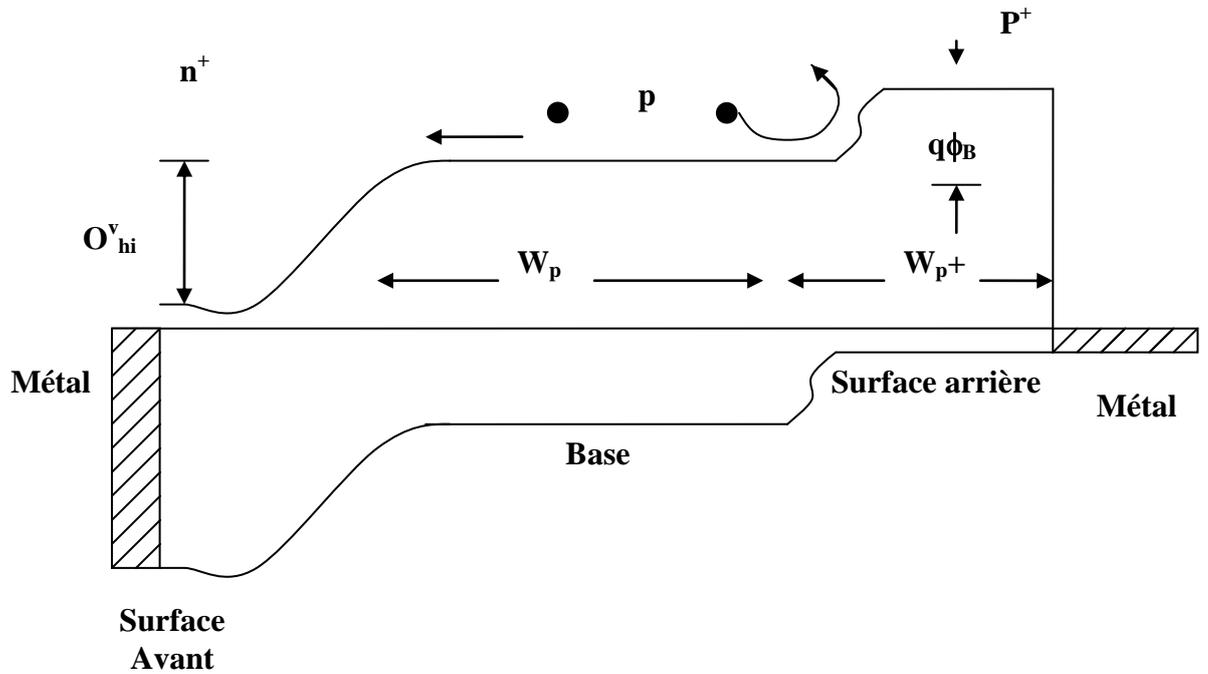


Fig. I.12. Diagramme énergétique d'une cellule solaire à couche BSF [21]

I.9.5. Tandem solaire: Les cellules solaires à une seule jonction ne permettent pas d'exploiter convenablement le spectre solaire, le spectre solaire est très large, et comme plusieurs matériaux solaires ayant une faible absorption dans le bleu et dans l'infrarouge ; il faut empiler plusieurs cellules dans l'ordre décroissant du gap. La réponse spectrale dans les tandems s'élargit le long du spectre de l'infrarouge vers le bleu et même le violet la tension de circuit ouvert V_{co} des tandems solaires atteint des valeurs très optimisées. Par exemple, le tandem à trois jonctions de InGaP/GaAs/Ge a une tension de 2.1 eV, il peut exploiter de 300 vers 1900 nm. Une des structures Tandem qui offrent des rendements élevés est AlGaAs/GaAs, GaAs/Ge, AlGaAs/Si et InP/InGaAs.[22]

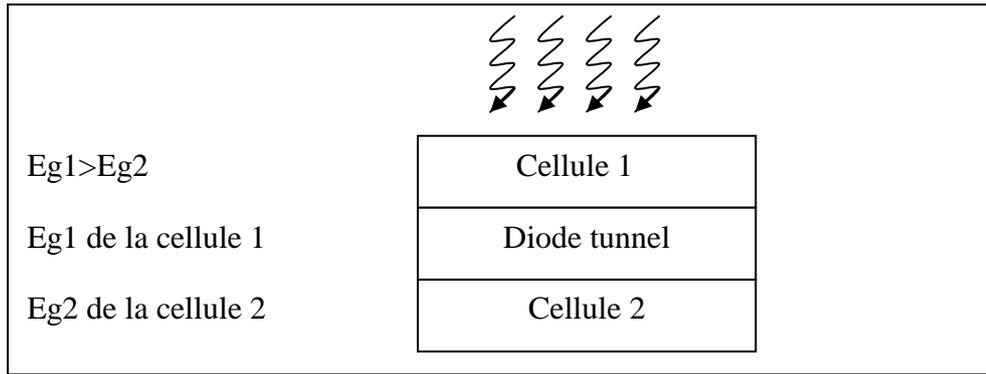


Fig. I.13. : Tandem solaire à deux jonctions [23]

I.9.6. Cellule solaire de type Schottky: Le dépôt d'un métal, convenablement choisi, en couche mince sur le silicium permet d'obtenir un autre type de cellules solaires connu sous le nom de « cellule Schottky ». Le diagramme énergétique de ce type de cellules sous illumination est montré sur la Fig. I.14. ci-dessous.

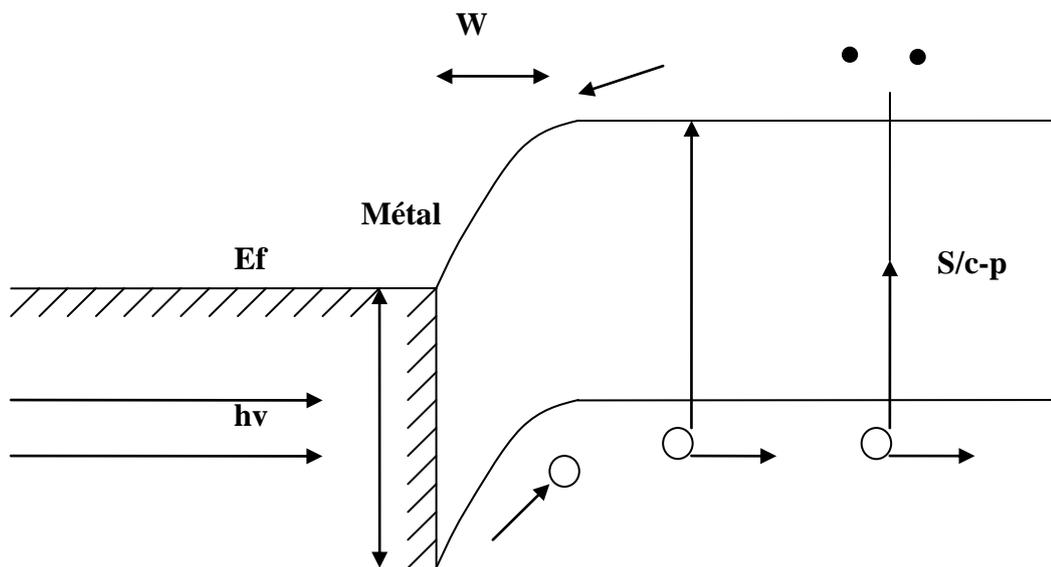


Fig. 1.14. : Cellule solaire de type Schottky[24]

La couche métallique doit être très mince pour permettre à la lumière d'atteindre le semi-conducteur. Le photo-courant résultant à trois composantes. En effet, la lumière d'énergie « $h\nu > q \times \Phi_B$ » peut être absorbée dans le métal et fait passer des trous au-dessus de la barrière dans le semi-conducteur. Les rayonnements de courtes longueurs d'onde sont absorbés dans la région de déplétion dans le semi-conducteur et ceux de grandes longueurs d'onde sont absorbés dans la région neutre, créant des paires électron-trou comme dans la jonction « P-N ». Les avantages de la jonction Schottky sont :

- Traitement à basses températures (aucune diffusion à haute température n'est exigée).
- Adaptation au silicium poly cristallin et une pile solaire en couches minces.
- Résistance élevée aux radiations due au champ électrique dans la ZCE. [24]

I.9.7. Cellule solaire de types structure MIS: Rappelons, tout d'abord, qu'il est plus judicieux de parler de structures CIS (Conducteur-Isolant-Semi-conducteur), car le conducteur peut être un métal, un oxyde conducteur, un semi-conducteur ou un électrolyte. Cependant, l'appellation MIS est la plus répandue dans la littérature.

Dans ce type de cellules, un film isolant très mince de l'ordre de 0.2 nm est formé entre le métal et le substrat semi conducteur. L'isolant est obtenu soit par oxydation superficielle du silicium (thermiquement ou chimiquement par le (HNO_3) , soit par dépôt de (SiO_2) en atmosphère contrôlée. Puisque l'oxyde peut être formé à basses températures et aucun procédé de diffusion n'est impliqué, on s'attend à ce que cette structure fabriquée sur des substrats polycristallins ou amorphes fournisse une solution rentable pour des applications terrestres. Un rendement de 18% est obtenu avec cette structure sous éclairement AM_1 . [24, 25]

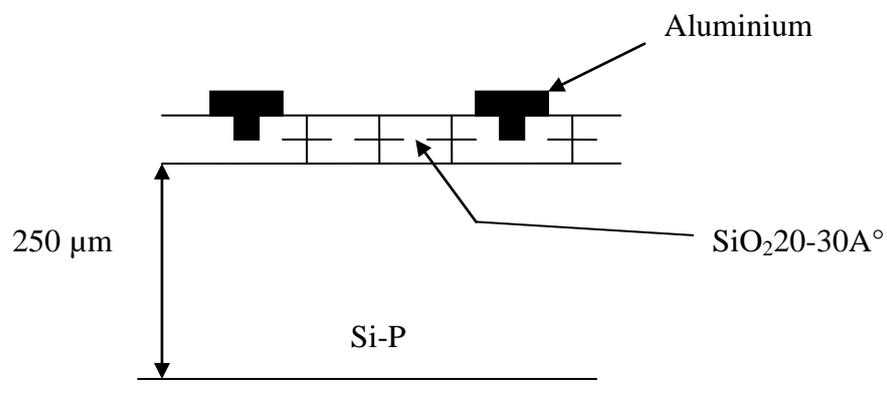


Fig. I.15. Cellule solaire de type structure MIS[24]

I.9.8. Fabrication de la cellule solaire MIS: Il y a deux approches qui ont été utilisées dans la fabrication des piles solaire MIS :

- approche en métal transparent (transparent metal approach)
- approche en réseau (grating approach)

Les diagrammes schématiques pour les deux approches sont montrés dans la Fig.I.16. Jusqu'ici, l'approche (b) a été employée pour des dispositifs de silicium, mais il est également applicable à n'importe quel autre semi-conducteur. Nous décrivons d'abord l'approche en métal transparent pour le silicium et le semi-conducteur composé par exemple GaAs suivi de l'approche en réseau.

I.9.8.1. Cellules solaires MIS en métal transparent : Dans l'approche en métal transparent, des dispositifs à base de silicium sont fabriqués à partir des plaquettes habituellement polies d'un coté et ce après des procédures standards de nettoyage. De nombreux procédés de fabrication sont possibles, mais comme exemple, nous décrivons le procédé de fabrication d'Anderson et ses collaborateurs, qui a donné l'efficacité de conversion la plus élevée pour cette classe de piles solaires. Après un pré-nettoyage et gravure du silicium à l'aide de l'acide HF 48%, on procède à un deuxième nettoyage à l'eau dés-ionisée dans un bac à ultrason nettoyés puis séchage par un jet d'azote pure. La plaquette nettoyée est ensuite placée dans un système de vide où le vide limite est de l'ordre de 10^{-6} torr pour élaborer le contact arrière qui est en général, pour le silicium de type p, une couche d'aluminium dont l'épaisseur est de l'ordre de 5000Å. Après cette étape, la plaquette est placée dans un four porté vers 600 °C pour allier le contact arrière et faire croître une fine couche d'oxyde d'épaisseur qui va de 10 à 20 Å. Enfin, une couche métallique ultramince (60Å), une grille pour le contact avant et la couche antireflet à base de matériaux tels que SiO_x , TiO_x , Ta_2O_5 , MgF_2 , $\text{CeO}_2\text{Al}_2\text{O}_3$, Si_3N_4 , Sb_2O_3 ,.....

I.9. 8.2. Cellules solaires en réseau : Les cellules solaires MIS en réseau sont préparées de la même façon que les cellules en métal transparent. Cependant, les motifs en métal du réseau métallique sont réalisés dans ce cas par des techniques de photolithographie d'une part. Le choix de la couche antireflet est plus critique pour ce type de cellules puisqu'elle doit non seulement réduire la réflexion mais elle doit également passiver la surface du semi-conducteur dans les régions non couvertes par le métal. On utilise souvent des couches SiO_2 ou SiO qui induisent des couches d'inversions sur le silicium de type P ; ce qui augmente la distance de collecte des porteurs. [25]

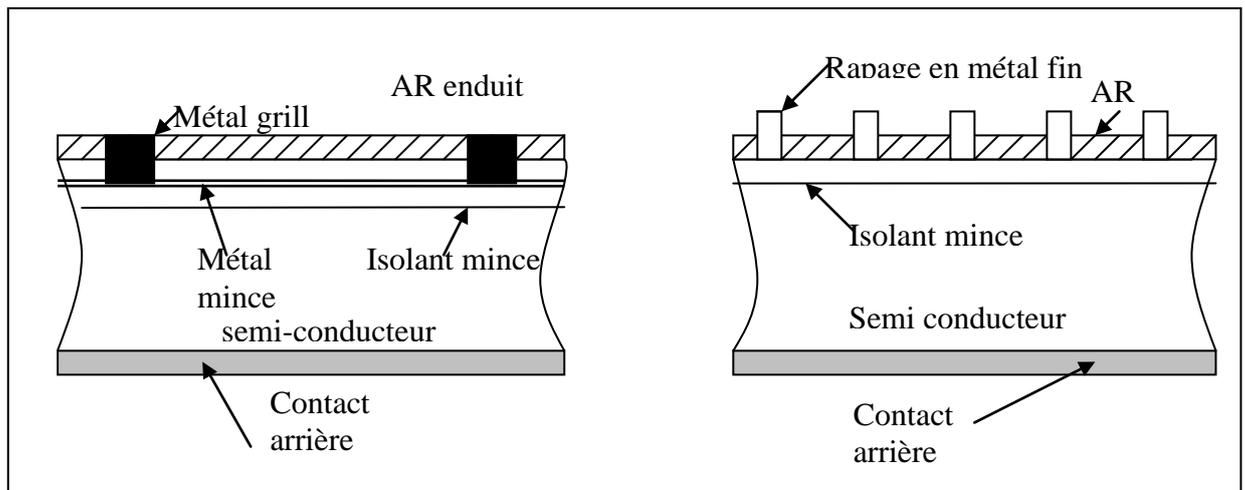


Fig. I.16. : (a)-Diagramme d'une pile solaire MIS en transparent, (b) diagramme d'une pile solaire MIS en réseau. [25]

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire et les mécanismes induits lors de son interaction avec les matériaux semi-conducteurs, comme l'absorption, la génération et la recombinaison des porteurs de charges. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement. Enfin, on a cité quelque type des structures et matériaux utilisés également pour la conversion photovoltaïque entre autres la structure MIS

II.1. Introduction

Les systèmes de conversion photovoltaïque d'énergie solaire à grande échelle jouent un grand rôle dans la production d'énergie électrique grâce à l'utilisation des piles solaires. Actuellement, l'obstacle principal aux applications à grande échelle est le coût élevé de piles solaires. Pour réduire ce coût élevé, on a recours à des techniques de fabrication simples en utilisant des matériaux non onéreux. Dans cette optique, les piles solaires à base de structure métal- isolant- semi conducteur (MIS) peuvent apporter une solution du moins à moyen terme.

Ces piles solaires ont été étudiées par plusieurs laboratoires en raison de la simplicité de fabrication avec une technologie associée à basse température.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'étude des propriétés et caractéristiques des structures MIS à la lumière des modèles développés pour rendre compte du comportement électriques de ces structurés lorsqu'elles sont utilisées comme cellules solaires.

II.2. Description de la structure MIS

Une structure MIS est un empilement de trois couches : métal, isolant et semi-conducteur. Elle peut être réalisée de la façon suivante :

- Croissance (par oxydation thermique ou anodique) ou dépôt par chemical vapor deposition (C.V.D), pulvérisation réactive, polymérisation en plasma d'une mince couche diélectrique (400-1000Å) à la surface d'un semi-conducteur ;
- Dépôt d'une électrode métallique dite « grille » par évaporation sous vide ou pulvérisation cathodique à la surface diélectrique ;
- Elaboration sur le semi-conducteur d'un « contact ohmique » permettant de polariser le semi-conducteur par rapport à la grille Fig. II.1.

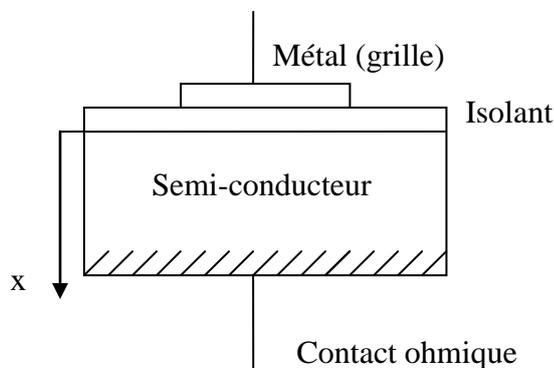


Fig. II.1. : Schéma synoptique d'une structure MIS

L'isolant doit être assez épais pour interdire toute circulation de courant à travers le diélectrique (effet tunnel négligeable). Il en résulte que, même si une polarisation est appliquée entre grille et contact ohmique, le semi-conducteur est toujours en équilibre thermique, le niveau de fermi y est donc « plat », c'est-à-dire indépendant de x (x étant une coordonnée spatiale normale à l'interface semi-conducteur isolant). L'isolant doit être toute fois assez mince pour qu'une polarisation de quelques volts appliquée entre grille et contact ohmique puisse « courber » les bandes du semi-conducteur dans la région interfaciale. Une épaisseur de l'ordre de 10^2 à 10^3 est un bon compromis. [26]

II.3. Structure MIS idéale Le diagramme énergétique de la structure MIS idéale est illustré par la Fig. II.2. Si les bandes du semi-conducteur sont « plates » pour une tension appliquée nulle on dit qu'on a une structure MIS idéale ; c'est le cas quand l'équation II-1 est vérifiée.

$$\text{Pour un semi-conducteur de type p : } \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \phi_b \right) = 0$$

(II-1)

$$\text{Pour un semi-conducteur de type n : } \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \phi_b \right) = 0$$

Où :

- ϕ_m : la fonction de travail
- E_g : la largeur de la bande interdite
- q : la charge absolue de l'électron
- ϕ_b : La différence d'énergie entre le niveau de fermi et le niveau intrinsèque E_i

Dans le cas non idéal, une petite courbure de bandes existe dans l'interface isolant-semi-conducteur, et un petit potentiel V_{fb} . (tension prétendue d'une bande plate) doit être appliqué au métal pour obtenir les conditions de bandes plates. [27,28]

Quand la diode MIS est polarisée avec des tensions positives ou négatives, trois situations différentes peuvent se produire à l'interface isolant:

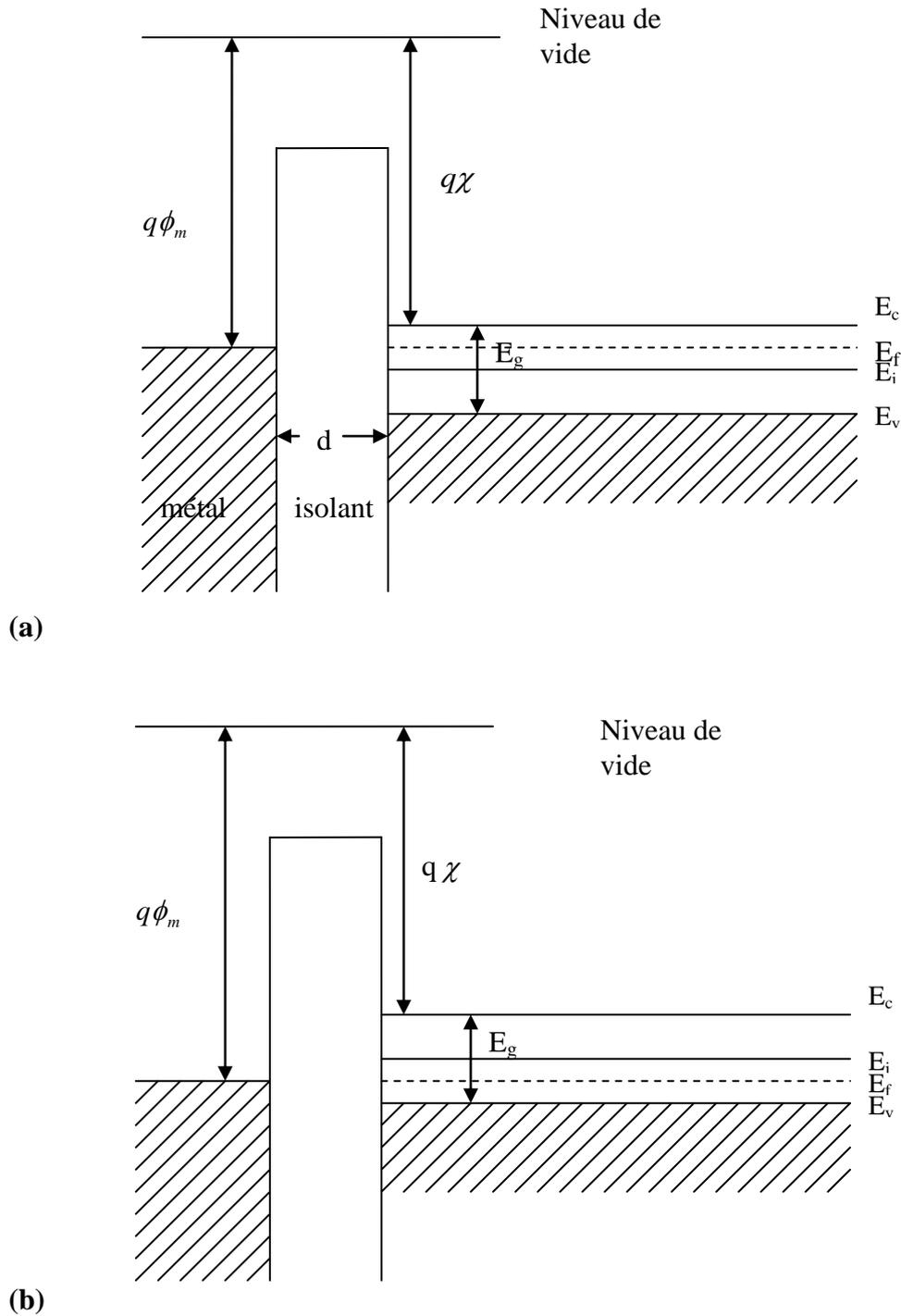


Fig. II.2. le diagramme de bande d'énergie pour idéal MIS diode quand, $V=0$ (a) n type semi-conducteur (b) p type semi conducteur[28]

II.3.1. Régime d'accumulation : On polarise la grille négativement par rapport au semi-conducteur P. les trous libres du semi-conducteur s'accumulent à l'interface semi-

conducteur – isolant. Une fine zone de charge d'espace positive apparaît au voisinage immédiat de cette interface. La courbure des bandes s'oriente vers le haut.

II.3.2. Régime désertion : On polarise la grille positivement par rapport au semi-conducteur P. les trous libres sont chassés de l'interface. Il se crée une large zone déserte correspondant à une charge d'espace négative coté semi-conducteur.

le profile du champ est linéaire dans le semi-conducteur (densité de charge est uniforme) et est plat dans l'isolant. Il en résulte un profil de potentiel parabolique dans le semi-conducteur et linéaire dans l'isolant. La courbure des bandes du semi-conducteur est inversée par rapport à l'accumulation, ce qui éloigne les trous de l'interface.

II-3-3. Régime d'inversion : Si on accroît la polarisation positive de la grille, la courbure des bandes du semi-conducteur isolant s'accroît, il arrive un moment où le niveau E_c à l'interface semi conducteur isolant est plus proche du niveau de fermi E_{fsc} que le niveau E_v n'est proche de E_{fsc} dans le volume. On a donc une inversion du type de semi-conducteur et donc une accumulation des électrons à l'interface isolant semi-conducteur. [26]

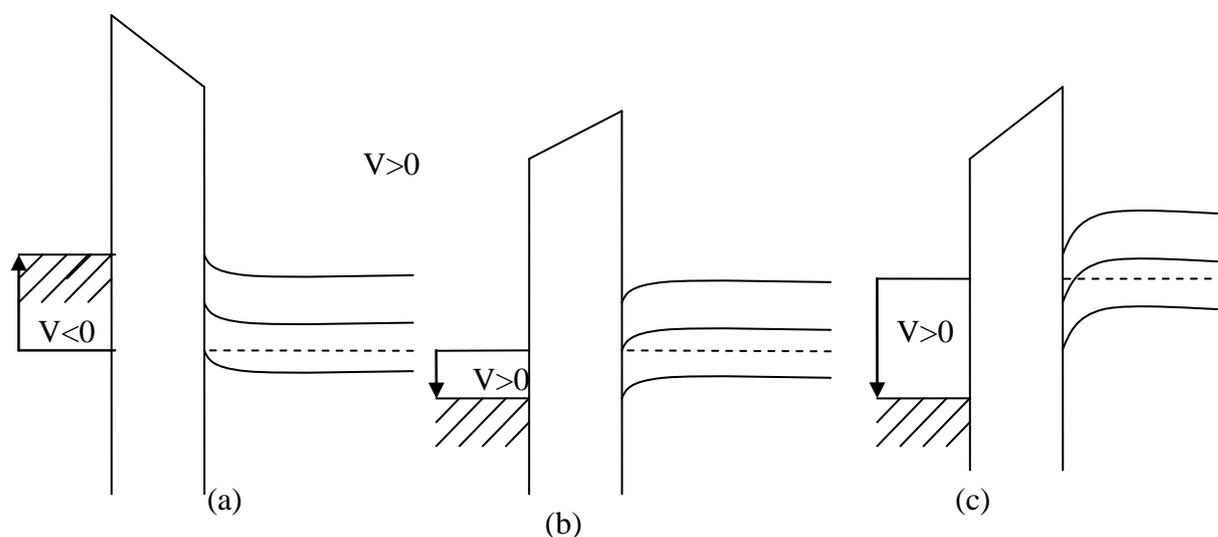


Fig. II.3. : Les différents régimes : (a)- accumulation (b)-déplétion (c) -inversion [27]

II.4. Les caractéristiques électriques de la structure MIS [29]

II.4.1. Les caractéristiques courant- tension d'obscurité : Pour les cellules solaires de type MIS à base de couches minces, les mécanismes qui contribuent au courant d'obscurité sont :

- Effet tunnel ;
- La diffusion des porteurs minoritaires ;
- La recombinaison de porteurs ;

Les contributions relatives des différents mécanismes de transport dépendent des paramètres de la cellule et de la tension appliquée.

Pour des cellules à base de matériaux semi-conducteurs de type n, la continuité du courant des trous nécessite d'avoir:

$$J_{vt} = J_d + J_r \quad (\text{II-2})$$

Où :

- J_{vt} est la densité du courant tunnel des trous à l'interface isolant / semi-conducteur ($x=0$)
- J_d : est la densité de courant de diffusion au bord de la zone de déplétion ($x=w$)
- J_r : est la densité de courant de recombinaison dans la zone de déplétion

La densité du courant externe, qui est la somme des densités du courant tunnel d'électrons et de trous, peut être exprimée par la relation :

$$J = J_{ct0} [\exp((E_{Fn}(0) - E_{Fm}) / kT) - 1] + J_{do} [\exp((E_{Fs} - E_{Fp}(W)) / kT) - 1] + J_{ro} [\exp((E_{Fn} - E_{Fp}) / 2kT) - 1] \quad (\text{II-3})$$

où J_{ct0} , J_{do} et J_{ro} sont respectivement les densités de courant de saturation inverse liées aux mécanismes de transport d'électrons par effet tunnel, à la diffusion des trous et la recombinaison, E_{Fn} et E_{Fp} sont les quasi niveaux de Fermi des électrons et des trous, E_{Fs} et E_{Fm} sont les niveaux de Fermi du semi-conducteur et du métal, k est la constante de Boltzmann et T : la température.

Les densités de courant de saturation inverse sont données par :

$$J_{cto} = A^* T^2 \exp(-X_n^{0.5} di) \exp(-q\theta_b / kT) \quad (\text{II-4})$$

$$J_{do} = \left(qn_i^2 / N_d \right) \left[\left\{ S_p \coth(d - W) / L_p + (D_p / L_p) \right\} / \left\{ \coth(d - W / L_p) + \left(S_p / (D_p / L_p) \right) \right\} \right] \quad (\text{II-5})$$

5)

$$J_{or} = qn_i W / 2\tau_p \quad (\text{II-6})$$

Où :

A^* : constante effective de Richardson ;

X_n : hauteur de la barrière tunnel.

d_i : épaisseur de l'isolant.

q : charge élémentaire de l'électron.

Φ_b : hauteur de la barrière de potentielle.

n_i : concentration intrinsèque.

N_d : dopage du semi-conducteur

S_p : vitesse de recombinaison en surface des trous à la surface arrière.

D_p, L_p, T_p : sont respectivement la constante de diffusion des porteur minoritaires, la longueur de diffusion et la durée de vie.

d : épaisseur de la cellule.

II.4.2. Diagrammes de bandes d'énergie [30]: Le diagramme de bandes d'énergie de la structure MIS sous l'illumination est montré dans la Fig. II.4.

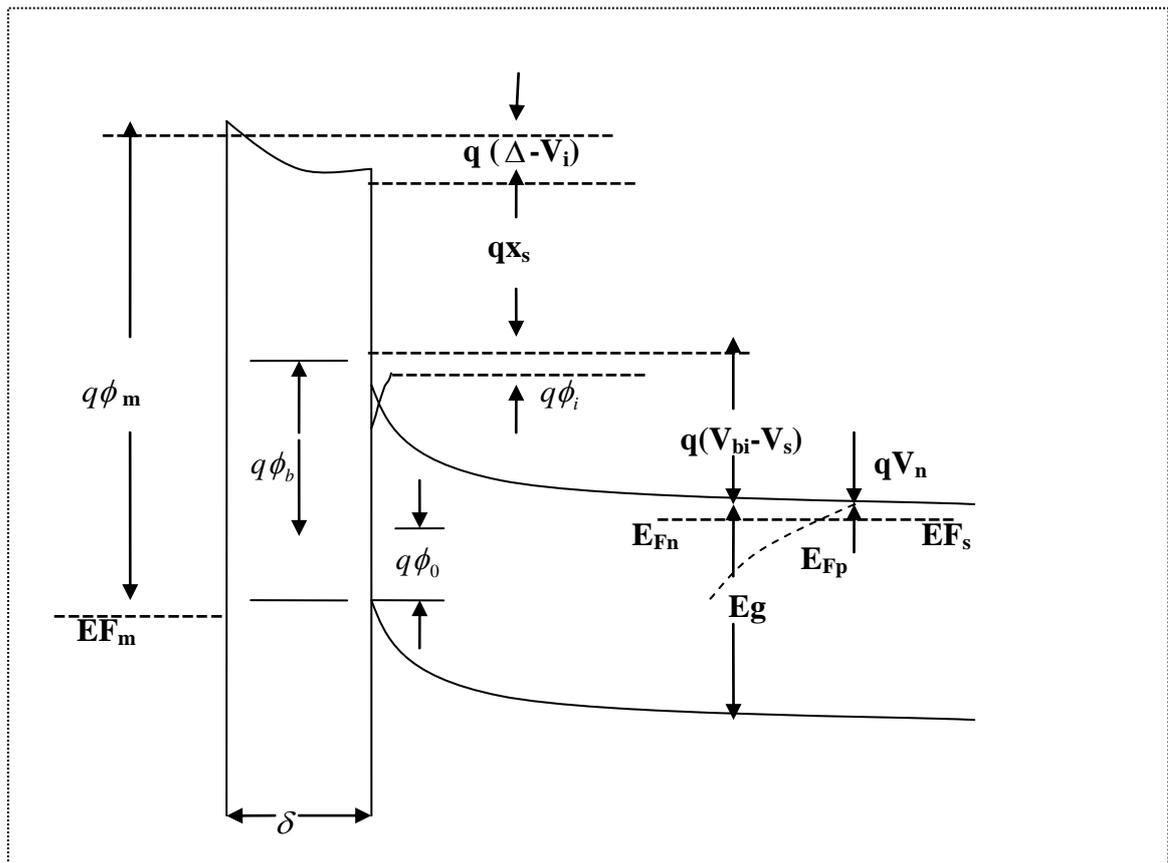


Fig. II.4. Le diagramme de bandes d'énergie de la diode MIS sous illumination[29]

A cause du champ élevé à l'interface isolant-semi-conducteur, les porteurs minoritaires photogénérés sont rapidement balayés vers le métal. Si une charge externe est reliée à la diode, la tension V produite dans le dispositif est répartie entre la ZCE et l'isolant ; ce qui permet d'écrire :

$$V = V_s + V_i \quad (\text{II-7})$$

Les concentrations en porteur peuvent être calculées à partir du potentiel ψ qui est la déviation de niveau intrinsèque E_i . Le potentiel ψ est zéro dans le volume et est égal à ψ_s à l'interface et nous avons :

$$n_n = n_{n0} \exp(\beta\psi) \quad (\text{II-8})$$

$$p_n = p_{n0} \exp(-\beta\psi)$$

où $\beta = q/kt$ et $\psi < 0$ pour la bande courbée vers le haut qui signifie l'accumulation des trous à l'interface. Le potentiel ψ peut être obtenu en résolvant l'équation de Poisson :

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{p(x)}{E_s} = -\frac{q}{E_s} (N_D^+ + N_A^- + p_n - n_n) \quad (\text{II-9})$$

A l'intérieur du volume du semi-conducteur, la neutralité doit exister et nous avons :

$$N_D^+ + P_{n0} = N_A^- + n_{n0} \quad (\text{II-10})$$

Par substitution des équations (II-8) et (II-10) dans l'équation (II-9) et après résolution [24], le champ électrique à la surface est donné par :

$$\xi_s = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{2}{\beta L_D} F(\beta \psi_s, \frac{P_{n0}}{n_{n0}}) \quad (\text{II-11})$$

Où :

$$L_D = 2\epsilon_s / N_D q \quad (\text{II-12})$$

$$F(\beta \psi_s, P_{n0} / n_{n0}) = [(e^{\beta \psi_s} - \beta \psi_s - 1) + P_{n0} / n_{n0} (e^{-\beta \psi_s} + \beta \psi_s - 1)]^{1/2} \quad (\text{II-13})$$

$$n_{n0} \approx N_D \text{ et } \psi_s = -(V_{bi} - V_s) \quad (\text{II-14})$$

$$P_{n0} \cdot n_{n0} \approx n_i^2 \exp(\beta V_s) \quad (\text{II-15})$$

Pour l'état de non équilibre, nous prenons la densité de charge extérieur dans la zone de déplétion comme :

$$Q_{sc} = \epsilon_s \xi_s = \frac{2\epsilon_s}{L_D} \left\{ \begin{array}{l} e^{-\beta(V_{bi}-V_s)} + \beta(V_{bi}-V_s) - 1 + \frac{n_i^2}{N_D^2} e^{\beta V_s} \\ [e^{\beta(V_{bi}-V_s)} - \beta(V_{bi}-V_s) - 1] \end{array} \right\}^{1/2} \quad (\text{II-16})$$

La largeur W de la ZCE est dérivée en assumant toute les impuretés ionisées dans la zone de déplétion, d'où :

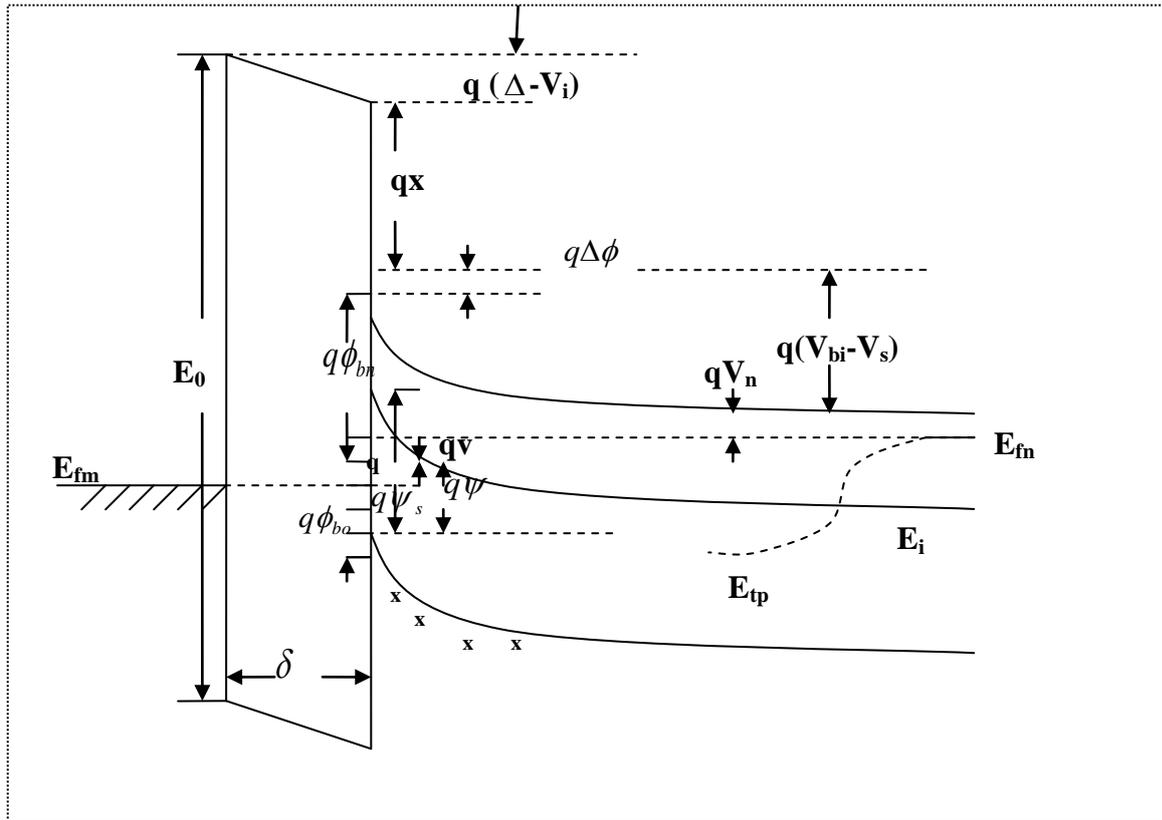


Fig. II.5. : Diagramme de bandes d'énergie avec une charge externe relié à la diode. [30]

$$W = \frac{1}{qN_D} Q_{SC} = \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_s}{N_D q \beta}\right) F[-\beta(V_{bi} - V_s), \frac{p_{n0}}{n_{n0}}]} \quad (\text{II-17})$$

Si $q(V_{bi} - V_s) \gg KT$ et $n_i^2 / N_D^2 \ll 1$, W peut être rapprochée par :

$$W = \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_s}{N_d q}\right) (V_{bi} - V_s - KT/q)} \quad (\text{II-18})$$

Où :

ε_s : La constante diélectrique du semi-conducteur

V_{bi} : est la tension de diffusion

V_s : est la chute de tension à travers la ZCE à l'interface isolant semi-conducteur.

Quand les états de surface sont en équilibre avec le semi-conducteur :

$$V_s = \gamma \mathcal{N} - (\gamma \delta / \varepsilon_i) \sqrt{2qNd\varepsilon_s} \left(\sqrt{V_{bi}} - \sqrt{(V_{bi} - V_s)} \right) \quad (\text{II-19})$$

Où :

$$\gamma = [1/1 + (qD_{ss} \delta / \varepsilon_i)] \quad (\text{II-20})$$

D_{ss} : est la densité d'états de surface

ε_i : est la constante diélectriques de l'isolant.

II.4.2. Caractéristique courant tension I(V) sous éclairnement: La densité du photo-curent de court-circuit traversant la cellule MIS peut être exprimée comme :

$$J_{SC} = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_g} (J_{dl}(\lambda) + J_{pw}(\lambda)) d\lambda \quad (\text{II-22})$$

Où

J_{dl} : est la contribution des porteurs produits dans la zone déplétions.

J_{pw} : est la contribution résultant de la diffusion des trous à la frontière de la zone déplétion.

λ_{\min} : est la longueur d'onde minimum du spectre solaire.

λ_g : est la longueur d'onde correspondant à la bande interdite du semi-conducteur.

Pour un rayonnement monochromatique, J_{dl} peut s'écrire sous la forme :

$$J_{dl}(\lambda) = q \int_0^w G(x, \lambda) dx \quad (\text{II-23})$$

Tenant compte des réflexions multiples aux surfaces avant et arrière, le taux de génération optique des paires électron-trou peut s'écrire sous la forme :

$$G(x, \lambda) = \left[\frac{\alpha(\lambda) N(\lambda)}{1 - r_f r_b \exp(-2\alpha d)} \right] [\exp(-\alpha x) + r_b \exp(-\alpha(2d - x))] \quad (\text{II-24})$$

où

$r_f \cdot r_b$: sont respectivement les coefficients de réflexion à l'avant et l'arrière de la cellule

$\alpha(\lambda)$: est le coefficient d'absorption du semi-conducteur

$N(\lambda)$: est la densité de flux de photons du spectre solaire donné par l'expression :

$$N(\lambda) = 5.03 \cdot 10^{18} \lambda \cdot P(\lambda) \text{ (cm}^{-2} \text{s}^{-1} \mu\text{m}^{-1}) \quad (\text{II-25})$$

Où $P(\lambda)$, est l'irradiance spectrale solaire en $\text{W.cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ et la longueur d'onde est en μm

En combinant les équations (II-23) et (II-24), nous obtenons :

$$J_{dt}(\lambda) = \left[\frac{qN(\lambda)}{1 - r_b r_f \exp(-2\alpha)} \right] \left[\frac{1 - \exp(-\alpha W) + r_b \exp(-\alpha(2d - W))}{r_b \exp(-2\alpha d)} \right] \quad (\text{II-26})$$

L'expression de $J_{pw}(\lambda)$ est obtenue en résolvant l'équation de continuité pour les trous.

$$D_p \frac{\partial^2 P_n(x, \lambda)}{\partial x^2} - \frac{P_n(x, \lambda) - P_{n0}}{\tau_p} + G(x, \lambda) = 0 \quad (\text{II-27})$$

Avec les conditions aux limites :

$$P_n(W, \lambda) = P_{n0} \quad (\text{II-28})$$

et

$$D_p \frac{\partial P_n(x, \lambda)}{\partial x} \Big|_{x=d} = -S_p (P_n(d, \lambda) - P_{n0}) \quad (\text{II-29})$$

Où :

$P_n(x, \lambda)$: est la concentration des trous en fonction de la position et la longueur d'onde.

P_{n0} : est la densité de trous à l'équilibre thermique.

En résolvant l'équation en $P_n(x, \lambda)$ et en substituant dans la relation :

$$J_{pw}(\lambda) = qD_p \left. \frac{\partial p_n(x, \lambda)}{\partial x} \right|_{x=w} \quad (\text{II-30})$$

$$J_{pw}(\lambda) = \left[\frac{qL_p}{\alpha^2(\lambda)L_p^2 - 1} \right] \quad (\text{II-32})$$

$$\left[-L_p G'(W, \lambda) + \frac{\left[S_p' G(d, \lambda) + L_p G'(d, \lambda) \right] - \left[S_p' \cosh v_p + \sinh v_p \right] G(W, \lambda)}{S_p' \sinh v_p + \cosh v_p} \right] \quad \text{Où}$$

$$G'(x, \lambda) = \frac{\partial G(x, \lambda)}{\partial x}$$

$$S_p' = \frac{S_p}{(d_p / L_p)}$$

$$v_p = (d - W) / L_p$$

La densité du photocourant de court-circuit peut être évaluée maintenant, en utilisant les équations (II-22), (II-26) et (II-32)

Les calculs effectués dans le cadre de ce travail ont été accomplis en prenant pour le coefficient d'absorption du silicium qui varie en fonction de la longueur d'onde l'expression [29] :

$$\alpha(\lambda) = 0.526367 - 1.14425/\lambda + 0.585368/\lambda^2 + 0.039958/\lambda^3 (\mu\text{m}^{-1}) \quad (\text{II-33})$$

II.5. Efficacité de conversion de la cellule:

L'efficacité de conversion d'une cellule solaire où plusieurs mécanismes de transport de courant peuvent avoir lieu la caractéristique I (V) d'obscurité peut être représenté par l'expression:

$$I = \sum I_{j0} \left[\exp(\beta_j V) - 1 \right] \quad (\text{II-34})$$

Où :

I_{j0} : est le courant de saturation inverse associé au mécanisme de transport d'ordre j.

$\beta_j = q/n_jRT$ et n_j est une constante caractérisant une cellule donnée appelée coefficient d'idéalité.

La tension de circuit ouvert peut être déterminée à partir de la relation :

$$\sum I_{j0} \exp(\beta_j V_{oc}) = I_{sc} + \sum I_{j0} \quad (\text{II-35})$$

Où :

V_{oc} : la tension de circuit ouvert.

I_{sc} : Le courant de court circuit.

La puissance produite par une cellule en admettant une série de résistance négligeable est donnée par.

$$P = VI_{sc} - V \sum [I_{j0} (\exp(\beta_j V_{mp}) - 1)] \quad (\text{II-36})$$

Le point maximum de puissance est déterminé par :

$$\sum_j I_{j0} (1 + b_j V_{MP}) \exp(b_j V_{MP}) = I_{sc} + \sum_j I_{j0} \quad (\text{II-37})$$

$$I_{mp} = V_{mp} \sum_j b_j I_{j0} \exp(b_j V_{mp}) \quad (\text{II-38})$$

Où :

I_{mp} : le courant de sortie au point de puissance maximale

V_{mp} : La tension de sortie au point de puissance maximale

Le facteur de forme FF détermine la qualité de la cellule solaire est donné par.

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (\text{II-39})$$

L'efficacité de conversion est donnée par

$$\eta = \frac{(FF) V_{oc} I_{sc}}{pin} \quad (\text{II-40})$$

Où P_{in} est la puissance solaire incidente totale [29]

En utilisant les équations (II-34) et (II-40) on obtient

$$FF = \left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \right) \left[1 - \frac{\sum_j I_{j0} [\exp(\beta_j V_{oc} - 1)]}{\sum_j I_{j0} [\exp(\beta_j V_{oc} - 1)]} \right] \quad (II-41)$$

$$\eta = \frac{\left[V_{mp}^2 \sum_j \beta_j I_{j0} \exp(\beta_j V_{mp}) \right]}{P_{in}} \quad (II-42)$$

II.6. Principe de calcul

Pour modéliser les cellules solaires à base de structures MIS, nous avons élaboré un code de calcul sous Matlab pour déterminer les valeurs optimales des paramètres régissant le fonctionnement de ce type de cellules.

Pour pouvoir exploiter ce code de calcul, il faut tout d'abord l'alimenter avec les données de base nécessaires pour identifier les différents matériaux utilisés. Les grandeurs concernées sont : la mobilité des porteurs, les constantes diélectriques du semi-conducteur et l'isolant, la largeur de la bande interdite, la concentration intrinsèque à 300°K, la fonction de travail, la densité d'états de surface, l'épaisseur de l'isolant, le coefficient de diffusion des porteurs, la vitesse de recombinaison en surface S_p et le coefficient de réflexion.

Le code commence par le calcul de certains paramètres supplémentaires à partir des données de base.

Ensuite, on calcul les différentes composantes des courants d'obscurité.

Une fois les courants de saturation sont connus, on passe au calcul du photocourant et du courant de court-circuit par intégration numérique.

On utilise la technique d'itération de Newton Raphson pour résoudre les équations (II-35), (II-37), (II-38) pour trouver les paramètres de sortie de la cellule MIS (le courant et la tension de sortie de la cellule).

Enfin, le facteur de forme et le rendement de la cellule.

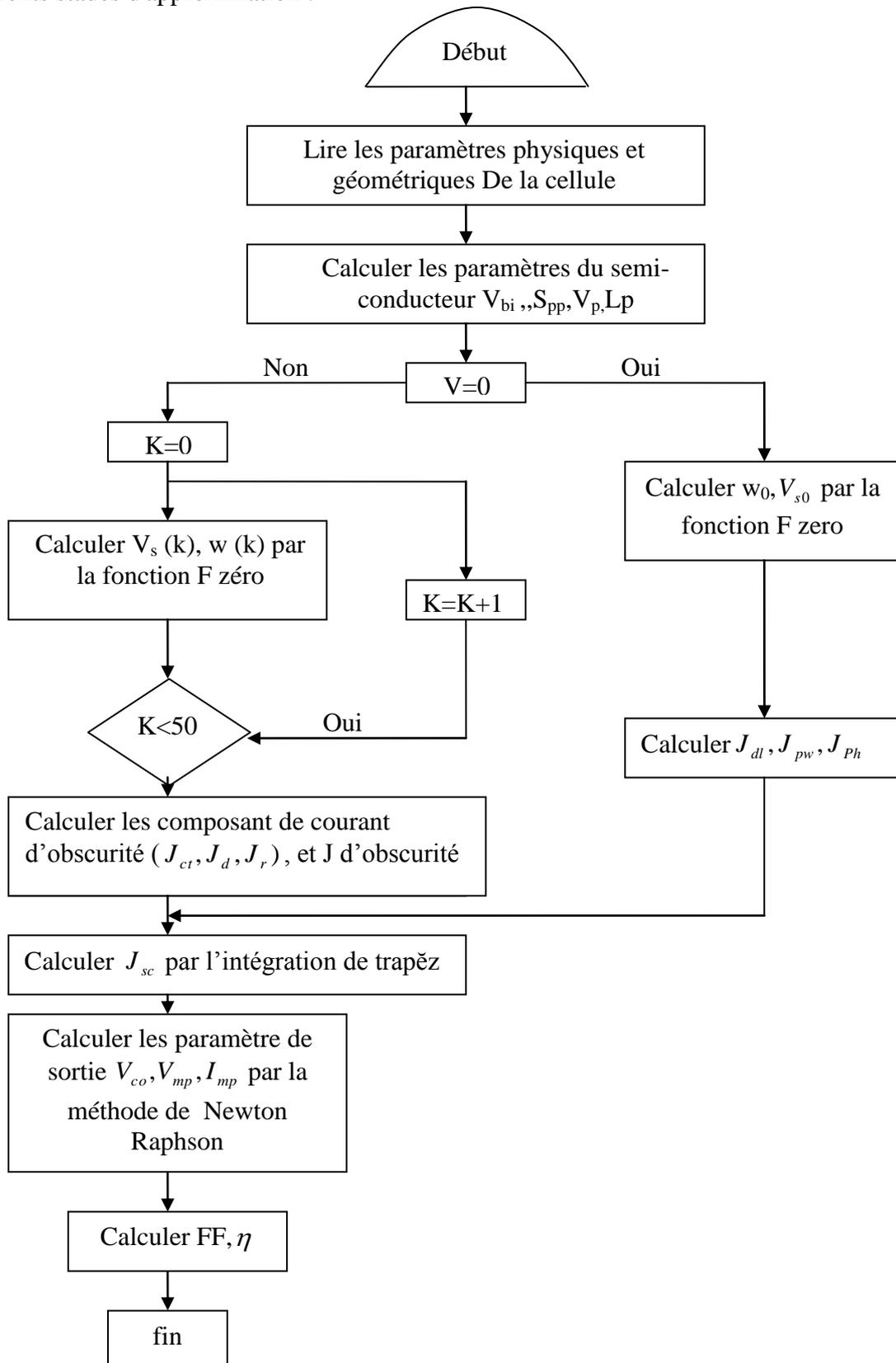
Notons qu'il est nécessaire dans chaque simulation de respecter quelques critères:

- le choix des gammes de valeurs des différents paramètres n'est pas aléatoire, elles doivent être réalisables par la technologie ;

- le bon choix des paramètres numériques.

II.7. L'organigramme de calcul

L'organigramme dans la figure ci-dessous donne le déroulement des calculs et les différents stades d'approximation :



II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé l'étude des propriétés électriques de la cellule solaire MIS. Nous avons commencé par le rassemblement des équations donnant les composantes du courant d'obscurité qui sont : le courant de diffusion, le courant de recombinaison, et le courant tunnel. Nous avons ensuite établi les expressions du photocourant et celles du point maximum de puissance qui permettent de calculer le courant de court circuit et la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement.

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on va s'intéresser à l'optimisation des paramètres d'une cellule solaire pour avoir un bon rendement. Habituellement, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule et l'épaisseur de la couche isolante, les niveaux et les profils de dopage, les propriétés de transport des porteurs de charge à savoir : la durée de vie, la mobilité, la vitesse de recombinaison en surface...etc.

Pour déterminer les valeurs optimales des différents paramètres qui donnent un rendement maximum, on doit passer essentiellement par l'étude des caractéristiques (J-V) pour déterminer les valeurs de facteurs caractérisant les cellules tels que le courant de court circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement.

La simulation numérique est couramment utilisée pour nous permettre d'étudier, les effets de ces paramètres sur le rendement d'une photopile MIS.

III-2-Méthodologie de travail

Pour simuler l'influence des différents paramètres, nous avons tout d'abord défini une cellule solaire de base avec un ensemble de paramètres fixés, puis nous avons fait varier ces paramètres un par un (les autres restants fixes) afin d'analyser leur influence sur les caractéristiques de la cellule solaire.

III-2-1- Présentation de la cellule

La structure étudiée est une cellule solaire de type MIS (Métal isolant semi-conducteur) dont le schéma de principe est illustré par la Fig. III.1.

Les paramètres de l'environnement et de la structure MIS retenus dans le cadre de cette étude sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Matériaux	Environnement	Données
Métal : Au Isolant : SiO ₂ Semi-conducteur : Si	T = 300 K Eclairement = AM1.5	Travail de sortie métal : $\phi_m=4.8$ eV Constante diélectrique silice : $\epsilon_{\text{SiO}_2}=3.9$ Epaisseur silice : $d_i=15\text{Å}$ Gap : $E_g=1.12$ eV Concentration intrinsèque : $n_i=1.45 \cdot 10^{16}$ cm ⁻³ Durée de vie : $\tau=1 \cdot 10^{-9}$ s Vitesse de recombinaison face arrière: $S_p=0$ m ² /s Concentration dopants : $N_D=1 \cdot 10^{21}$ m ⁻³ Epaisseur cellule: $d=25\mu\text{m}$

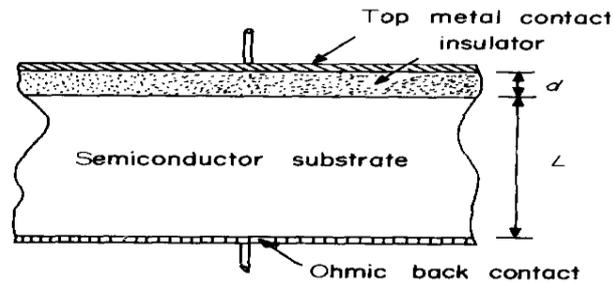


Fig. III.1 : Diagramme schématique d'une structure MIS [31]

III.2.2. Procédure des calculs

Les équations présentées dans le deuxième chapitre, ont été utilisées pour déterminer les caractéristiques électriques de la cellule solaire MIS avec les données résumées dans le tableau ci-dessus.

Les paramètres de simulation dans notre cas sont :

- L'épaisseur de l'isolant d_i ;
- La température T ;
- La vitesse de recombinaison S_p ;
- L'épaisseur de la cellule d ;
- La longueur de diffusion L_p ;
- La durée de vie τ ;
- Le dopage N_D ;
- La densité d'état de surface D_{ss} ;

Dans nos simulations, on fait varier un des paramètres précédents tandis que les autres paramètres sont maintenus constants.

Pour calculer les caractéristiques courant - tension, on suppose que les trous sur la surface de semi conducteur équilibré avec le métal tel que le niveau du quasi-fermi des trous est fixé au niveau de fermi du métal et que les quasi-niveaux de fermi sont plats dans toute la couche de déplétion [29].

Les caractéristiques $J(V)$ à l'obscurité fournissent également des renseignements sur les phénomènes de conduction dominants dans la cellule étudiée et les écarts entre les paramètres à l'obscurité et sous éclairage ; ce qui permet de mettre en évidence l'évolution des propriétés du dispositif[32].

III.3. Les caractéristiques électriques sous obscurité

Nous allons présenter, dans ce qui suit, les résultats de notre programme qui nous permet de calculer les paramètres d'une cellule solaire MIS sous obscurité.

Sur la Fig. III.2, on a présenté les différentes composantes du courant d'obscurité à savoir :

- Le courant Tunnel ;
- Le courant de diffusion ;
- Le courant de recombinaison.

On constate que, pour une épaisseur de l'isolant de l'ordre de 15\AA et pour une durée de vie des porteurs de charge minoritaires de l'ordre de $10^{-3}\mu\text{s}$, le mécanisme dominant est la diffusion, car le courant Tunnel et le courant de recombinaison sont sérieusement atténués. Cette réduction est due à l'insertion de la couche isolante pour le courant Tunnel et par la réduction de la zone de charge d'espace pour le courant de recombinaison.

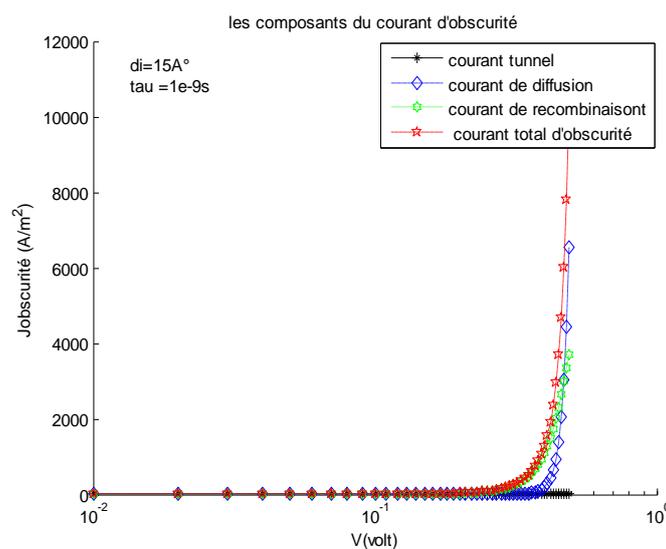


Fig. III.2 : les caractéristiques J(V) sous obscurité

Sur la Fig.III.3, on présente l'effet de la durée de vie des porteurs de charge minoritaires sur la caractéristique J(V). On constate que la dégradation de la durée de vie joue en faveur du courant d'obscurité.

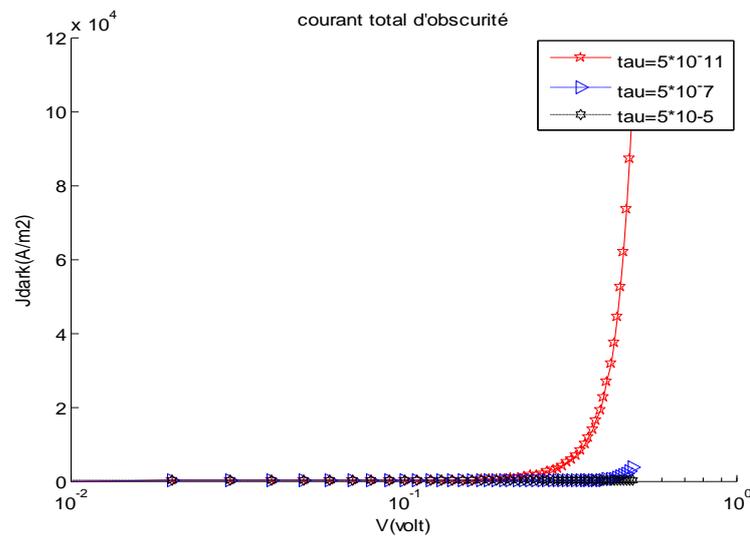


Fig.III.3 Effet de la durée de vie sur la caractéristique $J(V)$ d'une cellule solaire MIS sous obscurité

III .4. Les caractéristiques électriques sous éclairement

III.4.1. Caractéristique $J(V)$

La caractéristique $J(V)$ typique est représentée sur la Fig.III.4. Elle a été déterminée sur la base du modèle que nous avons exposé au chapitre II.

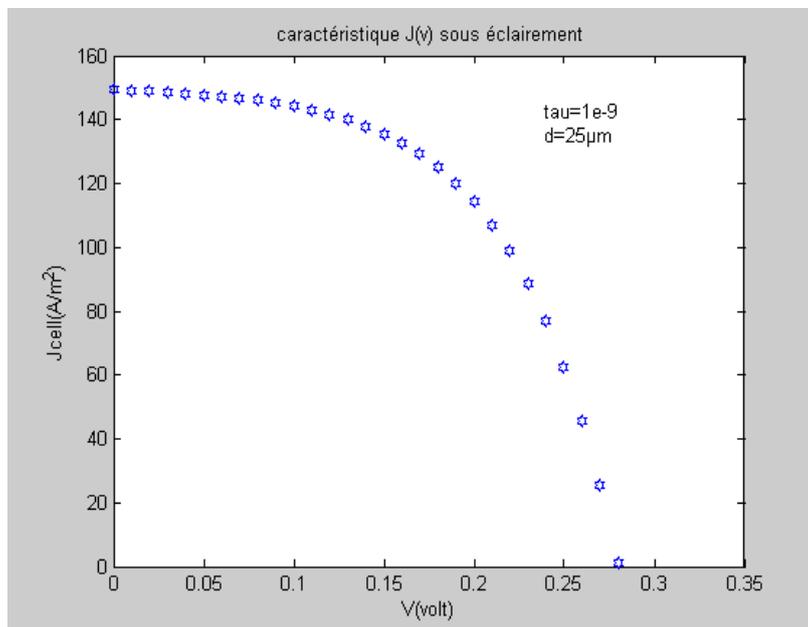


Fig.III.4 : Caractéristique $J(V)$ d'une cellule solaire MIS sous éclairement

III.4.2. Effet des différents paramètres sur la densité de courant de court circuit

La courbe de la Fig. III.5 illustre les variations de la densité de courant de court circuit en fonction de la longueur de diffusion en prenant comme paramètre l'épaisseur de la cellule et l'existence ou non du BSF (Back Surface Field=le champ sur la surface arrière). Un coup d'œil sur la courbe nous permet de déduire les remarques suivantes :

- La densité de courant de court circuit augmente rapidement avec la longueur de diffusion des porteurs minoritaires jusqu'à une valeur de l'ordre de l'épaisseur de la cellule puis il tend vers la saturation.
- L'existence du BSF augmente la densité de courant de court circuit.

L'augmentation du courant avec la longueur de diffusion, est due au fait que les porteurs créés peuvent diffuser et atteindre la région du champ interne, et par conséquent contribuent au photocourant. L'effet du BSF, peut être interprété par l'existence d'un champ interne dans cette zone, ce qui diminue la recombinaison sur la surface arrière et donc augmente le photocourant.

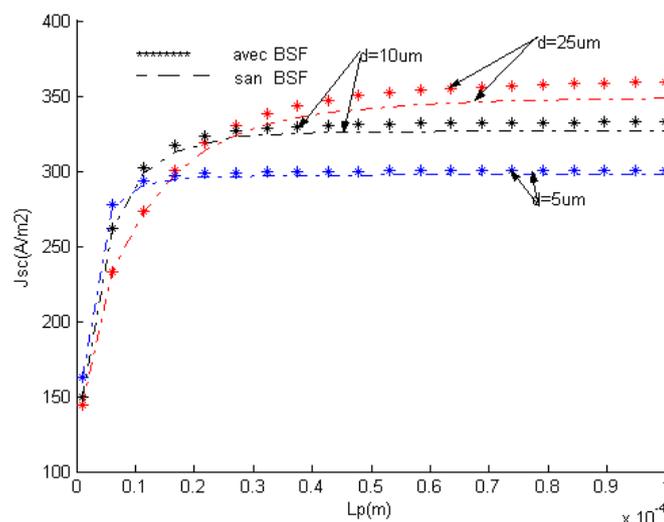


Fig.III.5 : Effet de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires sur le la densité de courant de

court circuit.

III.4.3. Effet de l'épaisseur de l'isolant sur la tension de circuit ouvert et le rendement

L'effet de l'épaisseur de l'isolant sur la tension de circuit ouvert et le rendement, en prenant comme paramètre la longueur de diffusion, sont illustré par les Fig.III.6 et III.7. On constate que l'augmentation de l'épaisseur de la couche isolante et de la longueur de diffusion conduit à une augmentation de la tension de circuit ouvert et du rendement, comme il a été démontré par [33, 34,35]. Ainsi, pour une longueur de diffusion donnée, la tension de circuit ouvert et le rendement tendent vers un palier dès que l'épaisseur de l'isolant est suffisamment épaisse pour réduire la contribution du courant tunnel au courant d'obscurité.

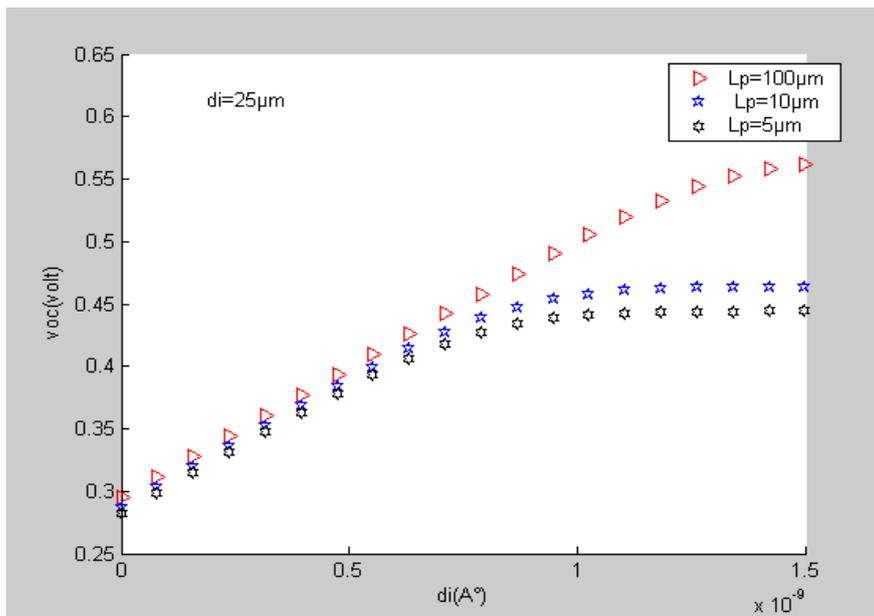


Fig. III.6 : Effet de l'épaisseur de l'isolant et de la longueur de diffusion sur la tension de circuit ouvert

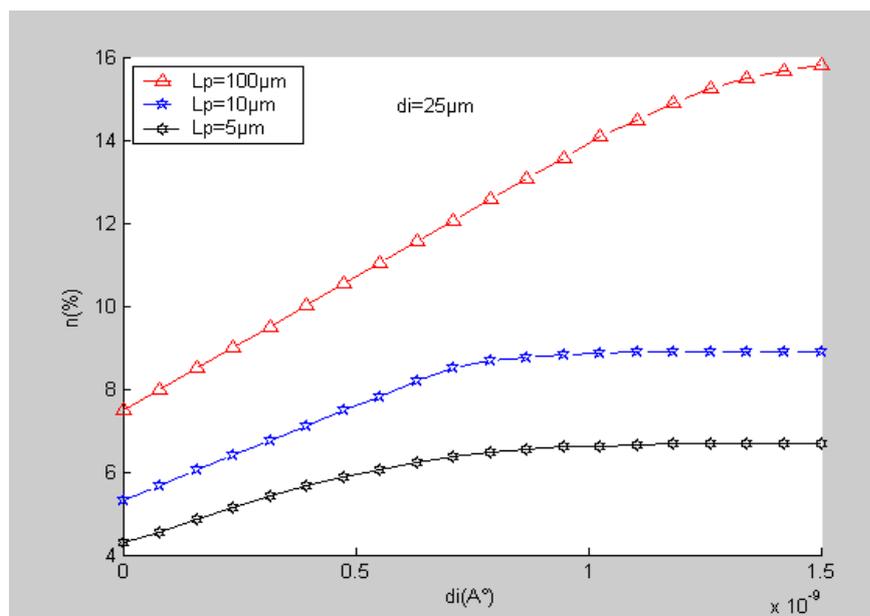


Fig. III.7 : Effet de l'épaisseur de l'isolant et de la longueur de diffusion sur le rendement.

III.4.4. L'effet de la couche BSF:

Le BSF (champ de surface arrière) est une zone fortement dopée sur la totalité de la face arrière des photopiles. La présence de ce champ conduit à une amélioration importante de toutes les caractéristiques de la cellule [29,33]. En effet, la présence de ce champ diminue la vitesse de recombinaison à la surface arrière, ce qui augmente le photocourant et réduit le courant d'obscurité par l'intermédiaire de la barrière de tension qu'il développe[18].

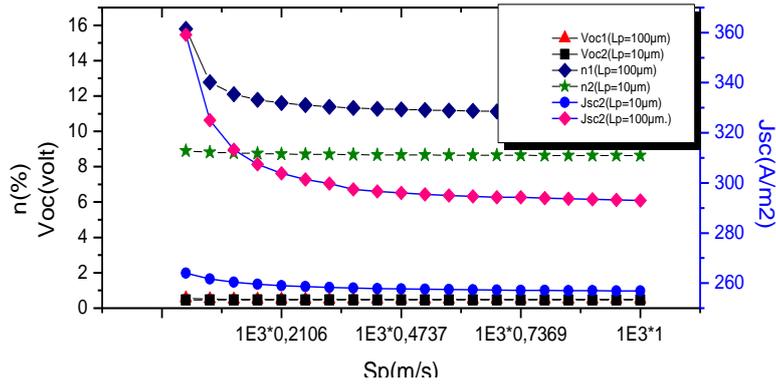


Fig. III.8 : l'effet de la variation de la vitesse de recombinaison sur le rendement, le courant de court circuit et la tension de circuit ouvert pour deux valeurs de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires.

III.4.5:L'effet de la variation de la longueur de diffusion:

La longueur de diffusion est un paramètre extrêmement influant sur le rendement des cellules solaires MIS. On constate que les trois paramètres de la cellule (le rendement, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert) dépendent fortement de la longueur de diffusion. Sur la Fig.III.9., on a représenté les variations de la tension de circuit ouvert et le rendement en fonction de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires en prenant comme paramètres la longueur du dispositif et la présence ou l'absence du BSF. Il est clair que les bons résultats sont obtenus lorsque la longueur de diffusion des porteurs minoritaires tend vers la longueur du dispositif.

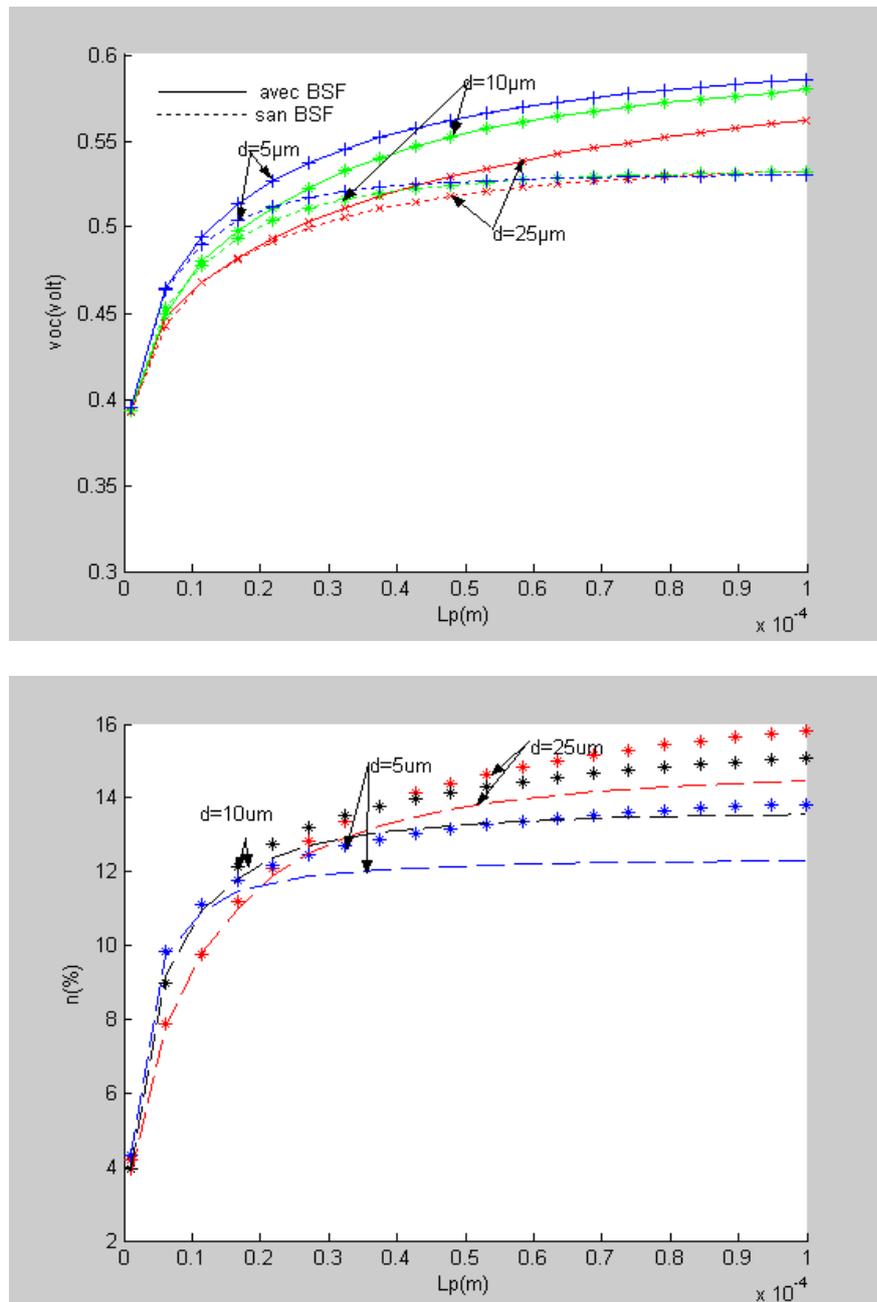


Fig. III.9. : L'effet de la longueur de diffusion et l'épaisseur de la cellule sur la tension de circuit ouvert et le rendement énergétique.

III.4.6. L'effet de la température sur les caractéristiques J (V) de la cellule solaire MIS

L'effet de la température sur les caractéristiques courant –tension sous éclairement et les autres paramètres principaux de la pile solaire de structure Au-SiO₂-Si a été étudié dans la gamme [0-40°C]. La température affecte la réponse des piles solaire MIS à travers l'effet Tunnel et les propriétés de transport. Les paramètres importants qui changent avec la température sont le gap énergétique, la concentration intrinsèque, la masse effective, la durée de vie des porteurs de

charge, leur mobilité électrique ainsi que leur constante de diffusion. La dépendance de ces paramètres de la température est résumée comme suit :

-Gap énergétique:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha \times T^2}{\beta + T} \quad \alpha = 4,73 \cdot 10^{-4} \text{ [ev / } ^\circ\text{k]}$$

$$\beta = 636 \text{ K pour le silicium}$$

$$E_g(0) = 1,17 \text{ [ev]}$$

Qui correspond à une faible diminution de la bande interdite avec la température T [37].

-La concentration intrinsèque:

L'expression de la concentration intrinsèque « ni » est donnée par [38]:

$$n_i(T) = \sqrt{N_c N_v} \times \exp\left(-\frac{E_g(T)}{2kT}\right)$$

$$N_c = 2 \times \left(\frac{2\pi kT m_e^*}{h^2}\right)^{3/2}$$

$$N_v = 2 \times \left(\frac{2\pi kT m_t^*}{h^2}\right)^{3/2}$$

Elle dépend fortement de la température à travers le terme exponentiel, ainsi que le produit des densités d'états effectives « $N_c \times N_v$ » qui est proportionnel à « T^3 ».

-La masse effective:

Les masses effectives varient en fonction de la température selon les deux lois [36]

$$m_e^*(T) = m_0 \times (1.045 + 4.5 \times 10^{-4} \times T)$$

$$m_t^*(T) = m_0 \times (0.523 + 1.4 \times 10^{-3} \times T - 1.48 \times 10^{-6} \times T^2)$$

Tel que $m_0 = 9.109 \times 10^{-31}$ [kg]

-Durée de vie des porteurs de charge :

Les durées de vie des électrons et des trous varient en fonction de la température selon la loi [37]

$$\tau_{n,p}(T) = \tau_{n,p}^0 \times \left(\frac{T}{300}\right)^\alpha$$

pour le silicium :

$$\alpha = -0.5$$

$$\tau_n^0 \approx \tau_p^0 \approx 10^{-6}(\text{s})$$

-La mobilité:

Les mobilités des électrons et trous peuvent être approximées par [38] :

$$\mu_n = 1350 \left(\frac{T}{300}\right)^{-3}$$

$$\mu_p = 480 \left(\frac{T}{300}\right)^{-3}$$

-La constante de diffusion

Pour la constant de diffusion, on peut déduire ses variations à partir de celles des mobilités [38]

$$D_{n,p}(T) = \frac{kT}{q} \times \mu_{e,t}$$

III.4.6.1. Effet de la température sur la caractéristique J(V) sous obscurité

Nous allons présenter dans ce qui suit les résultats de notre programme. La Fig.10 montre les caractéristiques J(V) du courant d'obscurité de la structure MIS en fonction de la température pour une épaisseur de l'isolant fixe et égale à 15Å°. La relation donnant le courant d'obscurité est donnée par l'expression.

$$I_{dark} = \sum_{i=1}^2 I_{0i} \exp\left(\frac{qV}{nRT}\right)$$

Avec n=2 pour le courant de recombinaison et n=1 pour le courant de diffusion (tension intermédiaire).

Les résultats obtenus pour le courant d'obscurité sont semblables à ceux d'une jonction PN où l'augmentation de la température conduit à une augmentation du courant d'obscurité [25,39].

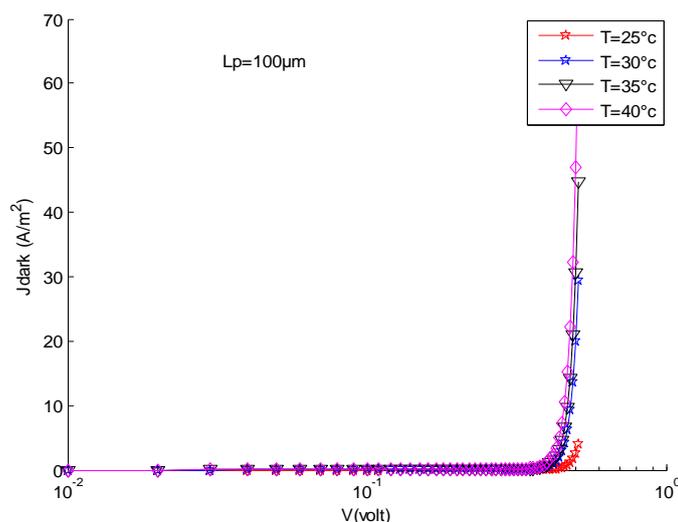


Fig.III.10. Effet de la température sur le courant d’obscurité

III.4.6.2. Effet de la température sur les paramètres d’une cellule solaire MIS sous éclairement

La dépendance de la caractéristique courant-tension de la température est mesurée sous l’éclairément (AM1.5). Les résultats de la modélisation des différents paramètres de la cellule solaire en fonction de la température sous le spectre d’éclairément sont représentés dans le Tableau (2) ci-dessous.

Cellule solaire MIS : Au-SiO ₂ -Si-N d=25µm, N _D =1.0e21	Variations des paramètres en fonction de la température
T1=25 [°C]	Lp= 1.1312e-006[m] Eg= 1.1225 ni=5.2995e+015 tau =9.9666e-010[s] Vbi = 0.5282 [v] Dp =0.0013[m2/s]
T2=30 [°C]	Lp = 1.1454e-006 [m] Eg = 1.1225 ni =7.9863e+015 tau =1.0050e-009 [s] Vbi =0.5232 [v] Dp =0.0013 [m2/s]
T3=35 [°C]	Lp = 1.1596e-006 Eg =1.1225 [ev] ni =1.1883e+016 tau = 1.0132e-009 [s] Vbi = 0.5181[v] Dp = 0.0013 [m2/s]
T4=40 [°C]	Lp=1.1737e-006Eg = 1.1212 ni =1.7470e+016 Vbi =0.5131 Dp = 0.0013 tau =1.0214e-009

Tableau(2) - Variations des paramètres de la cellule en fonction de la température

La caractéristique J (V) sous éclairement est illustrée par la Fig.III.11. On constate que la température a un effet important notamment au voisinage de la tension de circuit ouvert. Le Tableau (3) et les Fig.III.12-15 illustrent bien les variations des différents paramètres photovoltaïques de la cellule.

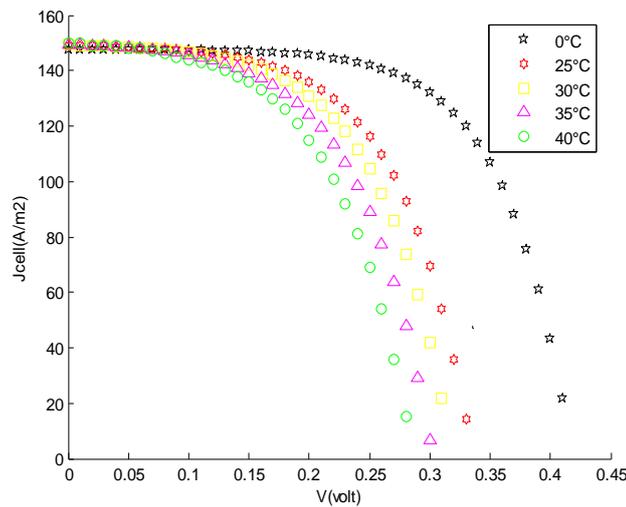


Fig.III.11. l'effet de la température sur les caractéristiques (I-V)

T (°C)	25	30	35	40
Jsc (A/m ²)	149.0518	149.2975	149.5377	149.7726
Voc (V)	0.5207	0.5070	0.4931	0.4792
FF	0.7252	0.7161	0.69560	0.6554
η	5.63	5.43	5.13	4.7

Tableau(3) : Variations des paramètres photovoltaïques de la cellule en fonction de la température sous éclairements AM1.5

La fig.III.12 montre bien que la tension de circuit ouvert diminue quand la température augmente. Cet effet est dû à la diminution du gap du matériau semi-conducteur. Cette diminution du gap, joue par contre en faveur du courant de court circuit qui augmente légèrement avec la température comme l'illustre la Fig.III.13.

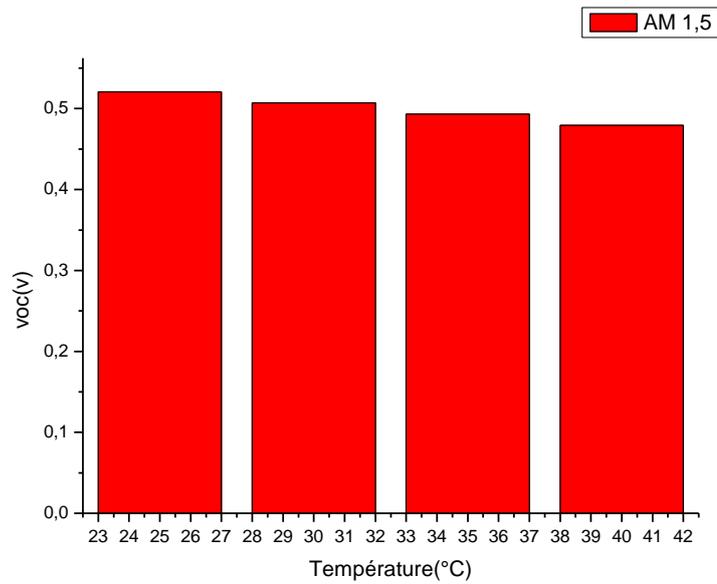


Fig.III.12. Effet de la température sur la tension de circuit ouvert

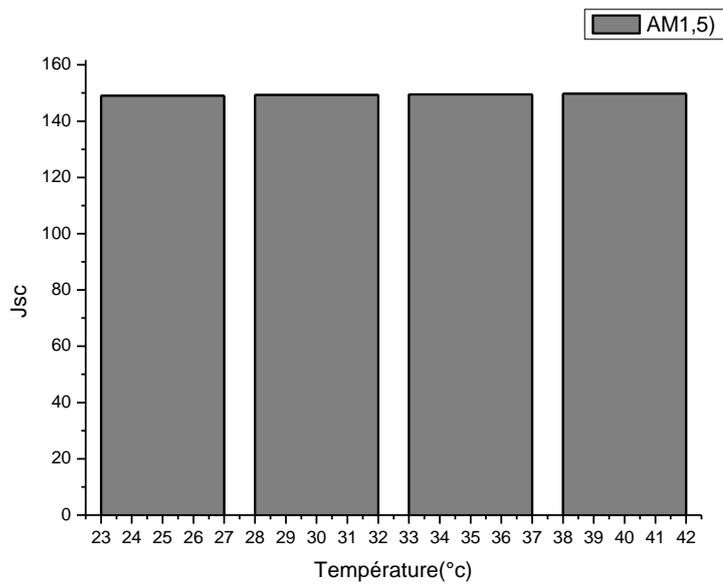


Fig.III.13.: Effet de la température sur le courant de court circuit

Pour Le facteur de forme, on constate, d'après la Fig.III.14, qu'il subit une réduction lorsque la température augmente, ce qui est due à la décroissance de la tension de circuit ouvert qui domine sur la légère croissance du courant de court circuit.

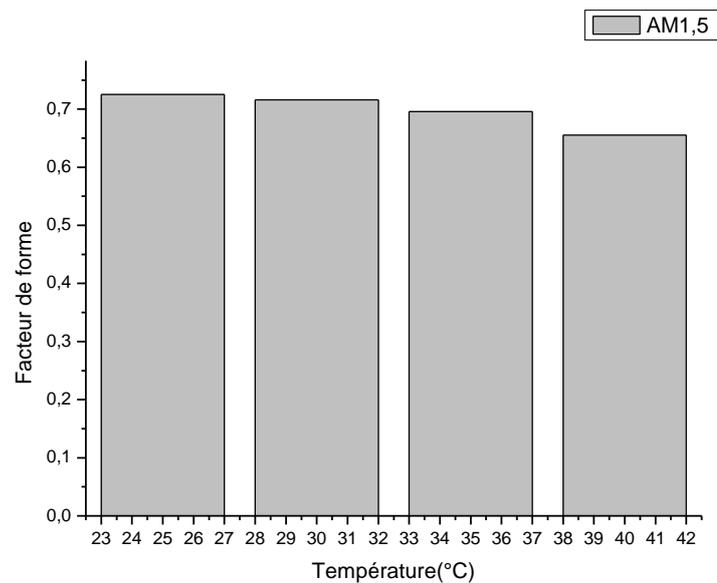


Fig.III.14 : Effet de la température sur le facteur de forme

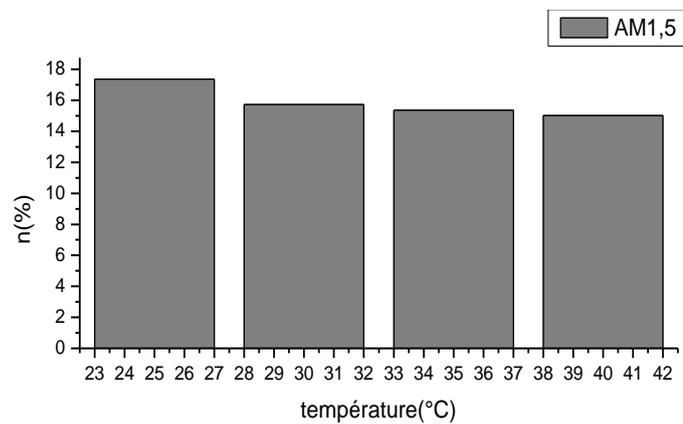


Fig.III.15 : Effet de la température sur le rendement énergétique-

Grosso modo, l'augmentation de la température provoque une dégradation des performances de la cellule solaire. Ce qui se reflète bien sur le rendement, Fig.III.15, qui est le paramètre principal d'une cellule solaire, ces résultats est tout à fait semblable a celle qui présenté par [39].

III.4.7. Effet du dopage sur les caractéristiques J(V) de la cellule solaire MIS

Le dopage, par son niveau et la forme de son profil, peut affecter les paramètres d'une cellule solaire dans l'obscurité où sous éclairement.

III.4.7.1. Effet du dopage sur les caractéristiques J(V) sous obscurité : Le dopage influe sur les propriétés de transport des porteurs de charges comme la durée de vie, la mobilité et la constante de diffusion [40]. Ainsi, les caractéristiques électriques se trouvent affectées comme il est illustré par la Fig.III.16 où on constate l'augmentation du courant avec le dopage ; ce qui est en cohérence avec le résultat obtenu dans le paragraphe III.3. En effet, l'augmentation du dopage se traduit par une dégradation de la durée de vie donc augmentation du courant d'obscurité.

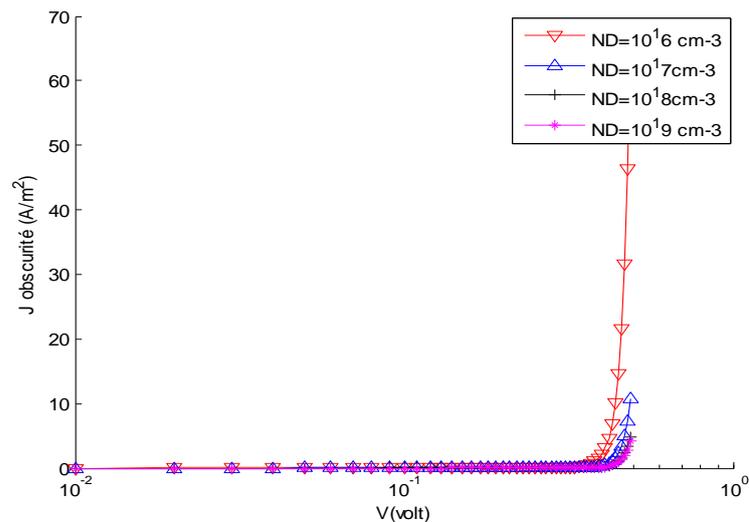


Fig.III.16 : Effet de du dopage sur la caractéristique J(V) sous obscurité

III.4.7.2. Effet du dopage sur les caractéristiques J(V) sous éclaircissement : Sous éclaircissement, l'augmentation du dopage se traduit par la diminution du courant de court circuit et l'augmentation de la tension de circuit ouvert (Fig. III.18) [25].

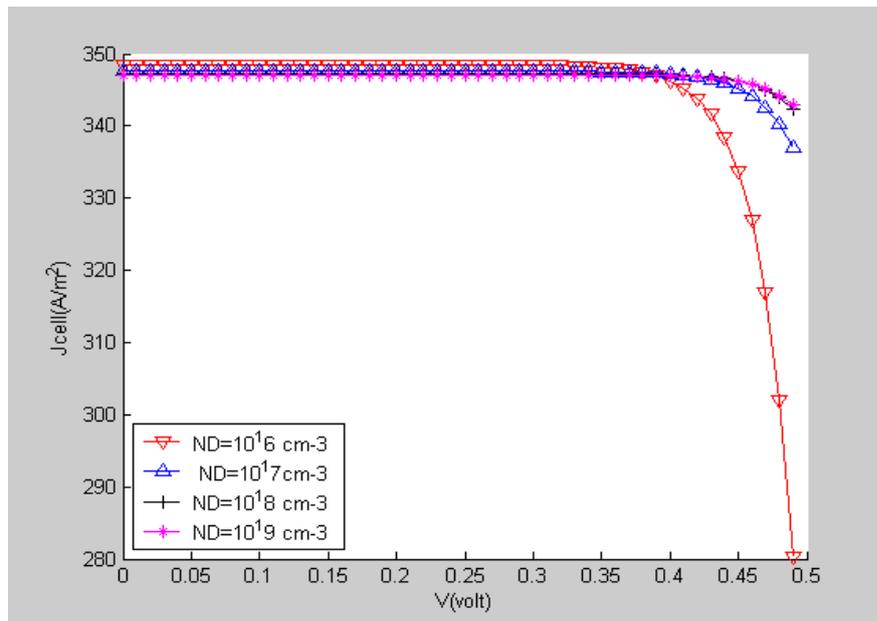
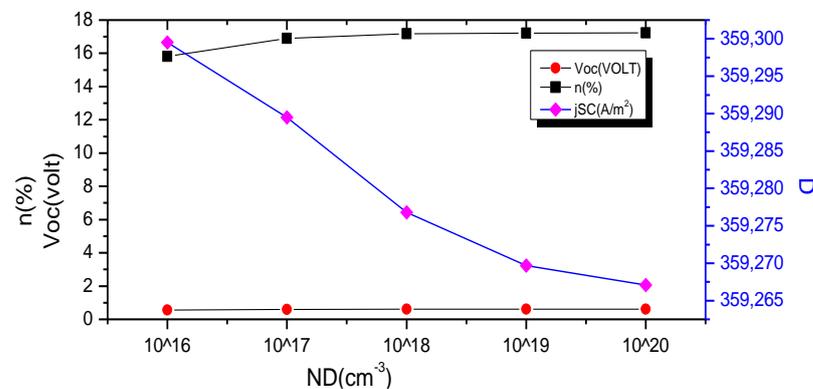


Fig.III.17 : Effet de du dopage sur la caractéristique J(V) sous éclairciment



Fig(III-18) l'effet de variation de dopage sur le rendement et le courant de court circuit

III.4.8. Effet de la densité d'états de surface sur les caractéristiques J(V) de la cellule solaire MIS

La cellule solaire à base d'une structure MIS est constituée de l'empilement de trois matériaux : le semi-conducteur, l'isolant et le métal. Il y a donc deux interfaces. L'interface qui influe beaucoup sur le comportement électrique de cette structure est le contact entre l'isolant et le semi-conducteur. Cette importance est due au rôle joué par les états de surface dans le transfert de charges entre le métal et le semi-conducteur.

III.4.8.1. Effet de la densité d'états de surface sur les caractéristiques J(V) sous

obscurité : L'effet de la densité d'états de surface se traduit, comme il est illustré sur la Fig.III.18 par une augmentation du courant d'obscurité notamment lorsque la densité d'états va au-delà de $10^{12} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ [41].

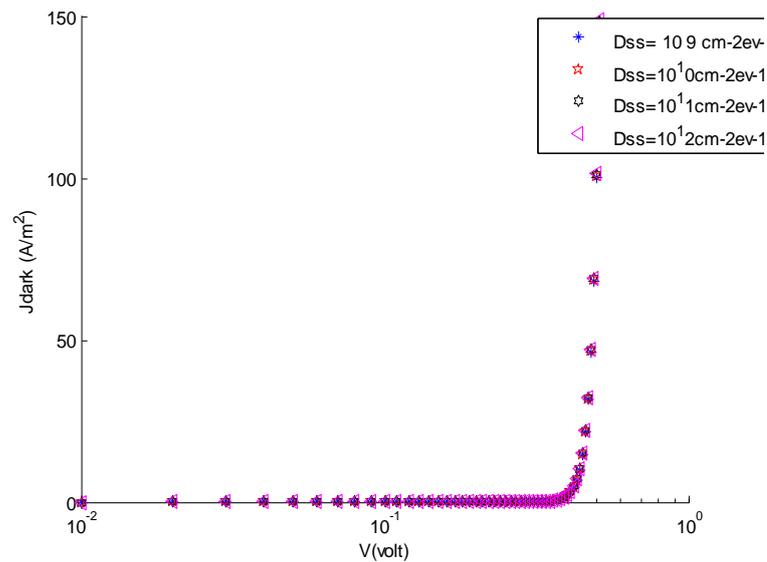


Fig.III.19 : Effet de la densité d'états de surface sur la caractéristique J(V) sous obscurité

III.4.8.2. Effet de la densité d'états de surface sur les caractéristiques J(V) sous éclaircissement: Là aussi, l'augmentation de la densité d'états de surface a un effet négatif sur la caractéristique J(V) notamment au niveau de la tension de circuit ouvert[41].

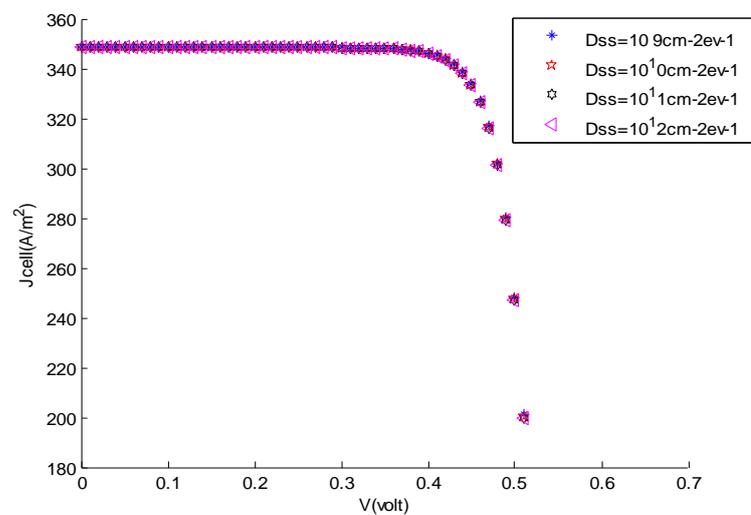


Fig.III.20 : Effet de la densité d'états de surface sur la caractéristique J(V) sous éclaircissement

Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'influence des paramètres des cellules solaires MIS sur le rendement à l'aide d'une simulation numérique. Le but de cette étude a été d'optimiser les paramètres physiques et géométriques des cellules afin d'obtenir un rendement maximum.

Les résultats obtenus montrent que les piles solaires d'une couche mince de silicium à base de structure MIS avec la couche BSF peuvent donner des efficacités de conversion allant de 15 à 18% en utilisant des cellules avec une épaisseur située dans la gamme 15-25 μm , une longueur de diffusion allant de 10 à 100 μm et une épaisseur de l'isolant de l'ordre de 15 \AA . Les résultats obtenus montrent aussi que le rendement de la cellule diminue progressivement avec la température et le dopage.

Conclusion générale :

Ce travail porte essentiellement sur la modélisation des caractéristiques électriques des cellules solaires à base de structures MIS et l'effet des différents paramètres physiques, technologiques et géométriques de la cellule.

Nous avons fait, dans une première étape, le tour d'horizon des points concernant le mécanisme de conversion responsable de la production des charge dans une cellule solaire, les matériaux étudiés, la technologie de fabrication et les structures utilisées pour la conversion photovoltaïque.

Dans la deuxième étape, on s'est intéressé aux modèles théoriques permettant de décrire les caractéristiques électriques de la cellule solaire MIS sous obscurité et sous éclaircissement.

Pour optimiser les performances de la cellule solaire étudiée, on s'est fixé pour but de retrouver, pour chaque région de la cellule, les paramètres technologiques donnant les meilleures caractéristiques de sortie et par conséquent la meilleure efficacité de conversion. Pour ce faire, nous avons procédé à la résolution numérique des équations non-linéaires régissant le fonctionnement de la cellule étudiée.

Dans la troisième étape, on s'est basé sur les résultats de la simulation numérique pour extraire les valeurs optimales des différents paramètres affectant le rendement de la cellule MIS. Les résultats obtenus montrent que les cellules solaires MIS à base du silicium peuvent donner des efficacités de conversion acceptables pour des applications terrestres lorsqu'on choisit les paramètres de la cellule comme suit :

- Cellule avec une couche de BSF ;
- Epaisseur de la cellule située dans la gamme 5-25 μm ;
- Epaisseur de la couche isolatrice de l'ordre de 15 \AA °;
- Longueur de diffusion entre 10 et 100 μm .

Dans la dernière étape, nous avons étudié l'effet de la température, du dopage et de la densité des états de surface sur les caractéristiques courant-tension et l'efficacité de conversion de la cellule. Les résultats obtenus ont montré que l'effet d'accroissement de la température, du dopage et de la densité d'états de surface sur la cellule solaire se traduit par la dégradation des performances, c.à.d. la chute du rendement énergétique observé.

Bibliographie

- [1]-**Hespul** «Guide de l'utilisateur de toit solaire photovoltaïque», version française- Décembre 2002 p (03).
- [2]-**Olivier GERGAUD** «Modélisations énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur» Thèse de doctorat. L'école normale supérieure de cachan. 2002 p (17)
- [3]- **Jimmy Royer, Tomas Djiako, Eric Schiler, Bacar Sadasy.** «Le pompage photovoltaïque». Université d'Ottawa (1998)
- [4]- **Markus Hepp** «Light Trapping in Quantum Well Solar cells Grown on Patterned substrate», Master of Science in semiconductor, university of London (1998)
- [5]- **Nichiporuk Oleksiy** « simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïque à contacts arrières interdigités», l'institut nationale des sciences appliquées de Lyon pour obtenir le grade docteur (2005)
- [6]-**Anne Labouret, Michel Villoz.** «Energie solaire photovoltaïque». Dunod.Paris (2003).
- [7]-**Roman Maciejko.** «Optoélectronique presse internationales polytechniques» (2002).
- [8]-**E.Rosencher, B.Vinter.** Optoélectronique.Thomson.CSF.Masson (1977).
- [9]-**Mohamed Bouaouina.** « Contribution à l'étude et à l'optimisation des performances des cellules solaire à base de GaAs et de Si». Mémoire de Magister en physique énergétique université de constantine (2001).
- [10]-**O.Bogdankévitch, S. Darzek, P.Elisséev.** «Les lasers à semi-conducteurs». Edition Mir Moscou.
- [11]- **. Bonneaux Déodat, David Lucien, Dumas Adrien, Germain Simon,** « étude des cellules photovoltaïques Olympiades de la physique». (2004).
- [12]-**Yenn Pankow,** «Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension». Doctorat de l'école nationale supérieure d'art et Métiers. Lille. (2004)
- [13]- **Adolf Goetzberger, Christopher Hebling**
« Photovoltaic Matériels, Past, Présent, Futer».solar energy materials et solar cells.vol (62). (2000).
- [14]- Sandia national laboratory, « Recherche et industrie photovoltaïque aux Etats-Unis. » Juin (2006)
- [15]- **M.A.K.LODHI,** « A Hybrid system of solar photovoltaic, Thermal and Hydrogen», Texas Tech University, hydrogen energy, vol.20.N6 (1995).
- [16]- **Olivia Mah NSPRI,** « Fundamentals of photovoltaic Materials »National solar power research institute Inc. (98).

- [17]- **Chenoufi Hakim**, «la technique de diffusion, optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire». Université de Batna (2005).
- [18]- **Bruno-Thuillier**. «Caractérisation structural des contacts ohmique réalisées a partir d'encre métalliques sur cellules photovoltaïque en silicium multicristalin». l'institut nationale des sciences appliquées de Lyon pour obtenir le grade docteur (2001).
- [19]- **Benaïcha Mouna**, « Etude des matériaux semi-conducteurs III-V application à la conversion photovoltaïque», mémoire de magister en physique. UNV.Batna.
- [20]- **Bouzide Fayçal**. « Effet de la température sur les propriétés électriques d'une photopile» , mémoire de magister en physique Université de Batna (2004).
- [21]-**Z.Abada**. «Etude des cellules photovoltaïques à base de GaIn_p et GaAs a haut rendement», mémoire de magister en électronique. UNV.constantine. (2000).
- [22]-**José Maria Roman**. «State of the art of III-V Solar cells. Fabrication technologies, Device designs and application. Advanced photovoltaic cell design» (2004).
- [23]-**Lamia semra**. «Contribution à l'étude des tandems Al GaAs/Si». Mémoire de magister; d'électronique Université de Constantine (1998).
- [24]-**S.M.Sze**. «Physics of semiconductor devices». John Wiley and sons. (1981).
- [25]- **R.sinsh, M.A.Green, K.Rajkanan** , «Review of conductor –isolator-semiconductor (CIS) solar cells», solar cells, 3(1981).
- [26]- **André Vapaille et René Castagné**. «Dispositif et circuit intégrés Semi-conducteurs», Dunod, 1987.
- [27]- **Gilles Horowitz**, «Organic field effect transistors»Adv.Mater.1998, 10, No,5, (1998).
- [28]- **S.M.Sze**. physic of semiconductor devices THERD Edition
- [29]- **A.H.M.Shousha**, « performance characteristics of thin film MIS solar cells » solar et wind technology, vol (6), N (6), (1989).
- [30]- **Juh Tzeng Lue**, «The barrier height change and current transport phenomena whith the presence of interfacial layer in MIS schottky barrier solar cells». solid state electronics, vol(23),pp,263-264,1980
- [31]-**M.A.Green, F.d.King and Shewchen**. «Minority carrier MIS diodes and their application to electron- and photovoltaic energy conversion-I ». Solid state Electronics, vol, 17, (1974)
- [32] **D Laplaze et I. Youm** « Modélisation d'une cellule photovoltaïque II Détermination des paramètres à partir de la caractéristique courant -tension à l'obscurité»solar cells, 14, 1985
- [33]- **A.H.M. Shousha, M.A. EL-KHOSHEIRY**«Computer Simulation of Amorphous MIS Solar Cells» Renewable E nergy, Vol.11,N4,pp. 419-420,(1997)

- [34]-**A.H.M. Shousha**, «Effects of double- exponential current-voltage characteristics on the performance of solar cells», solar cells, 5 (1981).
- [35]-**Mohamed Yehya Doghish ,Fat Duen, Ho**, «A comprehensive Analytical Model for Metal- isolator-Semiconductor (MIS) ». A Solar Cell Application, vol, 40, NO, 8, AUGUST (1993)
- [36] **Christopher M Snowden** « Semiconductor Device Modelling » Springer Verlag (1989)
- [37] **Siegfried Selberherr** «Analysis and simulation of semiconductor devices » Springer Verlag (1984).
- [38] **Donald A.Neamen** « Semiconductors Physics and devices Basic principles» Third Edition, 2003
- [39] **W.M.R. DIVIGALPITIYA**. «Temperature dependence of the photovoltaic characteristics of Silicon MIS solar cells». Solar Energy Materials 18(1988)
- [40]- **Fayçal Djeflal**, « Mise au point d'un dispositif expérimental assisté par PC permettant d'étudier les propriétés de transport des porteurs de charge dans les semi-conducteurs », Mémoire de magistère, Université de Batna, 2001.
- [41]-**M.Abdel-Gawed El Sayed-Shaban Abdel-Rady** «Effect of interface states on conversion efficiency-of non uniformly doped MIS solar cell». (2006).