

11/530.031

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Université de Guelma
Faculté des Mathématiques et de l'Informatique et des Sciences de la Matière
Département des Sciences de la Matière

Mémoire de fin d'étude
2^{ème} année master



Spécialité : PHYSIQUE DE LA MATIERE CONDENSEE

Présenté par :

Athmania walid

**ETUDE COMPARATIVE DU RENDEMENT QUANTIQUE AUX
CELLULES SOLAIRES TEXTURISEES**

Sous la Direction de :
Dr. Hamel abdelouahab

Juin 2014





Dédicaces

*À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre ,,,
À cet source de tendresse, de patience et de générosité,,,*

Ce travail modeste est dédié :

À ma chère mère ;

À la mémoire de mon père ;

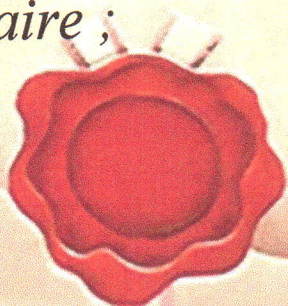
À ma femme qui a toujours était à mes cotés,

À tous mes proches de la famille Athmania, et plus

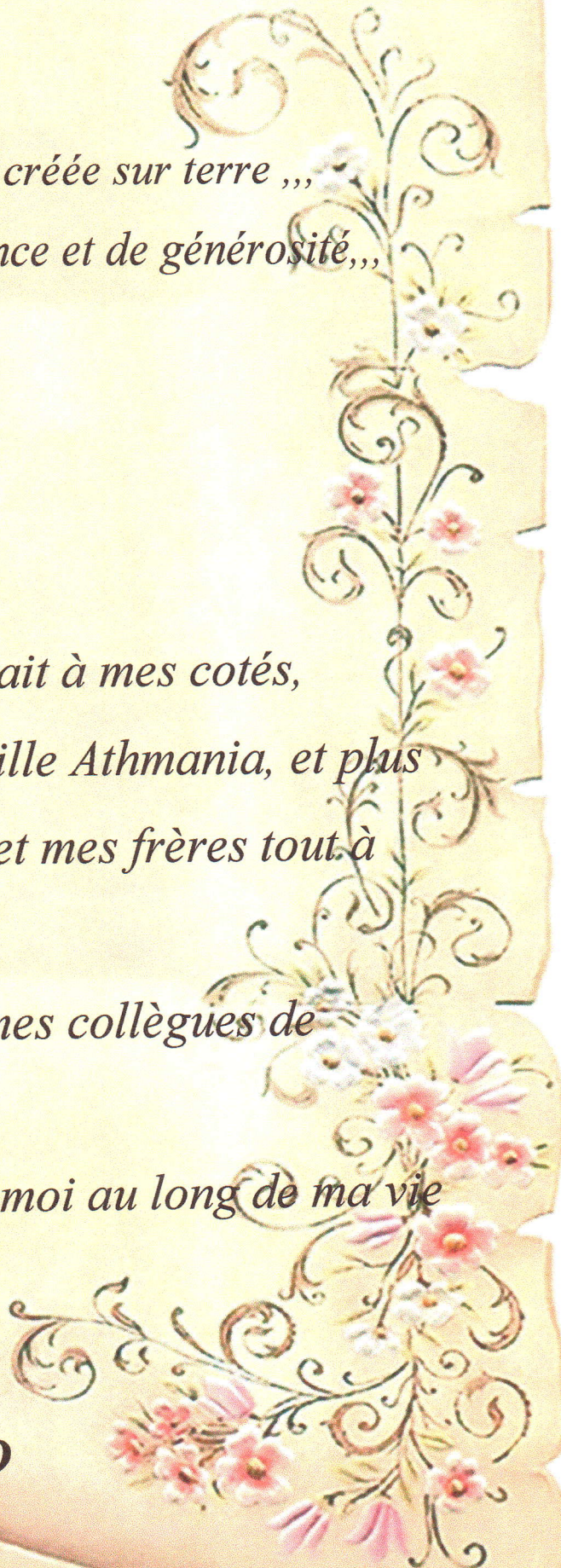
*Particulièrement, mes sœurs et mes frères tout à
son nom.*

*À tous mes chers amis et mes collègues de
l'Université de Guelma ;*

*Et à tous ce qui ont enseigné moi au long de ma vie
scolaire ;*



WALID



Résumé

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus prometteuse et la plus puissante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque (PV) est obtenue par transformation directe de la lumière du soleil en électricité en moyen de cellules (PV).

Les cellules photovoltaïques sont les constituants des panneaux solaires. C'est une énergie nouvelle et propre, ce sont leurs principaux avantages et c'est peut-être un bon moyen contre la pollution qui est souvent la conséquence d'une production d'énergie.

Dans ce travail nous proposons contribution concrète pour les surfaces texturisées des cellules solaires, nous avons élaboré un modèle qui offre la possibilité aux rayons solaires incidents d'entrer dans le matériau plusieurs fois (quatre fois au lieu de trois réflexions).

Nous avons donc étudié les propriétés photovoltaïques (absorbance, coefficient d'absorption, et rendement quantique)

ملخص

الطاقة الشمسية هي المصدر الاساسي لطاقة واكبر قوة بين الطاقات المتجددة يتم انشاء الطاقة الفوتو ضوئية عن طريق التحويل المباشر لاشعة الشمس الى كهرباء بواسطة الخلايا الفوتو ضوئية.

الخلايا الفوتو ضوئية هي التي تؤلف لنا الالواح الشمسية وهي طاقة جديدة و مميزة كما لا تحدث اي تلوث اذ ان لها ايجابيات كبيرة خاصة انتاج الطاقة.

في هذا العمل قمنا بتقديم مفهوم شامل حول طريقة تشكيل اسطح الخلايا الشمسية حيث اخترنا النموذج الذي يسمح للشمع العارض (المنعكس) بالدخول في المادة عدة مرات (اربع مرات بدلا من ثلاث كما كان سابقا)

ومن هنا قمنا بدراسة وحساب مردود وخواص الخلايا الفوتو ضوئية كمعامل الامتصاص الامتصاصية و المردود الكمي.

Abstract

Solar energy is the most promising and powerful energy source among renewable energy. photovoltaic electricity is obtained by direct transformation of the sunlight into electricity by means of photovoltaic cells.

It is well that interest in solar energy in increasing this type of energy is not only appreciated for its ecological qualities but also for the convenience that it gives to its user.

The photovoltaic performance of solar cells must be more optimized in order to obtain a higher efficiency. In this work we investigate the possibility of increasing the photon absorption by the cell. Previous studies based on multiple solar ray reflections on textured surface, have managed to three reflections. In this work we show that it is possible to obtain up to 4 reflections.

Notation Latines
Symbole
Unité

Désignation

Unité

J	la densité de courant	$A.m^{-2}$
J_p	la densité de trou	$A.m^{-2}$
J_n	la densité des électrons	$A.m^{-2}$
σ	Conductivité électrique	$(\Omega.m)^{-1}$
q	charge élémentaire	C
n	concentration des électrons	cm^{-3}
p	concentration des trous	cm^{-3}
ρ	la résistivité électrique	$(\Omega.m)$
V	la vitesse moyenne des porteurs	$m.s^{-2}$
E	Énergie du photon	e V
C	vitesse de la lumière	$m.s^{-1}$
h	Constante de Planck	e V
K	Constante de Boltzmann	$J.k^{-1}$
T	Température	K
v	vitesse dans le milieu étudié	$(m.s^{-1})$
D_n	Le constante de diffusion des électrons	$(cm^2 s^{-1})$
D_p	le constante de diffusion des trous	$(cm^2 s^{-1})$
D	Coefficient de diffusion du matériau	$m.s^{-2}$
L_D	Longueur de diffusion	m
I_o	Courant de saturation en inverse de la diode	A
I_{cc}	Courant de court-circuit de la diode	A
I_o	Courant d'obscurité	A

I_{ph}	Photo courant	A
V	Tension aux bornes de la jonction	volt
I_S	Courant de saturation	A
Q	Le facteur de qualité	sans
N	Facteur de non idéalité de la jonction	sans
V_T	potentielle thermodynamique	volt
R_p	résistance parallèle	Ω
R_s	résistance série	Ω
V_{oc}	tension de circuit ouvert	volt
V_m	tension maximum	A
I_m	Courant maximum	A
SR	Réponse spectrale	sans
P_{inc}	Puissance maximum	$W.m^{-2}$
FF	facteur de forme de la cellule	%

Caractères Grecs

Symbole	Désignation	Unité
α	coefficient d'absorption	cm^{-1}
τ	durée de vie des porteurs minoritaires	s
r	coefficient de réflexion	sans
$\square$	rendement	%
λ	longueur d'onde	μm

Sommaire

Introduction générale	
Chapitre 1 Théorie générale des semi- conducteurs	a
I-1- Introduction	
I-2- définition	01
I-3- Structure électronique des semi conducteurs	02
I-4- L'interaction photon/semi conducteur	02
I- 5-Les semi-conducteurs intrinsèques	03
I-6- Semi-conducteurs dopés ou extrinsèques	05
I-6-1-Dopage de type N	05
I-6-2-Dopage de type P	06
I -7-La jonction PN	06
I-8-Semi-conducteur comme une cellule solaire	07
I-8-1-L'effet photovoltaïque	07
I-9-Dopage de cellule solaire	07
I-9-1- Le dopage de type n (négatif)	07
I-9-2-Le dopage de type p (positif)	07
I-10- Conclusion	08
Chapitre 2 Conversion photovoltaïque	09
II-1- Introduction	10
II-2-Définition	11
II-3-Les différents types d énergies renouvelables	11
II-3-1-Énergie hydraulique	11
II-3-2-L'énergie de la biomasse	11
II-3-3- L'énergie de la géothermie	11
II-3-4- L'énergie éolienne	11
II-3-5- L'énergie solaire	11
II-4-Energie solaire	11
II-5-Rayonnement solaire et conversion d'énergie	11
II-5-1 -Le rayonnement solaire	11
II-6- Systèmes de production d'énergie solaire	13
II-7- Notions préliminaires sur le rayonnement solaire	14

Sommaire

II-8- Les cellules solaires photovoltaïques	15
II-8- 1- Description de cellule	15
II-9- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	17
II-10- Fonctionnement de la cellule photovoltaïque	17
II-11- Nature de silicium	18
II-12- La fabrication des cellules photovoltaïques	19
II-13- Obtention des wafers photovoltaïques	19
II-14- Technologie d'une cellule photovoltaïque	20
II-14-1- Silicium monocristallin	20
II-14-2- Silicium poly cristallin	20
II-14-3- Silicium amorphe	20
II-15- Conclusion	21
Chapitre 3 Propriétés photovoltaïques d'une cellule photovoltaïque texturisée	22
III-1- Introduction	23
III-2- Système photovoltaïque	24
III -2-1- Production d'énergie	24
III -2-2- Contrôle d'énergie	24
III -2-3- La partie utilisation	24
III -3 -Paramètres des cellules photovoltaïques	25
III -4- Les types des cellules solaires	25
III -4-1- Cellule photovoltaïque idéal	25
III -4-2- Cellule photovoltaïque réel	26
III - 5 -Les Avantages des systèmes photovoltaïques	27
III – 6 -Notion générale sur l'interaction rayonnement solaire avec semi conducteur	28
III – 6-1- Emission	28
III – 6-2- Loi de Planck	28
III-7- Réflexion	31
III-7-1- Réflexion spéculaire	31
III-7-2- Réflexion diffuse	32
III-7-3- Réflexion de volume	32
III-7-4- Absorption	33
III- 7 -5 -Transmission	33
III-7 -6 -Réfraction	34

Sommaire

III-8-Texturisation	34
III-9-Les cellules solaires texturisées	35
III-10-La surface texturée sous forme de pyramide	37
III-11-Les propriétés photovoltaïques	37
III-11-1-L'absorbance	37
III-11-2-Le rendement quantique	40
III-12- Conclusion	43
Conclusion générale	44
Référence	45

Listes des figures

Listes des figures

Chapitre 1

Théorie générale des semi- conducteurs

Figure (1-1) les structures des bandes d'énergies.....	03
Figure (1-2): Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect.....	04
Figure (1-3): Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde.....	05
Figure (1-4): semi-conducteur intrinsèque.....	05
Figure (1-5-a) : semi-conducteur de type.....	06
Figure (1-5-b): semi-conducteur de type P.....	06
Figure (1-6): la jonction PN.....	07

Chapitre 2

Conversion photovoltaïque

Figure (2- 1): Rayonnement solaire transmis à la terre.....	12
Figure (2-2): Schéma indiquant le nombre d'air masse AM y en fonction de la position géographique.....	13
Figure(2-3): Spectre AM 1,5 du rayonnement solaire.....	13
Figure (2-4) : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 [11]. Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence.....	15
Figure :(2.5-a) : Description de cellule.....	16
Figure :(2.5-b) : Description de cellule.....	16
Figure (2-6) : Structure (a) et diagramme de bande (b) d'une cellule photovoltaïque Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respect.....	18

Chapitre 3

Propriétés photovoltaïques d'une cellule photovoltaïque texturisée

Figure (3-1) : Eléments d'un système photovoltaïque.....	24
Figure (3-2) : Création de pair électron trous par photo excitation	25
Figure (3-3) : Modèle de cellule photovoltaïque idéal.....	25
Figure (3-4) : Modèle de la cellule photovoltaïque réel.....	26

Listes des figures

Figure (3-5): La loi de Planck décrit la répartition spectrale de l'énergie émise par un corps noir en fonction de sa température.....	29
Figure (3-6): Luminances spectrales comparées d'un corps noir et d'un corps gris à une température T donnée.	31
Figure (3-7) : Réflexion spéculaire.....	32
Figure (3-8) : Réflexion diffuse. L'indicatrice de luminance apparaît en pointillés.....	32
Figure (3-9) : Réflexion de volume.....	33
Figure (3-10) : Phénomène de réfraction.....	34
Figure (3-11) : Schéma comparatif des phénomènes de réflexion sur surfaces plane et texturée. I est l'intensité lumineuse incidente, R est le coefficient de réflexion et T celui de transmission.	35
Figure (3-12): Composition d'une cellule photovoltaïque.....	35
Figure (3-13) : images optiques et MEB de la surface de cellules solaires poly-Si irradié par une seule exposition du laser focalisé faisceau de nanoseconde (10 ns) laser. L'énergie de l'impulsion 0,5 mJ; 15 000 impulsions.....	36
Figure (3-14) : images MEB de poly-Si la surface de la cellule solaire irradiés par 3 interférence des faisceaux laser. Période était de 600 nm. L'énergie de l'impulsion était de 0,35 mJ.	36
Figure (3-15) : images MEB de poly-Si la surface de la cellule solaire non traité et traités par ps-LBIA (Laser et processus: 60 ps, 375 pJ @ 4KHZ, 532 nm 500 impulsion, les interférences 4 faisceaux, période de 2.5 μm).	36
Figure (3-16) : les cellules solaires texturisées sous forme des pyramides.....	37
Figure (3-17): Comparaison de la surface normale et surfaces texturées avec deux et trois et quatre réflexions. "N" est l'intensité de la lumière incidente, «r» est le coefficient de réflexion, et "T" de la transmission.	38
Figure (3-18): L'absorbance A en fonction de coefficient de réflexion.....	39
Figure (3-19) : le rendement quantique en fonction de coefficient de réflexion. ($l_n=100\mu\text{m}$)....	40
Figure (3-20) le rendement quantique en fonction de coefficient de réflexion. ($l_n=50\mu\text{m}$)....	41
Figure (3-21) : le rendement quantique en fonction de coefficient d'absorption. ($l_n=100\mu\text{m}$ et 50 μm)	42

Introduction générale

L'énergie a été depuis l'antiquité le moteur de l'activité humaine, elle joue un rôle très important dans la vie quotidienne et dans le développement des nations.

Selon les besoins plusieurs formes d'énergies sont apparues au fur et à mesure du développement de la civilisation humaine. Généralement ces formes proviennent des sources d'énergie fossiles telles que le charbon, le pétrole, le gaz naturel et l'uranium.

L'épuisement et la pollution provoquée par ces sources ainsi que la crise énergétique des années soixante-dix, amènent les pays qui ont de grands besoins d'énergie à se tourner vers des sources d'énergies renouvelables telles que le soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la géothermie.

Parmi ces sources d'énergie on trouve le soleil, qui est contrairement aux autres sources d'énergies renouvelables, abondante et propre, d'autre part annuellement elle fournit à la terre une énergie supérieure à celle de la consommation mondiale.

L'électricité est l'une des formes non polluantes et silencieuses de conversion de l'énergie solaire, elle se produit au moyen d'un dispositif de conversion appelée « Cellule solaire » basé sur un effet dit « Effet photovoltaïque ».

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient.

La modélisation d'une cellule solaire est l'outil performant qui nous permettra de lier les caractéristiques de cette cellule avec les propriétés du matériau et la technologie de fabrication afin d'améliorer les performances de la cellule [1].

Ce travail est organisé comme suit :

- Dans le premier chapitre : on fait appel aux notions générales sur les semi-conducteurs et l'interaction photon/semi conducteur et puis l'application comme une cellule solaire.
- deuxième chapitre ,nous décrivons les différents types des énergies renouvelables et le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques.
- Dans le dernier chapitre nous allons d'abord énoncer sur les cellules solaires texturisées et en fin les propriétés photovoltaïques telle que , le coefficient de réflexion , le coefficient d'absorption et le rendement quantique et nous présentons et discutons les résultats.

Chapitre :1

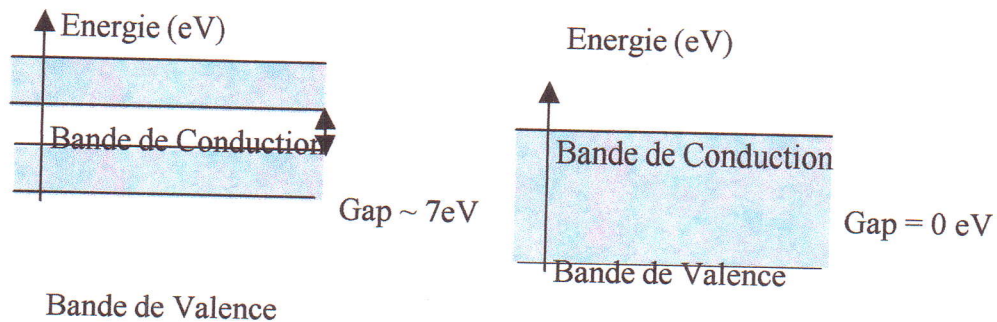
Théorie générale des semi- conducteurs

I-1- Introduction :

Ce chapitre présent les bases indispensables à compréhension du sujet .Nous aborderons ainsi en premier lieu quelque notions sur les différents types des semi-conducteurs, Nous décrivons ensuite la jonction P-N, puis en passe a l'application de cette jonction sur la cellule solaire, et enfin nous allons faire un aperçu au sujet de l'interaction photon solaire avec semi-conducteur.

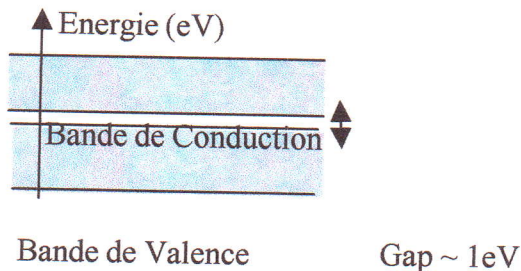
Théorie générale des semi- conducteurs

capables de passer de la bande de valence à la bande de conduction, et de circuler dans le matériau.



Bandes d'énergies pour un isolant

Bandes d'énergies pour un conducteur



Bandes d'énergies pour un semi-conducteur

Figure (1-1) les structures des bandes d'énergies.

I-4- L'interaction photon/semi conducteur :

L'écart entre la bande de valence et de conduction, ou *gap*, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La figure(1-2) présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des k , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (cf. figure (1-2(a))). Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires, tels que le Ga As, beaucoup utilisés en optoélectronique [4-5].

Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable

Théorie générale des semi-conducteurs

absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (cf. figure (1-2(b))). Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de $1,12 \text{ eV}$ à 300 K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut $3,4 \text{ eV}$ (soit 365 nm) [6]

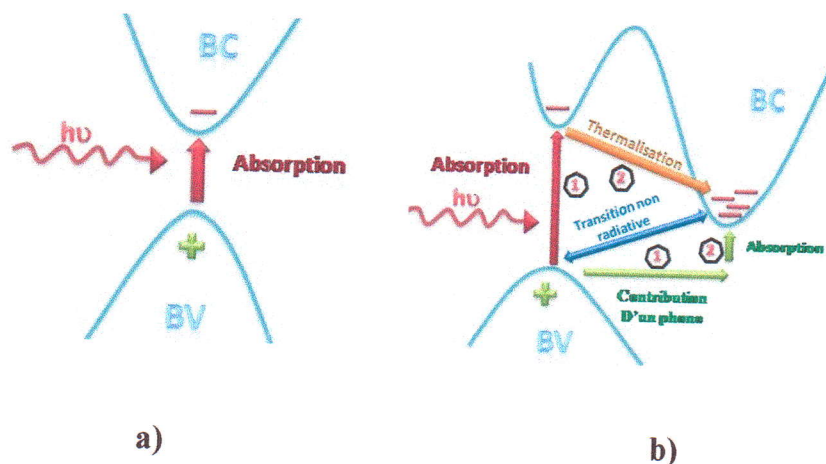


Figure (1-2): Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect [6].

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La figure (1-3) nous donne celui du silicium. Nous constatons que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm , la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 Å du matériau. Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition. L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.

Théorie générale des semi-conducteurs

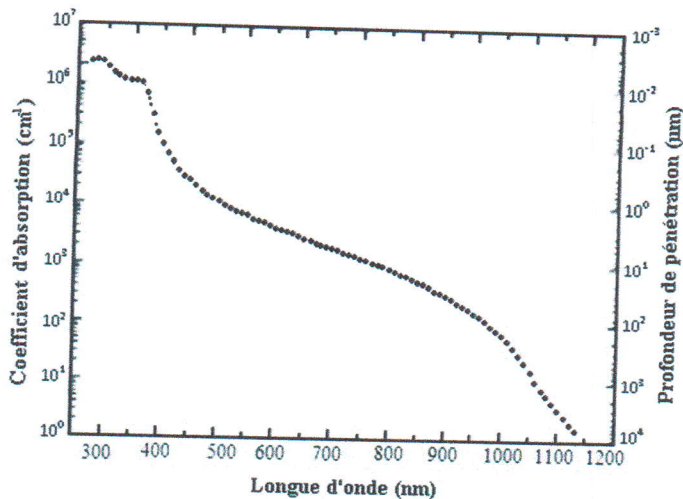


Figure (1-3): Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde [7].

I- 5-Les semi-conducteurs intrinsèques :

~ Isolants à 0 K et faiblement conducteurs à 300 K

~ Conductivité qui augmente avec la température T (augmentation du nombre d'électrons libres)

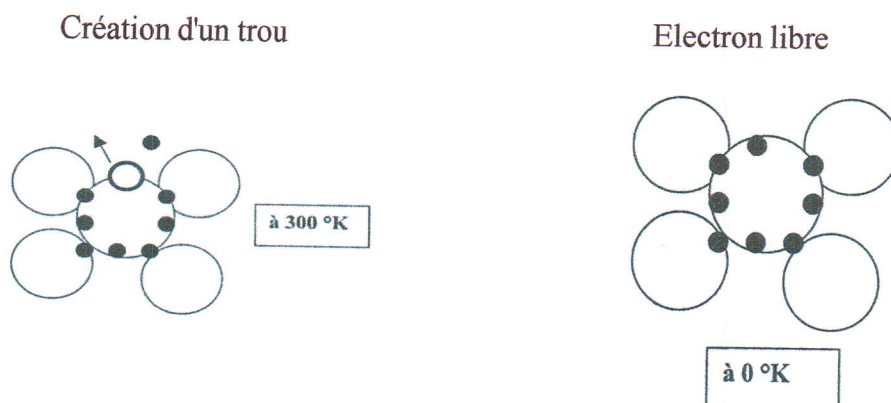


Figure (1-4): semi-conducteur intrinsèque.

I-6- Semi-conducteurs dopés ou extrinsèques :

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

I-6-1-Dopage de type N :

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre

Théorie générale des semi- conducteurs

Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition.

Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombinaison [8].

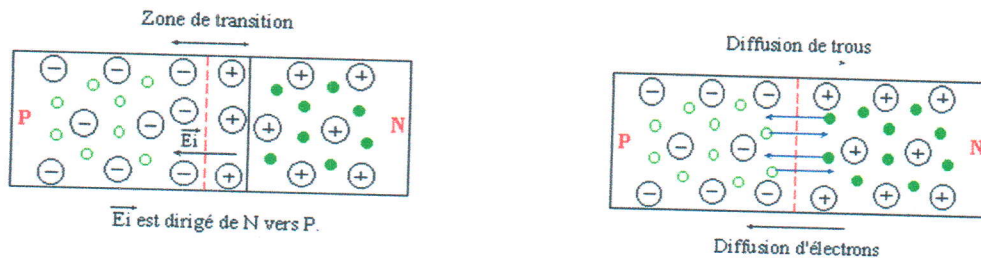


Figure (1-6): la jonction PN.

I-8-Semi-conducteur comme une cellule solaire :

I-8-1-L'effet photovoltaïque :

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les photons constituant la lumière « attaquent » les atomes exposés au rayonnement. Les électrons des couches électroniques supérieures, appelés aussi électrons de valence ont tendance à être arracher.

Dans les cellules PV, une partie des électrons ne revient pas à son état initial et les électrons « arrachés » créent une tension électrique continue et faible [9].

I-9-Dopage de cellule solaire :

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

I-9-1- Le dopage de type n (négatif) :

Consiste à introduire dans la structure cristalline semi- conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si). Dans un matériau de type n, on augmente fortement la concentration en électrons libres.

I-9-2-Le dopage de type p (positif) :

Utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire.

Le bore (B) est le dopant de type p le plus couramment utilisé pour le silicium.

Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type n et type p) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libres (électrons et trous), un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque [10].

I-10- CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons présenté les bases indispensables à compréhension des semi- conducteurs, dans lequel nous avons présenté la structure de bande des deux principaux semi-conducteurs. Puis nous avons abordé les mécanismes d'interactions photon solaire avec les matériaux semi-conducteurs.

Enfin, Nous avons ensuite expliqué un semi-conducteur comme une cellule solaire et le dopage de cellule solaire.

Chapitre :2

Conversion photovoltaïque

II-1- Introduction :

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est proportionnel à la puissance lumineuse incidente. La cellule photovoltaïque délivre une tension continue.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et séléniure d'indium ($\text{CuIn}(\text{Se})_2$ ou $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$), tellurure de cadmium (CdTe), etc. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée. [11].

II-2-Définition:

Les énergies renouvelables fournies par le soleil, le vent, l'eau, la chaleur de la terre ou les matières organiques, n'engendrent pas ou peu d'émissions polluantes et de déchets. Ce sont des énergies considérées comme inépuisables, par différence avec les énergies fossiles dont les ressources s'amenuisent. Les énergies renouvelables permettent ainsi de répondre à une partie des besoins en énergie (chaleur, électricité et carburant), avec un moindre impact sur l'environnement [12].

II-3-Les différents types d'énergies renouvelables :

II-3-1-Énergie hydraulique

II-3-2-L'énergie de la biomasse

II-3-3- L'énergie de la géothermie

II-3-4- L'énergie éolienne

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés

- L'énergie solaire thermique;
- L'énergie solaire photovoltaïque;
- l'énergie solaire passive:

II-3-5- L'énergie solaire :

II-4-Energie solaire :

II-5-Rayonnement solaire et conversion d'énergie :

II-5-1 -Le rayonnement solaire :

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la température superficielle du soleil (environ 5800 K), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 μm) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0,75 et jusqu'à 4 μm environ). L'énergie véhiculée par ce rayonnement, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairement de 340 W.m^{-2} Fig. (2-1). Un bilan énergétique

montre que, sur cette quantité d'éclairement qu'apporte le soleil au système terre+atmosphère, environ 100 W.m^{-2} sont réfléchis vers l'espace ; seul le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la terre.

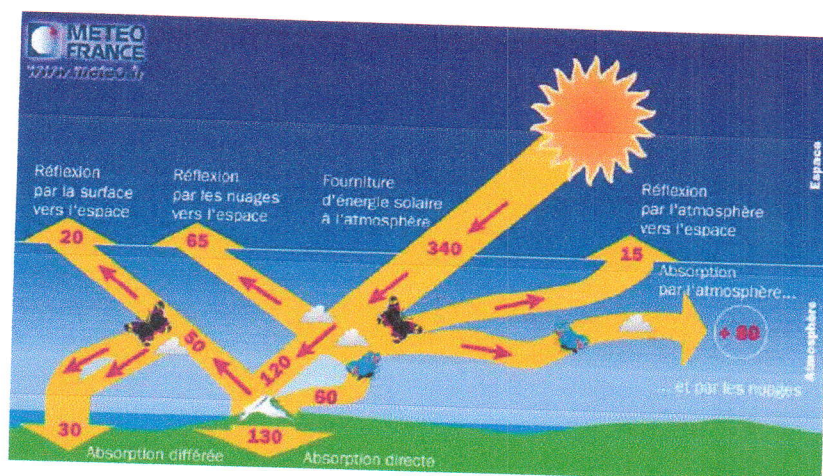


Figure (2- 1): Rayonnement solaire transmis à la terre [13].

La figure (2-1), publiée par Météo France, montre que près du quart de cet éclairement incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère : pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages (65 W.m^{-2}), le reste (15 W.m^{-2}) étant dû aux autres constituants atmosphériques comme les gaz et aérosols. Il reste donc 180 W.m^{-2} qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont les deux tiers (120 W.m^{-2}) se font directement, le reste (60 W.m^{-2}) s'effectuant par diffusion vers le bas. Intervient alors un processus complexe d'interaction entre la diffusion vers le bas et la réflexion. Sur les 180 W.m^{-2} incidents, la surface terrestre, qui possède un albédo moyen élevé, devrait renvoyer dans l'atmosphère environ 50 W.m^{-2} . En fait, la majeure partie de l'éclairement qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt ou tard et s'ajoute partiellement aux ($180 - 50 = 130 \text{ W.m}^{-2}$) de rayonnement solaire non réfléchis à son contact. Bien que l'absorption du rayonnement solaire soit un phénomène continu, on peut simplifier la compréhension du processus précédent en supposant que les 50 W.m^{-2} réfléchis par la surface du globe se répartissent entre 20 W.m^{-2} définitivement renvoyés vers l'espace interplanétaire et 30 W.m^{-2} qui reviennent à la surface terrestre après diffusion différée vers le bas. Cette énergie s'ajoute aux 130 W.m^{-2} initialement non réfléchis pour constituer approximativement les 160 W.m^{-2} qu'absorbe la surface terrestre. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons lumineux, on introduit la notion du nombre de masse d'air AM_y , y étant défini par :

$$y \approx \frac{1}{\sin(\Theta)} \dots\dots\dots (2-1)$$

Représentant l'élévation du soleil sur l'horizon voir figure (2-2) On définit ainsi les conditions AM1 quand le soleil est au zénith et AM2 quand le soleil est à 30° au-dessus de l'horizon. La condition hors atmosphère est représentée par la notation AM0.

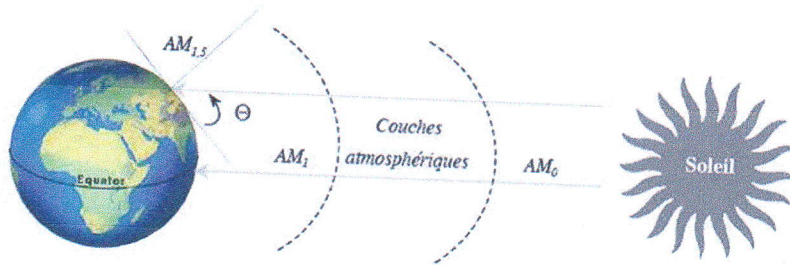


Figure (2-2): Schéma indiquant le nombre d'air masse AM_y en fonction de la position géographique.

La condition AM 1,5 est satisfaite lorsque le soleil est à 45° au-dessus de l'horizon. Elle est caractérisée par la distribution spectrale représentée sur la figure (2-3) avec un flux solaire de 1000 W.m^{-2} . La norme internationale choisie correspond à un éclairement de 1000 W/m^2 pour une traversée d'atmosphère AM1,5 [14].

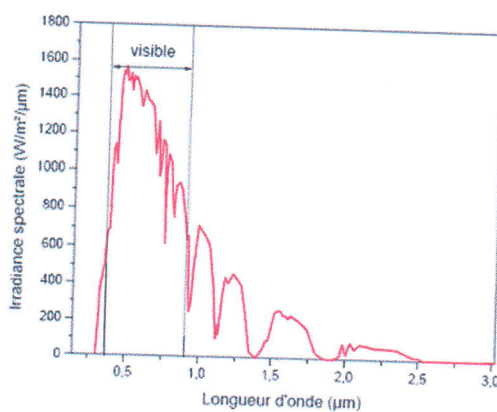


Figure (2-3): Spectre AM 1,5 du rayonnement solaire.

II-6- Systèmes de production d'énergie solaire :

Les systèmes de production d'énergie solaire ont un coût proportionnel quasi nul : une fois l'installation de l'appareil effectuée, l'énergie est produite par le Soleil, ce qui ne coûte rien. Il faut cependant tenir compte des coûts d'investissement et de l'entretien de l'appareil.

L'usage de panneaux solaires thermiques se justifie pour produire de l'eau chaude sanitaire à moindre coût. Une fois l'installation réalisée, l'entretien est très peu coûteux et permet de faire des économies substantielles de combustible fossile ou d'électricité.

En revanche, pour le solaire photovoltaïque, le coût de l'installation est assez élevé, bien que la recherche progresse dans ce domaine. Plusieurs pays (comme la France et l'Allemagne) ont donc mis en place des systèmes d'incitation financière (notamment fiscale : crédit d'impôt) à l'installation de panneaux solaires. En France, le crédit d'impôt de l'État est complété selon les régions et les départements par des aides financières qui s'appliquent aussi bien au solaire photovoltaïque, qu'au solaire thermique ou à des travaux d'économie d'énergie (comme l'amélioration de l'isolation thermique ou l'installation d'une chaudière performante). L'usage de système de production d'énergie solaire se justifie aussi dans les situations où il est très coûteux d'importer des combustibles fossiles ou de transporter de l'électricité, comme dans des zones isolées ou/et peu peuplées. En France, l'électrification de nombreux refuges en montagne et de villages isolés en Guyane a été réalisée par un champ solaire photovoltaïque, parfois couplé à un groupe électrogène d'appoint [15].

II-7- Notions préliminaires sur le rayonnement solaire :

Le développement, l'optimisation et la caractérisation des cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée (le soleil). La surface de celui-ci se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800K. Ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0,5 μm pour une puissance d'environ 60 MW/m^2 , soit un total de $9,5 \cdot 10^{25} \text{ W}$ [12]. En tenant compte de la surface apparente du soleil et de la distance entre celui-ci et la terre, cela conduit à un éclaircissement moyen dans l'année de 1,36 kW/m^2 hors atmosphère.

Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Mass (AM), elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith :

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \dots\dots\dots (2-2)$$

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation: $\theta=0^\circ$, $AM=1$ la notation utilisée est AM1. AM0 correspond à l'irradiance hors atmosphère, et est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour applications spatiales. Le spectre standard le plus étudié est AM1.5G, G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des directes. AM1.5G donne une irradiance de 970 W/m^2 , mais a été arrondi à 1 kW/m^2 .

L'intensité I_D reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule

Empirique suivante : $I_D = 1,353 \cdot (0,7^{AM})^{0,678}$

Avec I_D en kW/m^2 , pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents. Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur la figure (2-4).

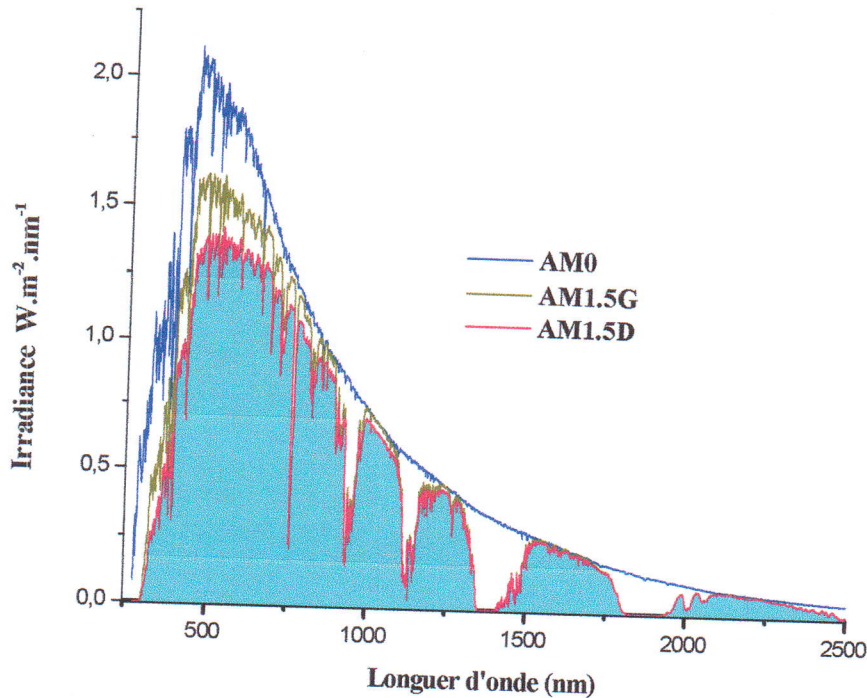


Figure (2-4) : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 [11]. Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence.

Les irradiantes 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.

II-8- Les cellules solaires photovoltaïques

II-8- 1- Description de cellule:

Les cellules solaires photovoltaïques fig (2.5-a) sont des dispositifs de conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique [16].

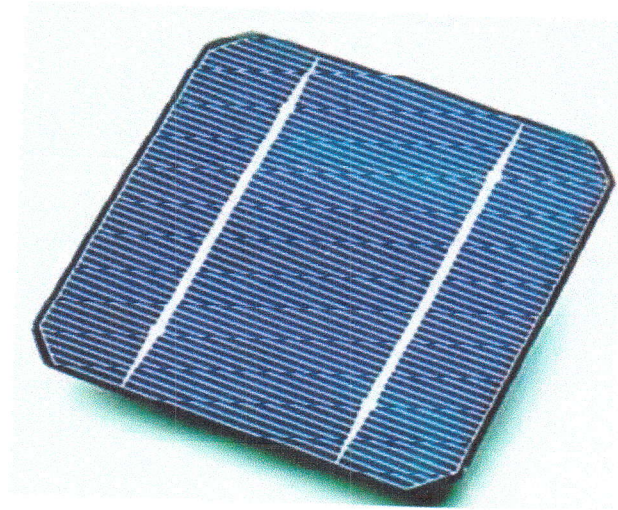


Figure :(2.5-a) : Description de cellule

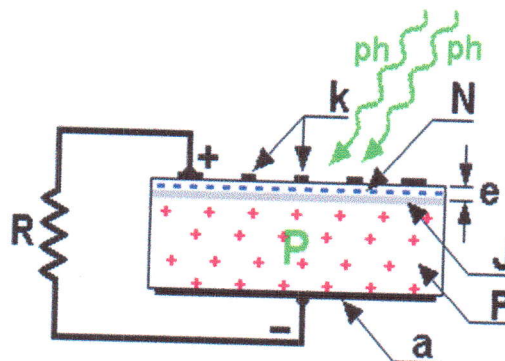


Figure :(2.5-b) : Description de cellule.

Un cristal semi-conducteur dopé P est recouvert d'une zone très mince dopée N et d'épaisseur e égale à quelques millièmes de mm. Entre les deux zones se trouve une jonction J fig (2.5-b). La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode k tandis qu'une plaque métallique a recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode.

L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du mm.

Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal au travers de la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode.

En général le semi-conducteur de base est du silicium monocristallin comme celui qui est utilisé pour la fabrication des transistors mais on rencontre maintenant plus fréquemment du silicium poly cristallin moins coûteux à produire [17].

II-9- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois 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 sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule photovoltaïque en silicium d'un rendement de 4,5% [18]. Nous présentons ici les mécanismes de la génération de porteurs électroniques au sein d'un semi-conducteur sous l'impact de photons.

II-10- Fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Une cellule PV est formée d'une jonction p-n qui permet de séparer spatialement l'électron et le trou photo générés grâce à la variation du potentiel électrochimique au sein de la structure. Une paire électron-trou photo générée dans la zone de charge d'espace (ZCE) est immédiatement dissociée par le champ électrique : les trous sont accélérés vers la zone p et les électrons vers la zone N, voir Figure (2-6). On a un phot courant de génération.

Dans les zones n ou p, les porteuses minoritaires photos générés diffusent et ceux qui atteignent la ZCE (dépendant de la longueur de diffusion L_D de ces porteurs) sont propulsés vers la région dans laquelle ils deviennent majoritaires, où ils peuvent être collectés par les contacts ohmiques. On a une photo courant de diffusion. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner le phot courant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires proportionnel à l'intensité lumineuse. Ce courant s'oppose au courant de diode, appelé courant d'obscurité I_{obs} , qui résulte de la polarisation du composant. Le courant résultant I est :

$$I = I_{obs} - I_{ph} \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

Avec : $I_{obs} = I_0 \left(\exp \left(\frac{q.V}{nkT} \right) - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (2-4)$

Où : q : charge élémentaire ($q = 1.6.10^{-19} C$)

K : constante de Boltzmann ($k = 1.38.10^{-23} J.K^{-1}$)

T : température (K°)

V : tension aux bornes de la jonction (Volt)

I_0 est le courant de saturation en inverse de la diode. Le coefficient n est le facteur d'idéalité de la diode, fonction de la qualité de la jonction (égal à 1 si la diode est idéale et égal à 2 si la diode est entièrement gouvernée par la génération / recombinaison).

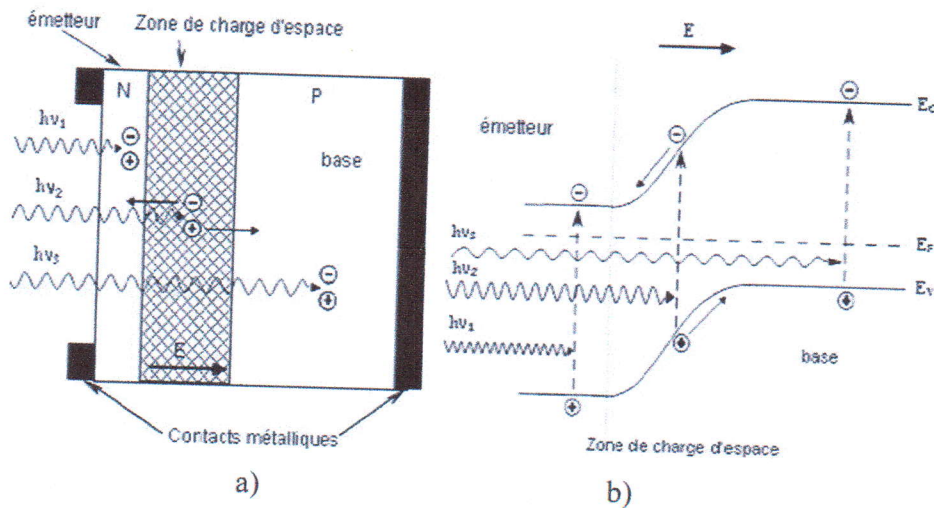


Figure (2-6) : Structure (a) et diagramme de bande (b) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.

La longueur de diffusion des électrons photo générés est plus grande que celle des trous.

La base présente une épaisseur relativement grande ($= 250-300 \mu m$) et elle est donc le plus souvent de type p : elle va fournir le plus de porteurs. Afin de limiter les recombinaisons avec les porteurs majoritaires, elle est faiblement dopée

(Environ $10^{16} cm^{-3}$). L'émetteur, de type n, est de faible épaisseur ($= 0.2 \mu m$) et fortement dopé

(Environ $10^{20} cm^{-3}$) afin d'obtenir un champ électrique suffisant dans la ZCE ($= 0.3 \mu m$). L'épaisseur de la cellule doit être choisie de manière à ce qu'un maximum de photons soient absorbés par le silicium, tout en tenant compte des contraintes de découpe du matériau.

Même si nous ne l'aborderons pas dans ce travail, il est intéressant de noter que les cellules photovoltaïques en silicium de type n suscitent actuellement un intérêt important et que de nombreuses recherches sont menées sur ce matériau jusqu'ici sous-estimé [12].

II-11-Nature de silicium :

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, de son abondance naturelle et de son coût de mise en œuvre économique. On peut toutefois en citer quelques autres : le germanium, l'arséniure de gallium ou le carbure de silicium [19].

proprement parler. Afin de limiter son influence sur le courant de la cellule, R_s doit être minimisée en optimisant les contacts métal/semi-conducteur et en diminuant la résistivité du matériau. Un compromis est à trouver entre cette dernière et la recombinaison des porteurs : un dopage trop élevé entraîne des recombinaisons trop importantes. Les valeurs de résistivité retenues sont comprises en général entre 0.5 et $5\Omega \cdot cm$ pour le substrat initial.

II-14-Technologie d'une cellule photovoltaïque :

II-14-1-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.

II-14-2-Silicium poly cristallin :

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin 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 poly cristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14%.

II-14-3-Silicium amorphe :

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi-conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de se cours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [20].

II-15- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le spectre solaire ; et son application dans le domaine photovoltaïque.

Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et la technique de fabrication de la cellule photovoltaïque en silicium et leur cout.