



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE ou INSTITUT : Science et technologie

DEPARTEMENT : Electronique

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

- **Barka Soufiane Haouari**
- **Boukhari Noureddine Benchaa**

DOMAINE : Science et technologie

FILIERE : Electronique

OPTION : Instrumentation

Thème

**Modélisation et optimisation des performances des cellules
solaires HIT à base de silicium**

Soutenu le 19/06/2022

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr : A.BELLAKHDAR	MCA	Président
Melle : L. A. VILBOIS	MAA	Examinateur
Mr : A. MOUHOUB	MCB	Rapporteur

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2021/2022

Remerciements

Je présente tous mes respects, mes profondes gratitude,

Mes profondes reconnaissances,

et mes sincère remerciement à mon encadreur

Dr. Mouhoub Abdelhafid

Maitre de conférences à l'université de Laghouat

qui ma aider a traversé tous les obstacles que j'ai rencontré,

qui ma soutenues et ma conseillé a terminé se travail

, toujours-il été mon encadreur, mon ami,

Je le remercie infiniment.

Je remercie tous mes professeurs et tous les membres de jury

Pour l'honneur qu'ils mon fait accepte d'évaluer mon travail.

Je remercie tous ceux qu'ils mon aider a terminé ce travail.

Dédicaces

Je dédier le présent mémoire:

A ceux qui sont toujours à mes côtés qui mon donner tous le courage qui mon fait confiance et mon pousser à atteindre mon but

« Mes parent» que dieu les protège

A mes sœurs chaque'une avec son nom,

A tous mes amis.

A tous ceux et celles que j'aime de près comme de loin et que mon stylo a oublié mais jamais mon cœur.

SOMMAIRE

Liste des abréviations et des symboles	I
Liste des figures	II
Liste des tableaux	III
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I :Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïque.....	3
I.3 Irradiation solaire.....	4
I.4.1 Le courant de court-circuit I_{cc}	5
I.4.2 La tension en circuit ouvert V_{co}	6
I.4.3 Le facteur de forme FF.....	6
I.4.4 Le rendement.....	7
I.4.5 La réponse spectrale.....	7
I.4.6 La photoluminescence.....	8
I.5 Circuits électriques équivalentes d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.5.1 Modèle a une diode.....	9
I.5.2 Modèle à deux diodes.....	10
I.6 Filière photovoltaïque.....	10
I.6.1 Filière de silicium cristallin	11
I.6.1.1 Silicium monocristallin	12
I.6.1.2 Silicium polycristallin	12
I.6.2 Filière des couches minces	13
I.6.2.1 Cellules à base de silicium couche mince	13
I.6.2.1.1 Le silicium amorphe.....	13
I.6.2.1.2 Combinaison entre silicium amorphe et silicium cristallin	14
I.6.2.2 Cellules à base de Tellure de cadmium (CdTe)	15

I.6.2.3 Cellules à base cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS)	16
I.6.3 Filière des cellules à très haut rendement (GaAs)	17
I.6.4 Filière des cellules organique	17
I.6.5 Cellules à colorant	18
I.7 Conclusion	18

CHAPITRE II : Propriétés des matériaux des cellules à hétérojonction de silicium

II.1 Introduction.....	19
II.2 Cellule à hétérojonctions de silicium.....	19
II.2.1 Structure des cellules à hétérojonctions de silicium.....	19
II.2.2 Avantages des cellules HET	21
II.2.3 Diagramme des bandes	21
II.3 Silicium cristallin	23
II.3.1 Description générale	23
II.3.2 Dopage du silicium cristallin	24
II.3.3 Propriétés électriques	25
II.3.4 Photogénération.....	29
II.3.5 Durée de vie, longueur de diffusion	29
II.4 Silicium amorphe.....	30
II.4.1 Description générale du matériau.....	30
II.4.2 Rôle de l'hydrogène	32
II.4.3 Procédé de fabrication	32
II.4.4 Densité d'états	33
II.4.4.1 Dopage du silicium amorphe.....	35
II.5 Conclusion	35

CHAPITRE III : cellules PV à hétérojonction de silicium a-Si/c-Si

III.1 Introduction	37
III.2 Combinaison entre a-Si :H/c-Si	37
III.2.1 Principe	37

III.2.2 Historique	37
III.3 Technique de dépôt du silicium amorphe hydrogéné a-Si: H:	41
III.4 Les composants principaux de la cellule à hétérojonction de silicium	41
III.4.1 L'oxyde transparent conducteur (TCO)	41
III.4.2 La couche tampon	42
III.4.3 La couche absorbante	42
III.5 Diagramme des bandes	42
III.6 Propriétés électriques :	43
III.6.1 Concentration des porteurs de charge libres	43
III.6.2 Mobilité des porteurs :	44
III.6.3 Conductivité et résistivité :	44
III.6.4 Recombinaisons des porteurs libres.	45
III.7 Conclusion	46

CHAPITRE IV : *Simulation numérique et interprétation des résultats*

IV.1 Introduction.....	47
IV.2 Programme de simulation (SCAPS).....	47
IV.3 Notions de base.....	48
IV.3.1 Lancer SCAPS.....	49
IV.3.2 Définir le problème.....	50
IV.3.3 Définir le point de fonctionnement.....	51
IV.3.4 Sélection des caractéristiques à simuler.....	52
IV.3.5 Lancer le calcul.....	52
IV.3.6 Afficher les courbes simulées.....	52
IV.3.7 Les courbes I-V.....	53
IV.4 Définition d'une cellule solaire.....	53
IV.4.1 Contacts.....	54
IV.4.2 Définition des couches.....	55
IV.5 Structure de la cellule à simuler.....	58

IV.6 Paramètres utilisés dans le logiciel de simulation.....	58
IV.7 Résultats de la simulation et interprétations.....	59
IV.7.1 Caractéristique $J(V)$	59
IV.7.2 Réponse spectrale (QE)	61
IV.7.3 Influence du dopage du substrat c-Si(n) sur les performances des cellules simulées.....	61
IV.7.4 Influence de la concentration des défauts sur les paramètres photovoltaïques.....	62
IV.7.5 Effet de la couche de passivation a-Si:H(i)	63
IV.7.6 Effet de la largeur de la bande interdite de la couche a-Si:H(p)	64
IV.8 Conclusion.....	65
CONCLUSION GENERALE.....	66

LISTE DES SYMBOLES

<i>Symbole</i>	Description
I_{PH} :	Photo-courant [A], proportionnel à l'irradiance E.
R_s :	Résistance série [Ω].
R_{sh} :	Résistance shunt (ou parallèle) [Ω].
q :	Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb
k :	Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
T :	Température effective de la cellule [Kelvin].
I_0 :	Courant de saturation
P_M :	Puissance maximale.
P_0 :	Puissance incident.
I_s :	Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température [A]
A :	Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.
I :	Courant fourni par la cellule.
V :	Tension à la borne de la cellule [V].
$\Delta E_c / \Delta E_v$:	Ecart des bords de bandes de conduction et de valence
$\Delta \eta_{(s)} / \Delta \rho_{(s)}$:	Concentration d'électrons / trous excédentaires (à l'interface)
ϵ / ϵ_0 :	Permittivité du matériau / vide
η :	Rendement de conversion photovoltaïque
λ :	Longueur d'onde
μ_n / μ_p :	Mobilité des électrons / des trous
σ :	Conductivité
$D(E)$:	Densité d'états
$D^-(E) / D^0(E) / D^+(E)$:	Densité d'états chargés et neutres du DPM
e :	Charge élémentaire
E :	Energie
E_a :	Energie d'activation
E_c / E_v :	Energie de bord de bande de conduction / valence
E_F :	Niveau de Fermi
E_g :	Energie de bande interdite du semi-conducteur
K_B :	Constante de Boltzmann
L_D :	Longueur de diffusion
m_c / m_v :	Masse effective des électrons / trous
$n_{(0)}$:	Concentration d'électrons (à l'équilibre)
N_c / N_v :	Densité d'états au bord des bandes de conduction

N_{dop} :	Concentration d'atomes dopants
T :	Température
$N(E)$:	Densité d'états monovalente totale
U :	Energie de corrélation
N_d / N_a :	Densité des accepteurs et des donneurs, respectivement
$AM 1.5$:	Spectre de la lumière solaire
V_m :	Tension maximale
V_{co} :	Tension de circuit ouvert
QE :	Rendement quantique (quantum efficiency)
FF :	Facteur de forme
I_{cc} :	Courant de court circuit
v_d :	Potentiel de diffusion
C :	Vitesse de la lumière
θ :	Angle de diffraction

LISTE DES FIGURES

Figure (I.1)	Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque	3
Figure (I.2)	Conditions de mesures de quelques rayonnements AMx	4
Figure (I.3)	Répartition spectrale du rayonnement solaire	5
Figure (I.4)	Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	5
Figure (I.5)	Réponse spectrale d'une cellule amorphe et d'une cellule cristalline	8
Figure (I.6)	Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode	9
Figure (I.7)	Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes	10
Figure (I.8)	Développement du rendement des cellules photovoltaïques (pour des différent filière)	11
Figure (I.9)	Plaque de silicium monocristallin	12
Figure (I.10)	Plaque de silicium multicristallin	12
Figure (I.11)	Structure d'une cellule au silicium amorphe	13
Figure (I.12)	Diagramme de bande à l'équilibre d'une hétérojonction (p)a-Si:H/(n)c-Si	14
Figure (I.13)	Schéma d'une cellule solaire à hétérojonction de silicium amorphe/cristallin (SHJ)	15
Figure (I.14)	Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe	16
Figure (I.15)	Composition couche par couche d'une cellule photovoltaïque au CIGS	16
Figure (II.1)	Structure d'une cellule standard HET	20
Figure (II.2)	Diagramme schématique de la position, à l'équilibre, des bandes de Conduction EC et de valence EV par rapport à la position du niveau de Fermi EF pour une hétérojonction (p)a-Si :H/(n)c-Si	22
Figure (II.3)	Structure de bandes du silicium cristallin	24
Figure (II.4)	Extrait de la classification périodique	25
Figure (II.5)	Représentation du silicium amorphe hydrogéné. Les atomes de silicium sont représentés en noir et les atomes d'hydrogène en blanc	31
Figure (II.6)	Équilibre de passivation des liaisons pendantes des atome de silicium par l'hydrogène dans a-Si :H	32
Figure (II.7)	Dépôt de a-Si:H par décomposition chimique des gaz réactifs dans un plasma de	33

décharge

Figure (II.8)	Densité d'états $N(E)$ typique de a-Si :H	34
Figure (III.1)	a) Structure schématique des cellules solaires à hétérojonction a-Si: H / c-Si faites par Sanyo b) performance de la cellule solaire en fonction de l'épaisseur de a-Si: H de type p	38
Figure (III.2)	a) Structure schématique des cellules solaires ACJ-HIT fabriquées par Sanyo b) performance de la cellule solaire en fonction de l'épaisseur a-Si: H intrinsèque	38
Figure (III.3)	a) Structure schématique et b) caractéristique I-V de la cellule solaire HIT avec surface texturé et BSF	39
Figure (III.4)	a) Structure symétrique schématique de la cellule solaire HIT avec passivation recto-verso. b) sa caractéristique I-V	40
Figure (III.5)	Diagramme des bandes type d'une hétérojonction à l'équilibre 1) a-Si:H(p)/ c-Si(n) ; 2) a-Si:H(n)/ c-Si(p)	43
Figure (III.6)	Schéma des principaux processus de recombinaisons dans les semi-conducteurs. Les directions des flèches indiquent la transition des électrons	46
Figure (IV.1)	Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal	49
Figure (IV.2)	Panneau de définition d'une cellule solaire	50
Figure (IV.3)	Le point de fonctionnement	51
Figure (IV.4)	Panneau des bandes d'énergie	52
Figure (IV.5)	Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclaircissement	53
Figure (IV.6)	Définition de la structure d'une cellule solaire	54
Figure (IV.7)	Panneau des propriétés des contacts	55
Figure (IV.8)	Propriétés de la couche ajoutée	56
Figure (IV.9)	Propriétés des dopages définis	56
Figure (IV.10)	Modèle de l'absorption	57
Figure (IV.11)	Définition des types de recombinaison présents	57
Figure (IV.12)	Structure d'une cellule solaire HIT de type n	58
Figure (IV.13)	Caractéristiques I(V) des cellules solaires simulées	60
Figure (IV.14)	Variation du rendement quantique des cellules solaires HIT simulées	61

Figure (IV.15)	Evolution du courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement la cellule en fonction de la concentration du dopage de la couche c-Si(n)	62
Figure (IV.16)	Variation du V_{oc} , J_{sc} , FF et η en fonction de la concentration des défauts	63
Figure (IV.17)	Densité de courant en fonction de la tension avec et sans présence de la couche a-Si:H(n) pour la cellule HIT	64
Figure (IV.18)	Evolution du courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement des cellules en fonction de la largeur de bande a-Si:H(p)	65

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau (II.1)** Paramètres utilisés dans le calcul de mobilité des porteurs majoritaires dans le silicium cristallin
- Tableau (IV.1)** Paramètres géométriques et électriques des différentes couches de la cellule
- Tableau (IV.2)** Paramètres électriques des cellules solaires simulées.

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, les énergies renouvelables sous toutes leurs formes: éolienne, solairethermique, photovoltaïque, hydroélectrique et biomasse suscitent un vif intérêt dans le monde entier car elles sont inépuisables à très long terme puisqu'elles proviennent directement de phénomènes naturels liés à l'énergie du soleil, de la terre ou de la gravitation.

En effet, l'augmentation du besoin énergétique mondial et par conséquent l'accroissement de la consommation de l'énergie primaire pousse à prévoir une diminution importante, voire même un épuisement des réserves d'énergie fossile sans oublier le risque des dangers potentiels de l'utilisation intensive des énergies fossiles.

Parmi ces différentes énergies renouvelables, l'énergie photovoltaïque représente aujourd'hui une sérieuse alternative aux énergies non renouvelables qui sont destinées à disparaître. [1].

L'élément le plus utilisé pour la fabrication des cellules solaire est le silicium (plus de 95% du marché mondial). En effet c'est un élément très abondant sur terre bénéficiant d'une technologie de la microélectronique qui est bien maîtrisée, cette technologie permet de fabriquer des cellules avec un haut rendement (24%), mais avec un coût de production très élevé [2].

Pour relever le défi et en augmentant le rendement de conversion des cellules tout en diminuant les coûts de production, et pour améliorer l'efficacité de la conversion, en utilisant de nouveaux matériaux et structures qui peuvent augmenter les performances des dispositifs PV tout en réduisant les coûts de fabrication.

Les cellules solaires de structure HIT (Hétérojonction with Intrinsic Layer) sont constituées d'un substrat de silicium cristallin (c-Si) d'épaisseur comprise entre 100 et 300 μm , et d'une fine couche de silicium amorphe (a-Si:H) jouant le rôle d'émetteur en face avant et de champ de surface arrière (BSF), et une couche de a-Si:H non dopé

entre le substrat et l'émetteur, la fabrication de telles cellules permet de réduire considérablement le budget thermique de fabrication en comparaison avec les cellules de la filière plus classique de silicium cristallin. C'est une des raisons pour lesquelles les recherches sur ce type de cellules sont particulièrement actives depuis plusieurs années.

Dans ce contexte, une nouvelle structure de cellule solaire HIT est proposée pour faire l'objet de ce projet de fin d'étude visant l'optimisation des performances des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction de Si.

Pour ce faire, notre travail est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre comporte les différentes notions de base sur le fonctionnement et les grandeurs caractéristiques et les paramètres d'une cellule photovoltaïque ainsi les différentes filières photovoltaïques.

Un second chapitre portera sur une étude détaillée du comportement des hétérojonctions (HIT: Heterojunctions with Intrinsic Thin layer) comprenant des substrats dopés n, et l'étude des différents matériaux qui constituent les cellules solaires photovoltaïques, soit le silicium amorphe hydrogéné, le silicium polymorphe hydrogéné et le silicium cristallin.

Un troisième chapitre présentera une étude théorique des cellules PV à hétérojonctions sur substrat de type n.

Le dernier chapitre, présentera une description détaillée du logiciel de simulation SCAPS utilisé pour nos simulations, et les résultats obtenus d'une hétérojonction sur substrat de type n par rapport aux paramètres les plus importants, afin de déterminer l'influence de certains paramètres de ces cellules (épaisseur et concentration du dopage) sur les performances photovoltaïques.

Chapitre I :

Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

I.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on va faire une présentation des cellules et matériaux photovoltaïques. On y trouvera le principe de fonctionnement, l'irradiation solaire, les grandeurs caractéristiques et les modèles d'une cellule solaire ainsi les différentes filières photovoltaïques.

I.2. Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est basé sur le comportement des matériaux semi-conducteurs lorsqu'ils reçoivent un rayonnement solaire. En effet, lorsque les photons de la lumière du soleil rentrent en contact avec ces matériaux particuliers, ils transmettent leur énergie aux électrons des semi-conducteurs qui génèrent alors une tension électrique [3].

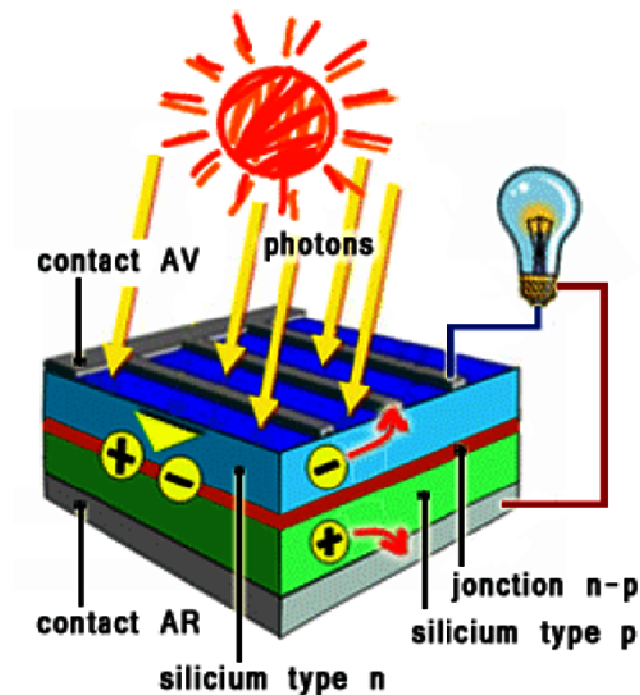


Figure (I.1) : Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente. Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie $h\nu$ à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit

donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure. [4]

I.3. Irradiation solaire :

Le calcul et les mesures par satellite montrent que la terre qui est située à environ 150 millions de kilomètres du soleil - reçoit une valeur moyenne du flux solaire à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, sa valeur est estimée à 1367 W. Le rayonnement reçu sur l'atmosphère terrestre est caractérisé par des longueurs d'ondes comprises entre 0.2 et 2.5 μm , il inclut le domaine du visible (ondes lumineuses de 0.4 et 0.8 μm). L'irradiation solaire totale (noté TSI pour total solar irradiance) est la quantité d'énergie radiative provenant du Soleil (intensité totale du rayonnement) reçue par une surface de 1 m^2 du sommet de l'atmosphère terrestre, lorsque celui-ci se situe à une unité atmosphérique (1,96.108 km) du Soleil et que la trajectoire du rayon est perpendiculaire à cette surface.

Le soleil émet continuellement une énergie radiative considérable dans toutes les directions du système solaire. Celle-ci absorbe et reflète une partie de ce rayonnement solaire de telle sorte que l'énergie reçue au niveau de la surface de la mer (altitude 0 m), par ciel clair et quand le soleil est au zénith, vaut 1 000 W/m^2 . Cette situation a été définie par la communauté scientifique comme une situation de référence décrite par l'indicateur Air-Masse, notée AM1. Le coefficient Air Masse évalue la masse atmosphérique traversée par le rayonnement solaire. En moyenne au sol et dans toute la zone tempérée de l'hémisphère nord et donc en France-Europe et en Algérie-Maghreb, on utilise AM1.5 [5].

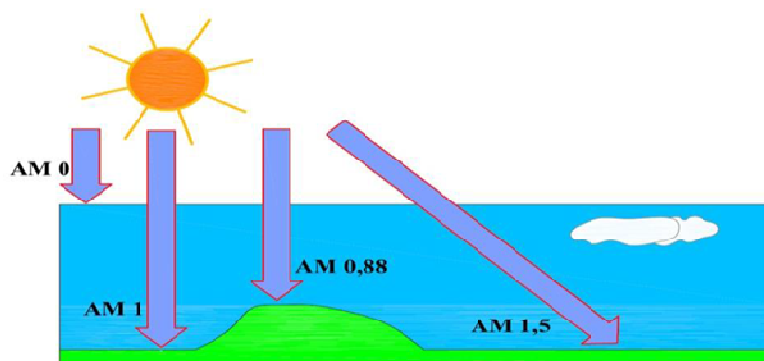


Figure (I. 2) : Conditions de mesures de quelques rayonnements AM_x .

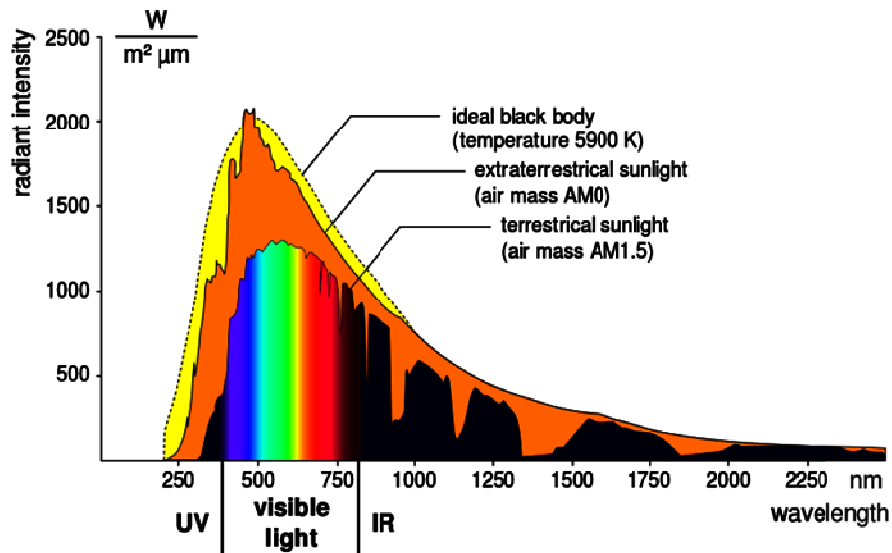


Figure (I. 3) : Répartition spectrale du rayonnement solaire.

I.4. Caractérisation électrique des cellules photovoltaïques :

Les performances de la cellule solaire sont représentées à travers la caractéristique courant-tension $I(V)$. Cette dernière apporte une lecture claire des paramètres caractérisant la cellule solaire comme le rendement de la cellule, les différents types des résistances parasites et le facteur de forme. Le courant est mesuré en fonction de la tension appliquée sous obscurité et sous ensoleillement, la lumière permet de décaler la courbe $I-V$ vers le bas dans le quatrième quadrant, car le courant photoélectrique provoque la production de l'énergie [6].

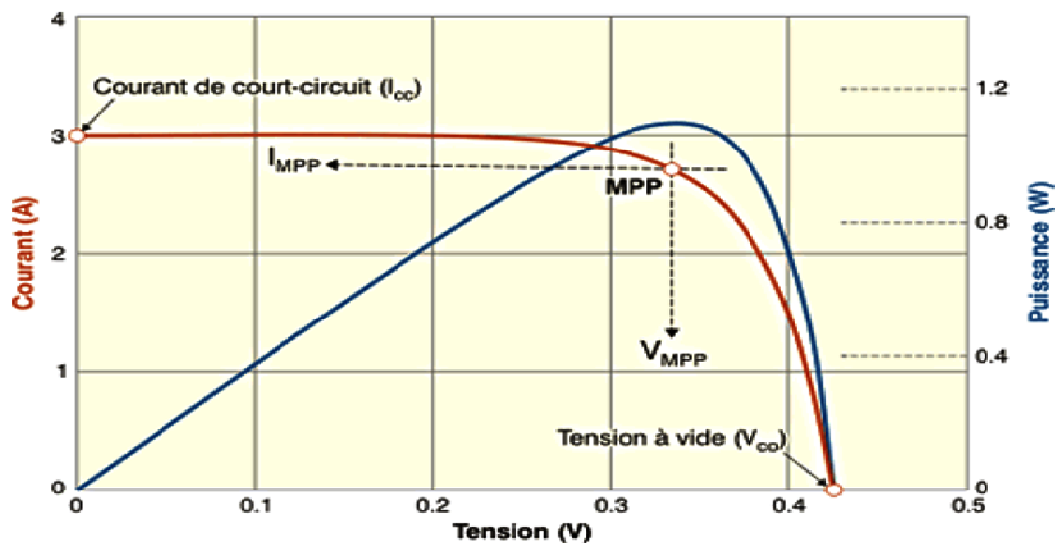


Figure (I. 4) : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque [7].

I.4.1. Le courant de court-circuit I_{CC} :

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = V \times I$ est nulle.

$$I_{CC} = \frac{I_{ph}}{[1 + (\frac{R_s}{R_{sh}})]} \quad (I.1)$$

Où :

I_{ph} : Photo-courant [A], proportionnel à l'irradiance E.

R_s : Résistance série [Ω].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [Ω].

I.4.2. La tension en circuit ouvert V_{CO} :

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = V \times I$ est nulle.

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

$$V_{CO} = \frac{kt}{q} \ln \left[\frac{I_{CC}}{I_0} + 1 \right] \quad (I.2)$$

Avec :

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

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

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

I_0 : courant de saturation A

I.4.3. Le facteur de forme FF :

Le facteur de forme est un paramètre important pour définir la qualité d'une cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule et la puissance formée par le rectangle $I_{CC} \times V_{CO}$:

$$FF = \frac{P_M}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_M V_M}{I_{cc} V_{co}} \quad (I.3)$$

Avec :

P_M : puissance maximale.

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique I-V de la cellule solaire.

I.4.4. Le rendement :

Le rendement de conversion est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule PV et la puissance du rayonnement solaire incident :

$$\eta = \frac{P_M}{P_o} \quad (I.4)$$

Avec :

P_o : Puissance incident.

Si S est la surface de la cellule (en m²) et E est l'éclairement -irradiance- (en W/m²).

Le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{P_M}{E * S} \quad (I.5)$$

Ou d'après (I.3) :

$$P_M = FF * V_{co} * I_{cc} \quad (I.6)$$

$$\eta = \frac{FF * V_{co} * I_{cc}}{E * S} \quad (I.7)$$

I.4.5. La réponse spectrale :

Les photons ayant une énergie supérieure au gap du semi-conducteur pourront créer une paire électron-trou. L'énergie excédentaire sera perdue, elle aussi en fonction de la longueur d'onde de la lumière. Une autre technique fondamentale de caractérisation est la réponse spectrale. Elle permet d'apporter des informations sur la capacité de la cellule à produire un photo-courant en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident.

Par exemple, les réponses spectrales des cellules au silicium cristallin et au silicium amorphe sont représentées sur Figure I.5 [9]

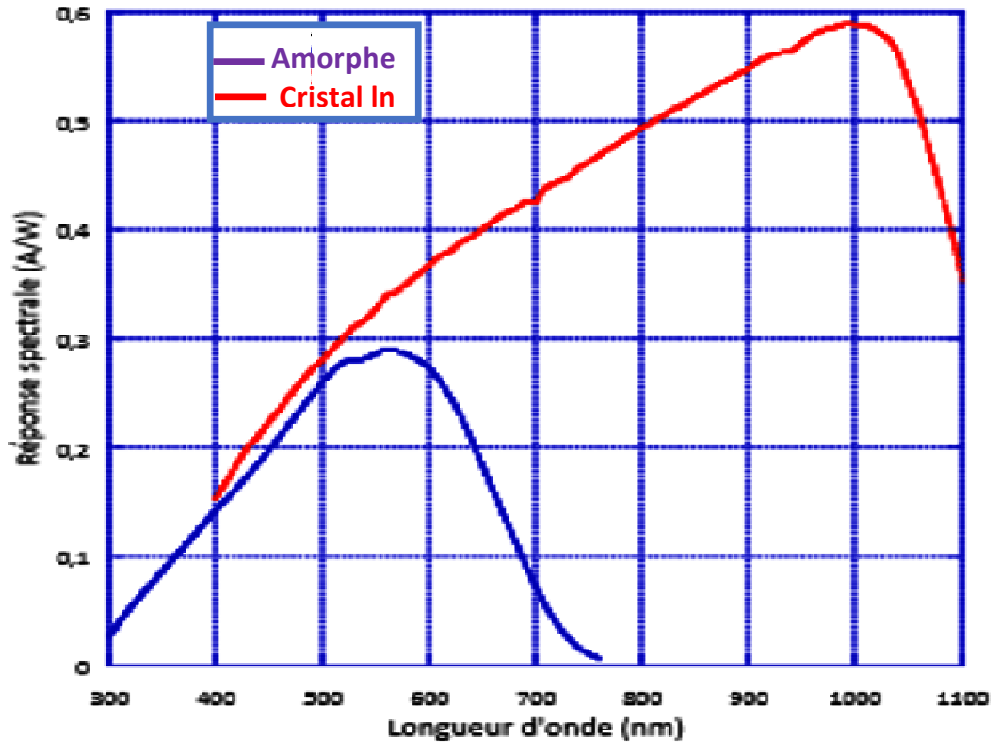


Figure (I.5): Réponse spectrale d'une cellule amorphe et d'une cellule cristalline. [8]

Donc la réponse spectrale est la valeur du courant de court-circuit de la cellule par unité de flux monochromatique incident.

$$Rs(\lambda) = \frac{Jsc(\lambda)}{Pg(\lambda)} \quad (I.8)$$

Où $Rs(\lambda)$ est la réponse spectrale, exprimée en A/W ; $Pg(\lambda)$ l'éclairement monochromatique global, exprimé en W/m^2 et $JSC(\lambda)$ désigne le courant de court-circuit, exprimé en A/cm^2 .

I.4.6. La photoluminescence :

La photoluminescence PL peut être définie comme la radiation photonique produite par un semi conducteur à la suite d'une excitation lumineuse. C'est un processus par lequel une substance absorbe des photons puis réémet des photons. Dans le cas d'un semi conducteur, le principe est d'exciter des électrons de la bande de valence avec un photon d'une énergie

supérieure à l'énergie de gap du composé, de telle sorte qu'ils se retrouvent dans la bande de conduction. L'excitation fait donc passer les électrons vers un état d'énergie supérieure avant qu'ils ne reviennent vers un niveau énergétique plus bas avec émission d'un photon. Après un temps très court, l'électron se recombine et retourne dans la bande de valence avec émission d'un photon (lorsque le matériau est à gap indirect), d'un photon ou dans certains cas d'un électron Auger. La PL s'intéresse au cas d'un photon émis.

I.5. Circuits électriques équivalentes d'une cellule photovoltaïque :

I.5.1. Modèle à une diode :

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle standard pour une diode. Il est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle. Ce modèle comprend une diode. [8]

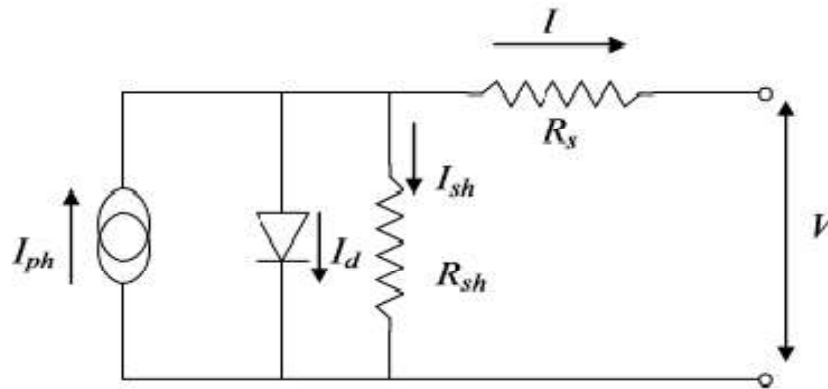


Figure I.6 : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation (I.9)

$$I = -I_{PH} + \frac{V - R_s I}{R_{SH}} + I_S \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{AKT} \right\} - 1 \right] \tag{I.9}$$

Avec :

I_s : Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température [A]

A : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

I : Courant fourni par la cellule.

V : Tension à la borne de la cellule [V].

Il faut noter que ces deux résistances sont liées à la technologie d'élaboration des électrodes. Il faut minimiser R_s de telle sorte que R_{sh} soit très important.

I.5.2. Modèle à deux diodes

Le circuit équivalent du modèle à deux diodes est le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule (deux diodes) . Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part sur la surface du matériau et d'autre part sur le volume du matériau. Le schéma du circuit équivalent (figure I.7) pour un modèle en deux diodes devient :

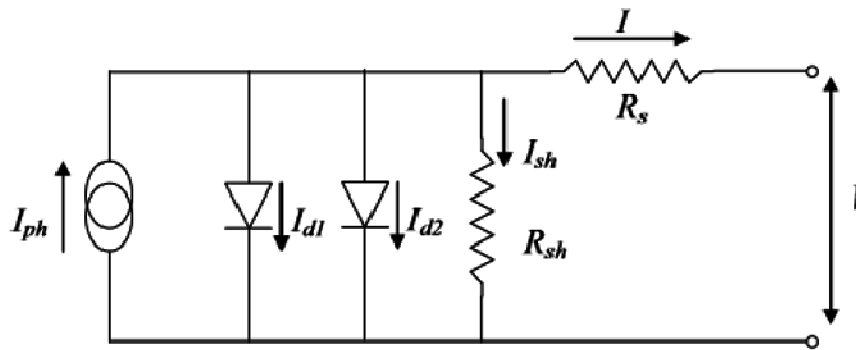


Figure (I.7) : Schéma équivalent d’une cellule PV Modèle à deux diodes.

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation (I.10) :

$$I = - \frac{I_{ph} + V - R_s I}{R_{sh} + I_{s1} \left[e^{\left\{ \frac{q(V - R_s I)}{AKT} \right\}} - 1 \right] + I_{s2} \left[e^{\left\{ \frac{q(V - R_s I)}{AKT} \right\}} - 1 \right]} \tag{I.10}$$

I.6. Filière sphotovoltaïques :

Il existe plusieurs technologies de cellules qui ont toutes des propriétés différentes. Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées des semiconducteurs qui sont capables de conduire l’électricité.

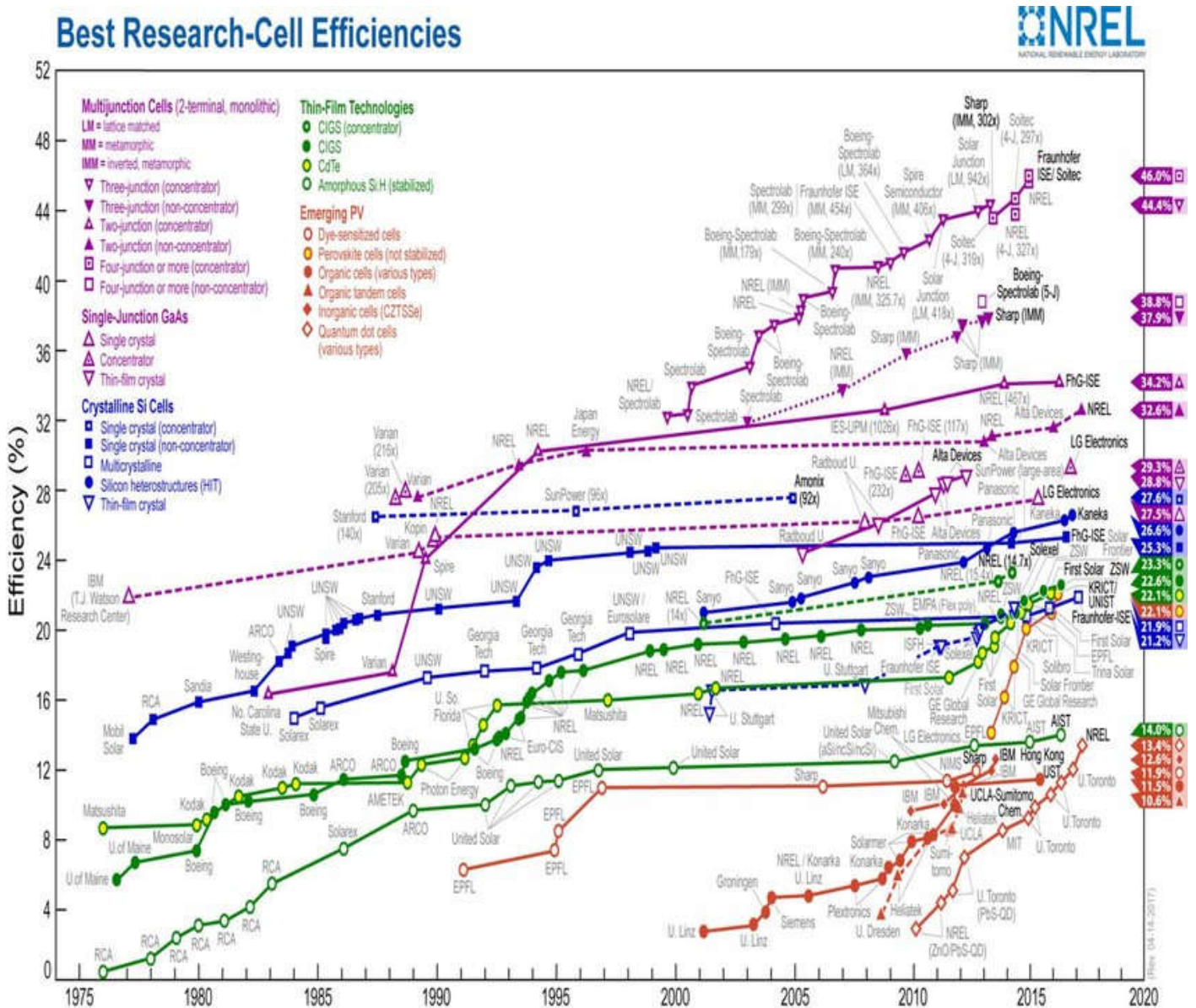


Figure (I.8) : Développement du rendement des cellules photovoltaïques (pour des différent filière). [10]

Dans ce qui suit, on va présenter les principales filières photovoltaïques.

I.6.1 Filière de silicium cristallin :

Le silicium représente le deuxième élément le plus abondant sur terre après l’oxygène et peut donc être considéré comme inépuisable [9]. La recherche sur la filière du silicium cristallin a débuté dans les années 1950 en France [7]. Les cellules cristallines se subdivisent en 2 catégories : mono- et poly- cristalline selon le type de structure. Ces deux types de cellules proviennent de procédé de purification et de solidification différents.

I.6.1.1 Silicium monocristallin :

Le silicium mono cristallin est difficile à obtenir. En effet, il nécessite un taux de pureté très élevé et donc plusieurs étapes de purification. Les cellules monocristallines ont un taux de rendement excellent (16 à 24%) mais leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère ; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur. [11]

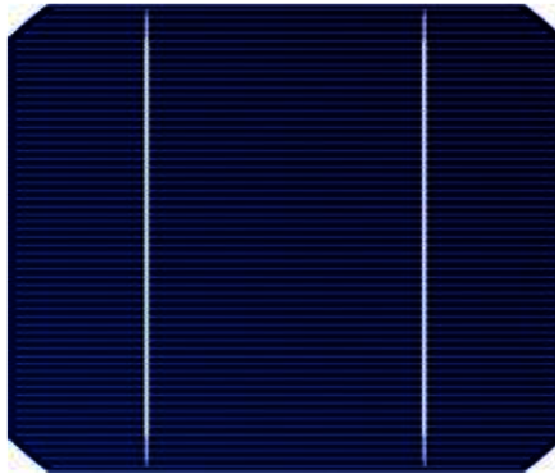


Figure (I.9) : Plaque de silicium monocristallin.

I.6.1.2. Silicium polycristallin :

Le silicium multi cristallin (Polycristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A-t-elle seule elle représente près de 50% du marché. Les cellules polycristallines ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre 14 à 18% [10].

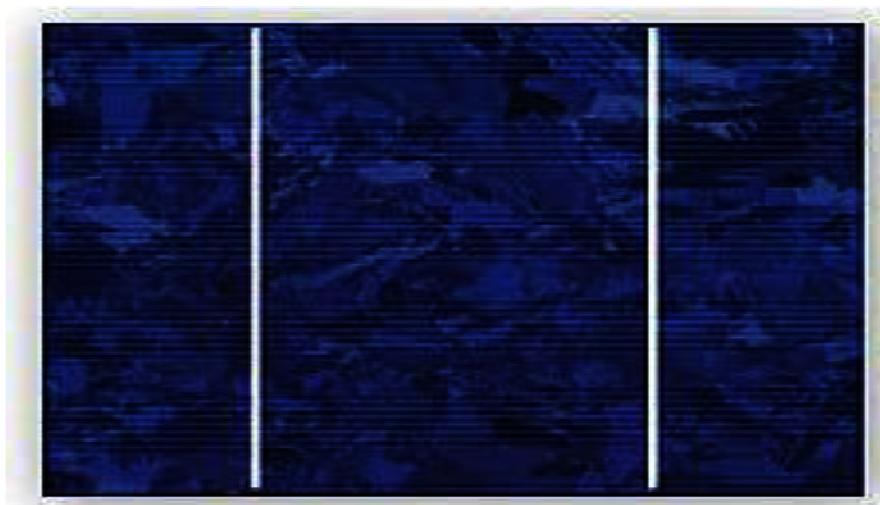


Figure (I.10) : Plaque de silicium multicristallin.

I.6.2. Filière des couches minces :

La deuxième génération des cellules repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces (thin film). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse), on distingue :

I.6.2.1 Cellules à base de silicium en couche mince :

I.6.2.1.1 Le silicium amorphe :

La technologie à couche mince dont la plus mure est le silicium amorphe (a-Si) représentait un Rendement de 14 % (module 5 – 7% stabilisé) L'avantage de cette technique est l'utilisation de substrats à bas coût. Les cellules au silicium amorphe sont des cellules à couche mince, c'est-à-dire qu'elles sont fabriquées en déposant une fine couche de silicium sur un support (ou "substrat"), par exemple du verre. L'épaisseur de silicium utilisée est beaucoup plus faible que pour les cellules mono ou polycristallines qui sont réalisées à partir de tranches de silicium.

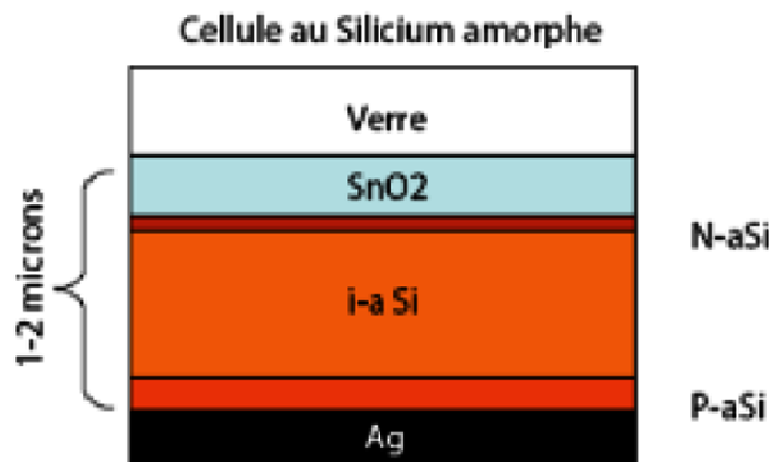


Figure (I.11) : Structure d'une cellule photovoltaïque à base de silicium amorphe.

Les porteurs de charges minoritaires dans les cellules sur couches minces de silicium amorphe ne peuvent pas aller très loin dans le silicium amorphe et donc une structure de jonction p-n comme dans le cristallin ne pourrait, en aucun cas, collecter les porteurs des photons générés dans une très petite couche près de la surface illuminée. D'autre part les couches dopées p et n du silicium amorphe sont très défectueuses et présentent des taux de recombinaison importants.

C'est pourquoi on place une zone intrinsèque beaucoup moins défectueuse entre deux couches dopées extrêmement minces. Ces couches dopées créent un champ interne qui doit s'étendre sur toute l'épaisseur de la cellule afin de collecter les porteurs engendrés dans la zone intrinsèque.[7]

I.6.2.1.2 Combinaison entre silicium amorphe et silicium cristallin :

Les cellules PV à hétérojonction (HJ) sont obtenues par la mise en contact de matériaux d'énergie de gap (EG) différente. La première hétérojonction entre silicium cristallin et silicium amorphe hydrogéné a été proposée en 1974 par Fuhs et al. , qui ont montré que cette structure pouvait générer un photo-courant. Une cellule photovoltaïque réalisée à partir de ces matériaux avec un rendement de 12,4 % a été fabriquée en 1983 par Okuda. Par la suite, les chercheurs de l'entreprise japonaise Sanyo se sont intéressée à cette structure, et ont continué à l'améliorer, notamment en ajoutant une très fine couche de silicium amorphe intrinsèque à l'interface des matériaux dopés. Cette configuration, connue sous le nom de cellule HIT (pour Heterojunction with Intrinsic Thin layer) a démontré sa capacité à rivaliser avec les hauts rendements des meilleures cellules à homo-jonctions de silicium. [11] L'hétérojonction de silicium (Si-HJ) consiste à mettre en contact le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) avec le silicium cristallin (c-Si). L'énergie de gap du a-Si:H, entre 1.5eV et 1.9eV, est en effet plus élevée que celle du c-Si (1.12eV) [12].

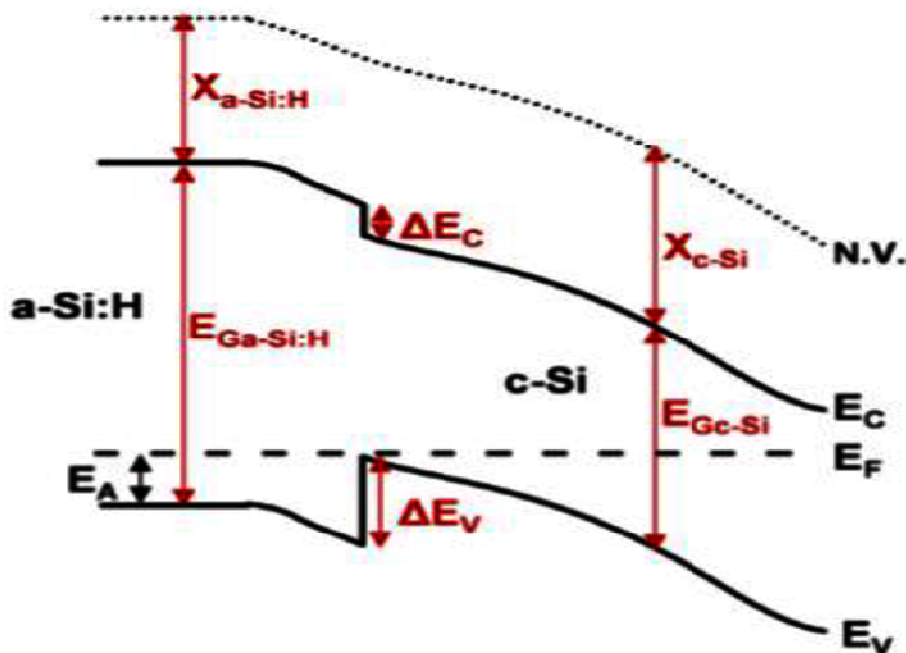


Figure (I.12) : Diagramme de bande à l'équilibre d'une hétérojonction (p)a-Si:H/(n)c-Si.

La simplicité de la structure Si-HJ en comparaison avec les structures à contacts localisés en fait une candidate très pertinente pour atteindre des hauts rendements. De plus, l'utilisation exclusive de procédés à basse température (inférieure à 250°C) permet, en plus d'économiser de l'énergie, de diminuer l'impact des recuits thermiques pour certains matériaux sensibles aux étapes à haute température (mc-Si de type n, substrats minces). [12]

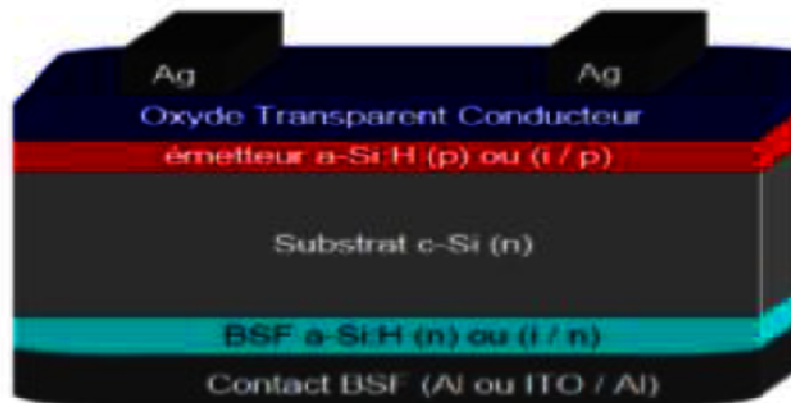


Figure (I. 13) : Schéma d'une cellule solaire à hétérojonction de silicium amorphe/cristallin (SHJ).

I.6.2.2. Cellules à base de Tellure de cadmium (CdTe) :

La technologie à base de CdTe présente des rendements en dessous du cristallin, de l'ordre de 9 – 17 % (module 13% - record à 18,2%) mais bénéficie d'un faible coût à la production. Sa capacité d'absorption de la lumière et son coefficient thermique avantageux lui permettent d'être en adéquation presque parfaite avec le spectre solaire. Son principal inconvénient est sans nul doute la limitation naturelle de la quantité de tellure sur terre qui oblige la recherche à réduire au maximum son épaisseur, qui avoisine aujourd'hui 3 μm . De plus, le cadmium est toxique. Il faut tout de même préciser que celui-ci est dangereux seulement lors de la fabrication et qu'un module PV ne contient que très peu de cadmium : un module CdTe de 60W (~12 kg) contient environ 2g de Cd [7].

L'emploi du tellure de cadmium procure plusieurs avantages aux cellules. Seuls 1 à 8 μm de CdTe suffisent pour absorber une grande quantité de lumière. Les panneaux solaires rigides se comportent également mieux que les autres lorsque leur température monte, ce qui survient aux plus chaudes heures de la journée.

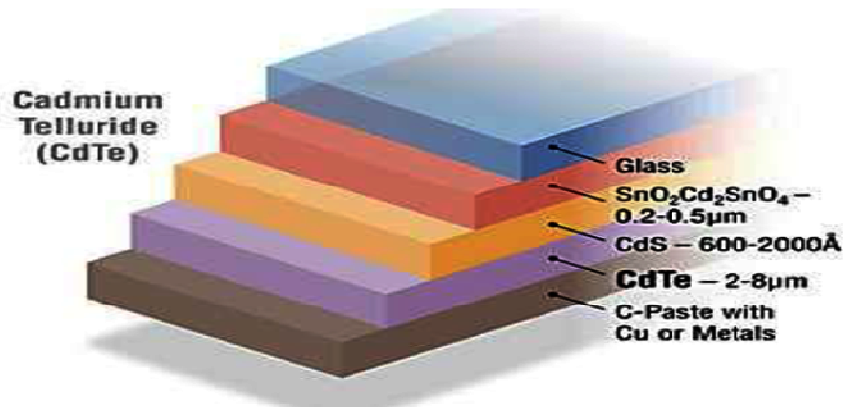


Figure (I.14): Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe.

I.6.2.3. Cellules à base cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS) :

Le CIS partage des points communs avec le CdTe : la faible disponibilité de l'indium (une centaine d'années selon Indium Corporation) oriente la recherche à travailler sur la réduction de l'épaisseur de ce composant ($2\ \mu\text{m}$ aujourd'hui). Il nécessite également une couche de CdS pour former une jonction p-n.

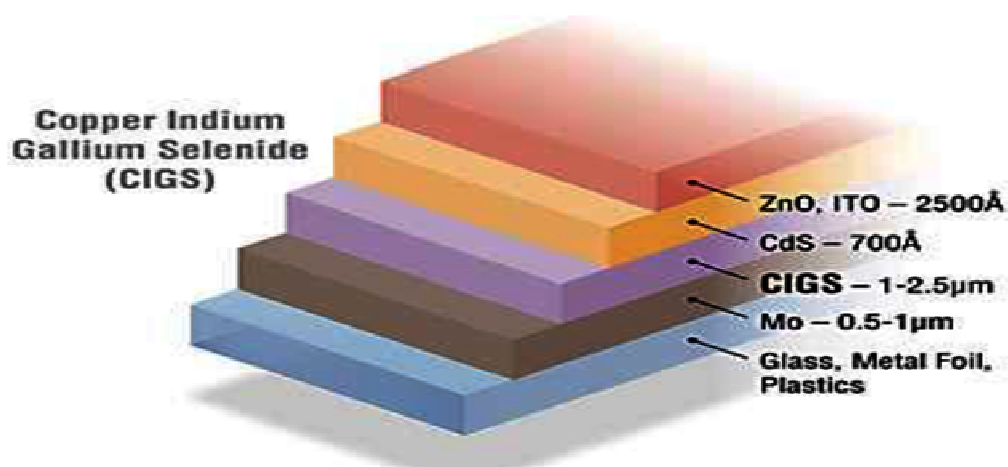


Figure (I.15) : Composition couche par couche d'une cellule photovoltaïque au CIGS.

On peut associer une quantité limitée de gallium (CIGS) pour améliorer ses propriétés d'absorption. Il présente le plus fort coefficient d'absorption des semi-conducteurs PV. Sa stabilité, son haut rendement par rapport aux autres couches minces (11 – 18 % (max 21,7%)) ainsi que son coût de fabrication relativement peu onéreux permettent à cette technologie de croître rapidement [7]. Les cellules CIGS peuvent être construites sur des supports en plastique, en verre de 1 à 3 mm d'épaisseur, ou sur des feuilles métalliques.

I.6.3. Filière des cellules à très haut rendement (GaAs) :

Le problème de GaAs est que c'est un matériau composé de deux éléments qui ont des propriétés très différentes (température de fusion (T_f) et température de vaporisation(TV)). La température de fusion T_f de Gallium est supérieure à celle de l'arsenic donc ; quand le Ga se fusionne, l'arsenic s'évapore . En plus l'As est un élément toxique. Donc des préparations très particulières sont nécessaires lors de la préparation du GaAs massif.

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

Leurs principaux avantages sont [10] :

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

La société américaine Alta Devices, spécialisée dans le PV pour des applications de haut de gamme, dévoile un rendement de conversion de 31,6% obtenu en laboratoire pour ses cellules solaires en technologie GaAs à double jonction sans concentration.

I.6.4. Filière des cellules organique :

Le solaire organique est considéré comme une nouvelle technologie basée sur les colorants et leurs propriétés physiques et en particulier optiques [10].

Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion, cette application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang montre que les rendements proches du pourcent sont atteignables, conformément aux prédictions de Merritt en 1978. La cellule, composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ». Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures).

I.6.5. Cellules à colorant :

Les cellules à base de colorant s'inspirent du mécanisme de la photosynthèse qui consiste en la libération d'un électron suite à l'absorption du rayonnement solaire par la chlorophylle (un colorant). Diverses réactions chimiques permettent par la suite la régénération de la chlorophylle. Le rendement de cette dernière est de 8 – 12 % (modules commerciaux 3 – 5%)

I.7. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, l'irradiation solaire, les grandeurs caractéristiques et les paramètres d'une cellule photovoltaïque ainsi que les différentes filières photovoltaïques.

Parmi les filières photovoltaïques nous pouvons citer la filière des couches minces ayant une grande place dans le marché photovoltaïque actuel. L'intérêt pour cette technologie est lié d'une part à son faible coût du fait de l'utilisation des couches minces donc une diminution de la quantité de matériau utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques, d'autre part due au fait de la disponibilité de la plupart des matériaux de base concernant cette filière et finalement due au fait que les rendements, liés aux recherches intensives, sont en constante progression contrairement à ceux des filières traditionnelles à base de silicium. C'est dans ce contexte que se situe notre projet de fin d'étude de Master.

Chapitre II :

Propriétés des matériaux des cellules à hétérojonction de silicium

II.1.Introduction :

Le marché mondial du photovoltaïque est en pleine croissance et actuellement dominé par les cellules basées sur un substrat en silicium. À l'intérieur de cette filière, les cellules les plus vendues sont les cellules à homojonctions en silicium polycristallin puis les cellules en silicium monocristallin. L'industrie électronique a acquis une grande expérience sur ce matériau et les coûts de production diminuent sans cesse. D'autres technologies –non silicium– sont également présentes sur le marché et prennent de plus en plus de place mais, tirée par la croissance de l'ensemble du marché photovoltaïque, la production de cellules en silicium est amenée à continuer sa progression durant les prochaines années. La forte disponibilité du silicium sur la planète reste un avantage majeur pour cette technologie.

Au sein de la filière silicium, les travaux de recherche continuent afin d'améliorer le rendement des cellules. Parmi les structures innovantes, les cellules à hétérojonctions de silicium (HET) présentent des caractéristiques intéressantes puisque le record de la filière silicium est actuellement détenu par une cellule HET. Dans ce chapitre, nous approfondirons dans un premier temps la structure d'une cellule HET. Nous étudierons ensuite les propriétés physiques du silicium cristallin et nous nous attarderons sur les caractéristiques du silicium amorphe hydrogéné.

II.2.Cellule à hétérojonctions de silicium :

Les cellules à hétérojonctions de silicium, basées sur un substrat de silicium cristallin, mettent à profit la très bonne passivation des interfaces par le silicium amorphe hydrogéné. Nous détaillerons dans cette partie la structure des cellules HET, leurs avantages et le diagramme des bandes de ces cellules.

II.2.1.Structure des cellules à hétérojonctions de silicium :

Le substrat en silicium cristallin c-Si dopé, d'une épaisseur d'une centaine de microns, joue le rôle d'absorbeur. Bien qu'il soit possible de réaliser des cellules HET sur substrat de type P, l'industrie et la recherche se sont essentiellement concentrées sur les cellules HET sur substrat de type N car elles permettent de meilleurs rendements.

La figure (II.1) présente les différentes couches de matériaux d'une structure standard d'une cellule HET. Après l'attaque chimique réalisée sur les deux faces de c-Si pour créer la texturation et diminuer la réflectivité, les couches de silicium amorphe hydrogéné a-Si:H d'une

dizaine de nanomètres sont déposées. En face avant, la couche de a-Si :H est composée de deux parties :

- une couche intrinsèque (i)a-Si:H utilisée pour passiver la surface du c-Si.
- une couche fortement dopée de type P qui joue le rôle d'émetteur de la jonction P/N.

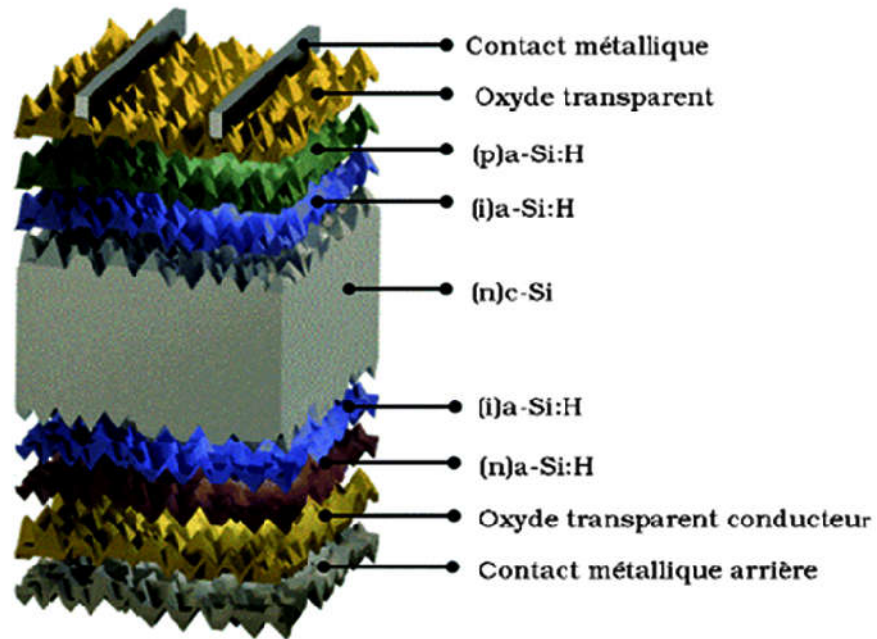


Figure (II.1) : Structure d'une cellule standard HIT

Sur le même principe, on retrouve également deux fines couches en face arrière :

- la couche (i)a-Si:H pour la passivation.
- une couche a-Si:H fortement dopée de type N pour réaliser le champ de surface arrière.

Le double fonction remplie par les dépôts de a-Si:H, en face avant comme en face arrière, permet de réduire la complexité de la structure et le nombre d'étapes de fabrication. Pour la réalisation de cellules, on dépose ensuite une centaine de nanomètres d'oxyde transparent conducteur TCO, généralement de l'oxyde d'indium dopé à l'étain ITO, qui joue le rôle de couche antireflet et permet d'augmenter la conduction latérale insuffisante dans le a-Si:H même lorsque celui-ci est dopé.

Une étape de métallisation est ensuite nécessaire pour réaliser les électrodes qui serviront à collecter les porteurs chargés.

L'ajout de la couche (i)a-Si:H à la surface du c-Si est essentiel. Sans cette couche de passivation, la concentration de centres recombinants est tellement élevée que les porteurs photogénérés dans l'absorbeur sont recombinés avant d'être extraits de la cellule. Le dépôt d'une couche de a-Si:H non dopée permet de réduire cette concentration et permet donc une meilleure passivation de la surface du silicium cristallin.

II.2.2. Avantages des cellules HIT :

La croissance de a-Si:H sur c-Si et les autres étapes de fabrication d'une cellule HIT se déroulent à basse température (moins de 250°C). Cette température peu élevée permet de réduire les risques de dégradation du substrat au cours du procédé. Le second avantage est que l'énergie nécessaire pour la fabrication de la cellule est moins importante que pour une cellule à homojonctions ce qui réduit également le coût de la cellule. Il est également possible de réduire la quantité de matériau utilisé pour diminuer le coût de la cellule. Avec l'amincissement du substrat, le rôle des interfaces est de plus en plus important, la passivation de surface joue donc un rôle essentiel. Du fait de la présence des couches de a-Si:H, les passivations des cellules HIT sont plutôt meilleures que les passivations des cellules standard. Nous reviendrons en détail sur cet aspect un peu plus loin.

En conditions réelles, la température de fonctionnement est généralement supérieure à la température de caractérisation des cellules de 25°C. Pour évaluer les performances en fonctionnement, on utilise le coefficient de température qui est le paramètre qui caractérise la variation du rendement avec la température. Pour toutes les cellules photovoltaïques, ce coefficient est négatif puisque le rendement diminue lorsque la température augmente mais les cellules HIT voient leur performances diminuer moins rapidement avec la température que les cellules à homojonctions ou les cellules en couches minces.

II.2.3. Diagramme des bandes :

À partir des énergies de bord de bande de conduction E_c et de valence E_v associées à l'énergie du niveau de Fermi E_F – potentiel électrochimique des électrons –, il est possible de construire le diagramme des bandes d'un semi conducteur.

Ce diagramme est défini à partir d'un niveau de référence $E_{vide} = 0$ appelé niveau d'énergie du vide.

L'affinité électronique $q\chi$ est l'énergie nécessaire pour extraire un électron de la bande de conduction vers le niveau du vide. Elle vaut 4.05 eV pour le silicium cristallin et 3.87 eV pour le silicium amorphe.

Le niveau de Fermi varie en fonction de la température mais surtout du dopage.

Le travail de sortie $q\Phi$ est l'énergie qu'il faut fournir au système pour extraire un électron. Il caractérise la position du niveau de Fermi par rapport au niveau du vide. La largeur de bande interdite du silicium cristallin vaut 1.12 eV à 300K et celle du silicium amorphe hydrogéné est comprise entre 1.55 eV et 2.10 eV [13].

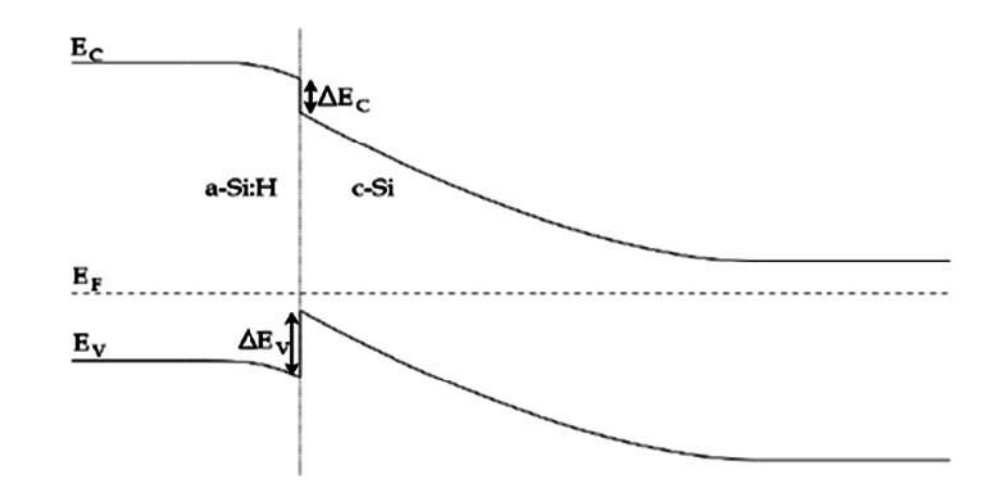


Figure (II.2) : Diagramme schématisé de la position, à l'équilibre, des bandes de conduction E_c et de valence E_v par rapport à la position du niveau de Fermi E_F pour une hétérojonction (p)a-Si:H/(n)c-Si.

À l'équilibre, le niveau de Fermi est le même dans toute la structure. En raison de la disparité du dopage dans chaque couche et des valeurs différentes du travail de sortie, une courbure des bandes apparaît. Le schéma II.2 montre un diagramme des bandes type d'une hétérojonction (p)aSi:H/(n)c-Si à l'équilibre. À cause de la différence de largeur de bande interdite des deux semiconducteurs, il existe un désaccord des bords de bande de valence caractérisé par :

$$\Delta E_v = E_v^{c-si} - E_v^{a-si:H} \quad (\text{II.1})$$

Et un écart des bords de bande de conduction quantifié par :

$$\Delta E_c = E_c^{a-si:H} - E_c^{c-si} \quad (\text{II.2})$$

II.3.Silicium cristallin :

La cellule à hétérojonctions de silicium est majoritairement constituée d'un substrat en silicium cristallin. Le silicium, même si on ne le trouve pas à l'état de corps pur dans la nature est extrêmement présent sous forme de composés en particulier dans la silice. Les propriétés de ce semiconducteur sont maintenant assez bien connues puisqu'il a fait la renommée de la Silicon Valley aux États-Unis et qu'il est massivement utilisé pour la fabrication des nombreux appareils électroniques utilisés quotidiennement sur la planète.

II.3.1.Description générale :

Le silicium est un semiconducteur simple et appartient à la colonne IV de la classification périodique des éléments. À température ambiante, il cristallise dans une structure diamant dans laquelle chaque atome de silicium est lié à quatre autres atomes dans un réseau cubique à faces centrées.

La relation de dispersion $E_{c,v}(k)$ du silicium donnée à la figure II.3 fait apparaître que le minimum de la bande de conduction E_c est décalé par rapport au maximum de la bande de valence E_v ce qui est caractéristique des semiconducteurs à gap indirect. À travers cette transition, l'interaction avec un phonon est nécessaire pour qu'un photon puisse être absorbé et produire une paire électron-trou.

La largeur du premier gap direct vaut 3.4 eV ce qui est beaucoup plus grand que la largeur de 1.12 eV du gap indirect. Les transitions radiatives sont donc largement défavorisées dans le silicium cristallin par rapport aux semiconducteurs à gap direct.

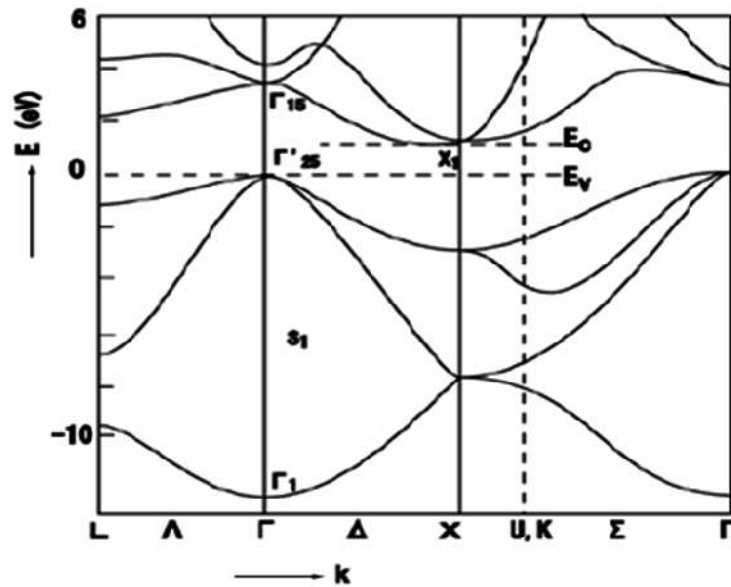


Figure (II.3) : Structure de bandes du silicium cristallin. [14]

II.3.2. Dopage du silicium cristallin :

Pour réaliser le dopage du silicium, on introduit d'autres atomes dans le réseau cristallin. Si l'on souhaite réaliser un dopage de type N, on introduit des atomes situés dans la colonne V de la classification périodique (phosphore, azote, arsenic ...). Les atomes dopants se lient à quatre atomes de silicium via des liaisons covalentes, huit électrons sont mis en commun et le neuvième électron de l'atome dopant, en excès, est délocalisé sur le réseau cristallin. L'atome dopant est ionisé X^+ et qualifié de donneur d'électrons. L'électron supplémentaire est libre dans le réseau. Dans ce type de dopage, les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous les porteurs minoritaires.

En introduisant des atomes situés dans la colonne III de classification périodique (bore, aluminium, gallium ...), les atomes dopants se lient également à quatre atomes de silicium via des liaisons covalentes et huit électrons sont alors nécessaires.

L'atome dopant s'ionise X^- en utilisant un électron du réseau cristallin. Cet atome est qualifié d'atome *accepteur* d'électrons. Un trou libre apparaît dans le réseau. Dans cette configuration, les trous sont porteurs majoritaires et les électrons porteurs minoritaires.

Pour les applications photovoltaïques, le silicium est généralement dopé avec des atomes de phosphore (type N) et de bore (type P).

Terreux		Carbonides		Azotides	
13	III A	14	IV A	15	V A
5	10.811	6	12.011	7	14.007
B		C		N	
BORE		CARBONE		AZOTE	
13	26.982	14	28.086	15	30.974
Al		Si		P	
ALUMINIUM		SILICIUM		PHOSPHORE	
31	69.723	32	72.64	33	74.922
Ga		Ge		As	
GALLIUM		GERMANIUM		ARSENIC	

Figure (II.4): Extrait de la classification périodique.

Les premières recherches sur les cellules photovoltaïques en silicium ont essentiellement été effectuées pour alimenter les premiers satellites envoyés dans l'espace.

En dehors de l'atmosphère terrestre, les matériaux subissent un plus fort bombardement de particules. Les cellules photovoltaïques à homojonctions basée sur du silicium cristallin de type P se sont montrées plus résistantes à ce type de rayonnement que les cellules de type N . L'industrie photovoltaïque des cellules à homojonctions s'est alors tournée vers l'utilisation du silicium de type P et c'est ce qui explique que le marché actuel est encore dominé par les cellules basées sur un absorbeur de type P. Cependant, pour des application terrestres, de meilleurs résultats sont obtenus, à structure identique, sur des cellules basées sur

des absorbeurs de type N . La principale raison est la présence de défauts très recombinants dans le silicium de type P, notamment les paires bore-oxygène créées sous illumination et responsables de la perte de rendement des cellules les premiers mois de fonctionnement (on parle alors de vieillissement causé par la lumière LID (Light Induced Degradation)). Les cellules basées sur du silicium de type N dopé avec du phosphore ne présentent pas ce type de défauts [14, 15].

II.3.3. Propriétés électriques :

Les propriétés électroniques du silicium cristallin dépendent de plusieurs paramètres qui ne sont pas complètement indépendants. Un premier paramètre à prendre en compte est la densité de porteurs libres à l'équilibre notée n_0 pour les électrons et p_0 pour les trous et dont les expressions sont les suivantes

$$n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{k_B T}\right)$$

$$p_0 = N_v \exp\left(-\frac{E_f - E_v}{K_B T}\right)$$

Où N_c et N_v sont respectivement les densités d'états effectives des bandes de conduction et de valence, K_B la constante de Boltzmann et T la température. À l'aide de ces concentrations, on définit également la densité de porteurs intrinsèques n_i avec l'expression suivante :

$$n_i \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2K_B T}\right) \quad (\text{II.3})$$

Les densités d'états aux bords de bandes N_c et N_v sont données par les expressions suivantes:

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_c K T}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_v K T}{h^2} \right)^{3/2}$$

Avec m_c et m_v respectivement la masse effective des électrons dans la bande de conduction et celle des trous dans la bande de valence.

La largeur de bande interdite du silicium cristallin varie avec la température. Sa paramétrisation est donnée par :

$$E_g(T) = E_g(0) + \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (\text{II.4})$$

avec l'énergie de bande interdite à température nulle $E_g(0) = 1,17$ eV et les coefficients $\alpha = 4,73 \times 10^{-4}$ eV.K⁻¹ et $\beta = 636 \pm 50$ K .

Afin de satisfaire la condition de neutralité électrique du matériau, les concentrations de charges positives et de charges négatives doivent être égales. En tenant compte des charges des atomes dopants, cette condition s'écrit :

$$n + N_\alpha^- = p + N_d^+ \quad (\text{II.5})$$

Où N_α^- et N_d^+ sont respectivement les concentrations d'atomes accepteurs ionisés et d'atomes donneurs ionisés avec $N_\alpha^- = 0$ en cas de dopage de type N et $N_d^+ = 0$

pour le dopage de type P. En régime d'épuisement des impuretés (typiquement $T > 100 K$), tous les atomes donneurs et accepteurs sont ionisés, et, pour des valeurs de $|N_a - N_d|$ grandes devant n_i , les concentrations n_0 et p_0 peuvent s'écrire simplement :

dopage type N

$$n_0 = N_d n_0 = \frac{n_i^2}{N_a}$$

dopage type P

$$p_0 = \frac{n_i^2}{N_d} p_0 = N_a$$

La mobilité μ des porteurs libres est également un autre paramètre important qui caractérise la facilité qu'ont les porteurs à se déplacer dans le matériau. Elle peut être mesurée par effet Hall ou par temps de vol

. La paramétrisation de la mobilité des porteurs majoritaires en fonction de la concentration d'atomes dopants dans c-Si est donnée par la relation suivante :

$$\mu = \mu_{i,min1} \exp\left(-\frac{P_{c,i}}{N_{dop}}\right) + \frac{\mu_{i,max} - \mu_{i,min2}}{1 + \frac{N_{dop}}{N_{i,ref1}} x_{i,1}} - \frac{\mu_{i,1}}{1 + \frac{N_{i,ref2}}{N_{dop}} x_{i,2}} \quad (II.6)$$

Avec N_{dop} la concentration d'atomes dopants. Les autres paramètres sont donnés dans le tableau II.1 :

paramètre	unité	électrons $i = n$	trous $i = p$
μ_{min1}	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$	68.5	44.9
μ_{min2}	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$		0
μ_{max}	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$	1414	470.5
μ_1	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$	56.1	29.0
P_C	cm^{-3}	0	$9,23 \times 10^{16}$
N_{ref1}	cm^{-3}	$9,20 \times 10^{16}$	$2,23 \times 10^{17}$
N_{ref2}	cm^{-3}	$3,41 \times 10^{20}$	$6,10 \times 10^{20}$
x_1	-	0.711	0.719
x_2	-	1.98	2.00

Table (II.1) : Paramètres utilisés dans le calcul de mobilité des porteurs majoritaires dans le silicium cristallin .

La mobilité des électrons est ainsi de l'ordre de $1360 cm^2.V^{-1}.s^{-1}$ et celle des trous de l'ordre de $480 cm^2.V^{-1}.s^{-1}$ pour un dopage de type N avec une concentration

$$N_{dopants} = 10^{15} cm^{-3} \text{ à la température de } 300 \text{ K.}$$

Les matériaux semiconducteurs sont souvent classés d'après leur conductivité ou résistivité. La conductivité σ est liée à la concentration des porteurs de charge et à leur mobilité :

$$\sigma = e(\mu_n n + \mu_p p) \quad (\text{II.7})$$

Avec e la charge élémentaire. La résistivité est l'inverse de la conductivité :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\text{II.8})$$

Ces paramètres dépendent comme les autres essentiellement du dopage et de la température. Pour un substrat c-Si dopé avec $N_{dop} = 10^{15} cm^{-3}$ à la température de 300 K, la résistivité vaut $4,5 \Omega.cm$ pour un dopage de type N et $13,2 \Omega.cm$ pour un dopage de type P.

II.3.4. Photogénération :

Lorsqu'un photon est absorbé par le semiconducteur, il y a création d'une paire électron-trou. Le rayonnement lumineux modifie donc la concentration de porteurs n et p dans le matériau. Les nouvelles expressions des concentrations sont :

$$n = n_0 + \Delta n \quad p = p_0 + \Delta p$$

avec Δn et Δp les concentrations de porteurs photogénérés. La quantité d'électrons et de trous photogénérés dans la cellule est la même, on a donc $\Delta p = \Delta n$.

En utilisant des expressions similaires à celles des concentrations de porteurs à l'équilibre, les concentrations des porteurs sous éclairage peuvent être écrites :

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_{Fn}}{k_B T}\right) \quad p = N_v \exp\left(-\frac{E_{Fp} - E_v}{k_B T}\right) \quad (\text{II.9})$$

en introduisant les quasi-niveaux de Fermi E_{Fn} pour les électrons et E_{Fp} pour les trous.

Dans les cellules en c-Si, le champ électrique est quasi nul dans la majorité du dispositif (sauf près des interfaces), et la neutralité électrique ainsi que la création par paires entraîne $\Delta n = \Delta p$.

On définit alors deux principaux régimes de fonctionnement en comparant Δp à la concentration de porteurs majoritaires à l'équilibre (égale à la concentration de dopants actifs) :

- régime de faible injection : $\Delta p < N_{dop}$
- régime de forte injection : $\Delta p > N_{dop}$

Dans cette situation, les concentrations de porteurs minoritaires et majoritaires sont proches.

II.3.5. Durée de vie, longueur de diffusion :

La durée de vie des porteurs minoritaires est un paramètre permettant de quantifier la qualité des matériaux. Elle est caractéristique des recombinaisons des paires électrons-trous qui réduisent les performances des cellules.

La durée de vie des porteurs minoritaires τ peut être définie comme le temps moyen entre la formation d'un porteur par photogénération et sa disparition par recombinaison. Plus la durée de vie est grande, plus le porteur aura le temps d'être extrait de la cellule et de participer au courant électrique généré. Cette durée est définie par :

$$\tau = \frac{\Delta p}{U} \quad (\text{II.10})$$

Avec U : le taux de recombinaison et Δp (ou Δn) la concentration de trous (ou d'électrons) excédentaires. Il existe plusieurs mécanismes de recombinaison au sein du matériau et en surface que nous détaillerons dans le chapitre suivant.

La longueur de diffusion des porteurs minoritaires, distance moyenne parcourue par un porteur avant sa recombinaison en l'absence de champ électrique, se calcule à l'aide de la durée de vie τ et de la diffusivité D_n :

$$L_D = \sqrt{D_n \tau} \quad (\text{II.11})$$

Afin d'optimiser l'extraction des porteurs minoritaires, cette longueur de diffusion doit être la plus grande possible et comparée à l'épaisseur de la cellule.

Bien que la quantité de silicium amorphe soit très faible dans une cellule HET, ses propriétés sont importantes puisque les couches a-Si:H jouent le rôle d'émetteur, de BSF et de passivation. Nous décrirons, dans la section suivante, les propriétés caractéristiques de ce matériau.

II.4. Silicium amorphe :

Les études sur les matériaux semiconducteurs amorphes se sont développées grâce à la recherche sur l'électrophotographie avec le sélénium dans un premier temps puis sur le silicium . Les premières couches de silicium amorphe étaient déposées par pulvérisation ou évaporation et n'étaient pas hydrogénées . À la fin des années 1960, de nouvelles techniques de dépôt utilisant la décomposition chimique du silane SiH_4 par décharge lumineuse apparaissent et permettent l'utilisation de l'hydrogène qui modifie radicalement les propriétés du matériau . Les premières cellules à base de silicium amorphe hydrogéné apparaissent en 1976 et seront utilisées quelques années plus tard dans les calculatrices. D'autres applications de ces matériaux apparaissent ensuite : transistors en couches minces, scanners optiques, écrans à cristaux liquides.

II.4.1. Description générale du matériau :

Le silicium amorphe hydrogéné a-Si:H est composé d'atomes de silicium et d'hydrogène en configuration désordonnée comme le montre la figure II.5. À cause de sa configuration désordonnée et de la présence d'hydrogène, les propriétés du silicium amorphe sont très différentes de celles du silicium cristallin : on trouve des défauts dans la matrice cristalline, de nombreux atomes de silicium non tétraédriques ainsi que des déformations des angles et longueurs des liaisons entre les atomes.

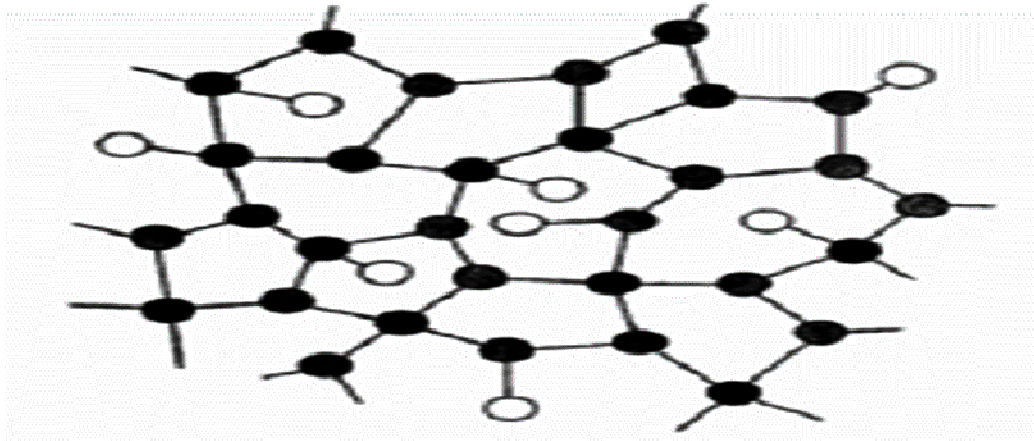


Figure (II.5) : Représentation du silicium amorphe hydrogéné. Les atomes de silicium sont représentés en noir et les atomes d'hydrogène en blanc .

Le théorème de Bloch utilisé pour la structure des bandes nécessite une structure périodique. Or, il n'existe pas de périodicité à grande échelle dans le silicium amorphe comme c'est le cas dans le réseau du silicium cristallin. Il existe cependant un ordre à courte distance ce

qui signifie qu'un atome de silicium et ses plus proches voisins sont dans une configuration proche de celle qu'ils auraient eue au sein d'un réseau cristallin. Au-delà des quatre premiers voisins, les positions relatives des atomes sur le réseau sont totalement aléatoires et il n'est plus possible de parler de matrice cristalline ; il n'existe pas d'ordre à grande distance. Cet ordre à courte distance permet de retrouver une structure de bandes, cependant la configuration désordonnée du a-Si:H modifie fortement la structure électronique par rapport à celle du silicium cristallin.

Dans un réseau cristallin, les défauts sont une rupture de la périodicité du réseau comme une lacune, une dislocation ou un atome en position interstitielle. Ces défauts n'ont pas de sens dans un matériau dans lequel il n'y a pas de réseau. La notion de défaut utilisée dans le a-Si:H fait référence aux défauts de coordination:

un atome de silicium peut avoir un excès ou un défaut de liaisons covalentes.

Le nombre de liaisons excédentaires ou en défaut de chaque atome de silicium par rapport à la configuration tétravalente est caractérisé par l'indice i_C de coordination :

$$i_C = -2 : \text{Lacune double } Si_{(2)}$$

$$i_C = -1 : \text{Liaison pendante } Si_{(3)}$$

$i_C = 0$: Liaison faible $Si_{(4)}$

$i_C = 1$: Liaison flottante $Si_{(5)}$

Les défauts du type liaisons pendantes ou Dangling Bonds sont les plus nombreux dans le a-Si:H et sont notés D [16].

II.4.2. Rôle de l'hydrogène :

Le silicium amorphe non hydrogéné a une densité de défauts profonds dus aux liaisons pendantes de l'ordre de $10^{19} cm^{-3}$. L'hydrogène incorporé passive la majorité des liaisons pendantes à travers l'équilibre représenté à la figure II.6. Hydrogéné, le silicium amorphe est donc beaucoup moins défectueux puisque la densité de défauts profonds est de l'ordre de $10^{16} cm^{-3}$. Il devient donc bien meilleur photoconducteur.

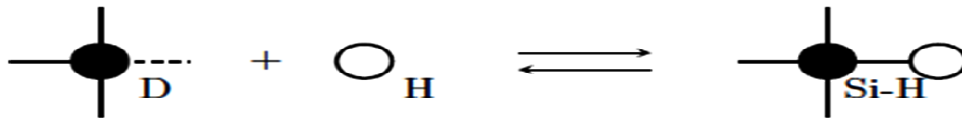


Figure (II.6) : Équilibre de passivation des liaisons pendantes des atomes de silicium par l'hydrogène dans a-Si:H.

La réduction des défauts augmente l'efficacité des atomes dopants. L'introduction d'hydrogène facilite donc la variation du niveau de Fermi avec le dopage des couches [17].

L'hydrogène a également la capacité d'élargir le gap du silicium amorphe. La largeur de bande interdite de a-Si vaut environ 1, 2 eV et peut atteindre 2.10 eV pour les matériaux a-Si:H comportant une forte concentration d'hydrogène [13].

II.4.3. Procédé de fabrication :

Depuis les années 1970, la technique adoptée industriellement et dans les laboratoires pour la synthèse des couches de a-Si:H est le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma radiofréquence [19] dit *PECVD* (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition). La figure II.7 présente un schéma de réacteur PECVD.

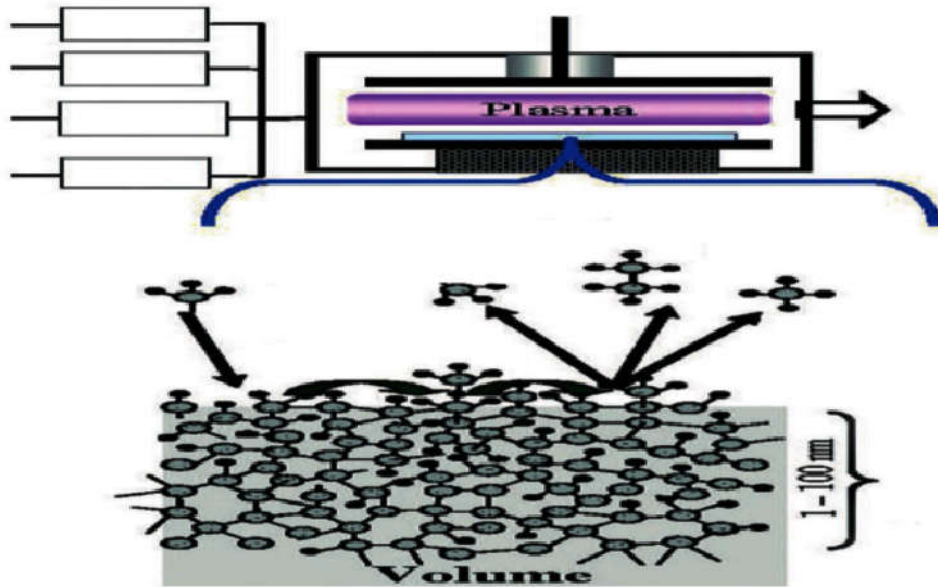


Figure (II.7) : Dépôt de a-Si:H par décomposition chimique des gaz réactifs dans un plasma de décharge .

Le dépôt se déroule à relativement basse température et peut se réaliser sur une très grande surface. Il existe d'autres méthodes de dépôt chimique en phase vapeur *CVD* (Chemical Vapor Deposition) comme la *CVD* à plasma micro-ondes qui est un plasma à haute densité ou la *CVD* assistée par filament chaud qui engendre une formation plus importante de radicaux.

II.4.4. Densité d'états :

Dans l'approximation de Born-Oppenheimer, le mouvement des électrons de valence est découplé de celui des ions de coeur. Les électrons de valence subissent un potentiel effectif résultant des ions de coeur et des autres électrons de valence. La distorsion des angles des liaisons et la modification des distances interatomiques modifient les potentiels effectifs et conduisent à la création d'états électroniques localisés dans la bande interdite à proximité des bandes de valence et de conduction que l'on appelle queues de bandes.

Les liaisons pendantes et les impuretés font apparaître des états électroniques vers le milieu de la bande interdite que l'on qualifie de défauts profonds. La représentation d'états typique dans le silicium amorphe hydrogéné. Les bords de bandes de a-Si:H sont moins abrupts que ceux de c-Si.

Les états dans ces queues de bandes sont localisés et participent à l'absorption des photons. Le gap optique E_g est principalement défini de deux manières :

- E_{04} pour lequel on définit la largeur du gap optique comme l'énergie pour laquelle le coefficient d'absorption vaut $\alpha = 10^{-4} \text{cm}^{-1}$
- gap de Tauc qui suppose des bandes d'absorption paraboliques ce qui implique

$$\alpha E = B(E - E_{g, \text{Tauc}})^2 \quad (\text{II.12})$$

Avec E l'énergie des photons et $E_{g, \text{Tauc}}$ la largeur de bande interdite au sens de Tauc.

Entre E_v et E_c , la conduction se fait par transition entre les états localisés, la mobilité μ est donc très faible et c'est ainsi que l'on définit le gap de mobilité $E_\mu = E_c - E_v$.

Le gap optique E_g est donc plus petit que le gap de mobilité E_μ avec une différence comprise entre 0.1 et 0.2 eV dans le cas de a-Si:H [18].

Les densités d'états de la queue de bande de valence $N_{QBV}(E)$ et de la queue de bande de conduction $N_{QBC}(E)$ sont généralement définies à l'aide de distribution exponentielles :

$$N_{QBV}(E) = N_V \exp\left(-\frac{E - E_v}{K_B T_V}\right) \quad \text{et} \quad N_{QBC}(E) = N_C \exp\left(\frac{E_c - E}{K_B T_C}\right) \quad (\text{II.13})$$

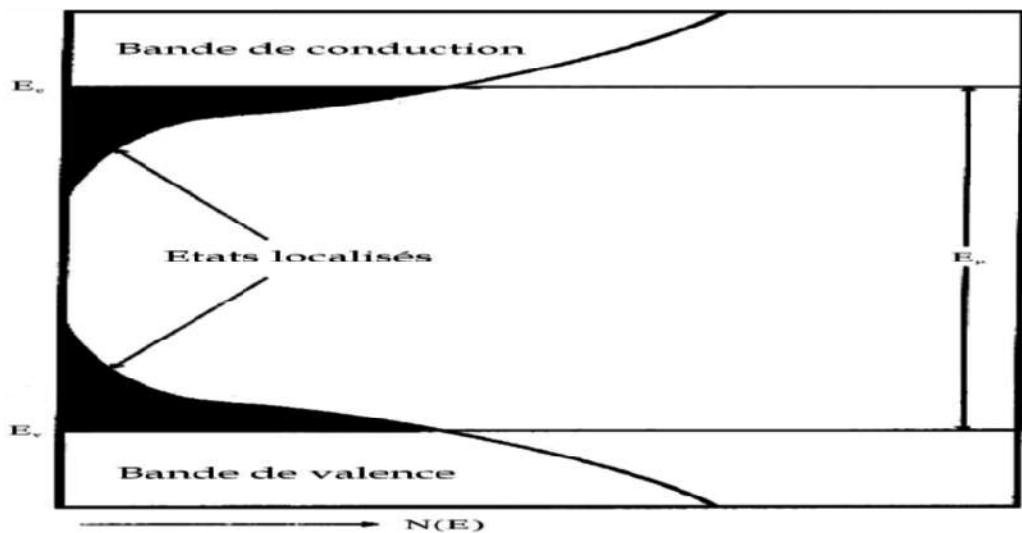


Figure (II.8) : Densité d'états $N(E)$ typique de a-Si:H .

Avec N_V et N_C les densités d'états d'intersection en bord de bande et T_V et T_C des grandeurs de la dimension d'une température et caractéristiques de la largeur des queues de bandes. La largeur de la queue de bande de valence – aussi appelée *énergie d'Urbach* – $E_u = K_B T_V$ est associée au désordre dans le matériau. Les états de la bande de valence sont

généralement associés à des défauts donneurs ($0/+$) et ceux de la bande de conduction à des défauts accepteurs ($0/-$).

Les défauts profonds et les queues de bandes n'étant pas complètement indépendants, un modèle complet a été initié par Winer en 1990 et a ensuite surtout été développé par Powell et Deane sous le nom de réservoir de défauts DPM (Defect-Pool Model).

II.4.4.1. Dopage du silicium amorphe :

Dans le cas du silicium cristallin, nous avons vu que l'introduction des atomes dopants dans la structure cristalline entraîne l'apparition de porteurs libres dans la bande de conduction ou de valence. Dans le cas du silicium amorphe, à cause de l'absence de matrice cristalline, la configuration tétraédrique n'est plus la configuration privilégiée par les atomes dopants. Même si le dopage est facilité dans a-Si:H par rapport à a-Si grâce à la passivation des défauts, l'efficacité reste faible. Une grande proportion – de l'ordre de 99% – des atomes dopants ne s'ionisent pas et ne libèrent donc pas de porteurs libres.

De plus, parmi la quantité relativement faible de porteurs libérés par les atomes dopants, la majorité est piégée par les liaisons pendantes. Au final, la proportion de porteurs libres par rapport à la quantité d'atomes dopants est de l'ordre de 10^{-4} [19].

Comme dans le silicium cristallin, le dopage fait varier le niveau de Fermi. L'introduction d'une grande concentration de dopants dans a-Si:H provoque l'augmentation de la densité des défauts profonds. Il est intéressant de noter que a-Si:H est intrinsèquement légèrement de type N puisque le niveau de Fermi est plus proche de E_C que de E_V . Un micro-dopage de type P permet donc de réduire légèrement la quantité de défauts profonds [20].

II.5. Conclusion :

Les cellules à hétérojonctions de silicium tirent parti des propriétés du silicium cristallin et du silicium amorphe. Le silicium cristallin est un matériau bien maîtrisé par l'industrie, qui possède une bonne mobilité et dont la largeur de bande interdite est bien adaptée pour une cellule photovoltaïque à une seule jonction. Les propriétés du silicium amorphe varient beaucoup en fonction de la concentration d'hydrogène et de la position du niveau de Fermi. Le rôle de l'hydrogène au sein de a-Si:H est multiple et complexe mais il offre l'avantage d'élargir la bande interdite et de réduire considérablement les défauts de coordination, principalement les liaisons pendantes, en formant des liaisons Si-H. Cette réduction des défauts permet aussi le dopage du matériau. Le dépôt de a-Si:H sur le silicium cristallin se réalise à température peu élevée et permet de réduire les coûts de fabrication.

Les propriétés physiques des cellules HET ne se limitent cependant pas aux phénomènes ayant lieu à l'intérieur de ces deux matériaux mais dépend également des interfaces. En particulier, il est important de tenir compte de l'interface entre a-Si:H et le silicium cristallin. Le décalage de bandes entre a-Si:H et c-Si et les défauts d'interface influencés par la courbure de bandes jouent un rôle essentiel dans la recombinaison des porteurs et le rendement global de la cellule.

Chapitre III :

Cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium a-Si/c-Si

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on étudiera, théoriquement, les cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium où on va aborder la définition, le développement, les différentes couches de là ce type de cellules. D'autre part, les concentrations des porteurs, la mobilité, la conductivité et les différents types de recombinaisons seront traités.

III.2. Combinaison entre a-Si :H/c-Si :

III.2.1. Principe :

Les cellules photovoltaïques à hétérojonction sont obtenues lorsque on entre en contact deux matériaux de différente énergie de gap (Eg) [22]. L'hétérojonction de silicium résulte par la mise en contact le silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H) qui a une énergie de gap entre 1.5 eV et 1.9 eV avec le silicium cristallin (c-Si) qui a une énergie de gap égale à 1.12 eV [21] telle que chaque région de l'hétérojonction (amorphe/cristallin) est d'un dopage différent d'un l'autre.

Généralement de nombreux centres de recherche et laboratoires ont entrepris des recherches utilisant un substrat en silicium cristallin dopé p. Ils se basent sur le même type de structure utilisé par les japonais mais avec un substrat de type différent. Jusqu'à présent, ce sont les rendements obtenus par les japonais sur un substrat de type n qui restent les meilleurs. [23]

III.2.2. Historique :

Les premières idées de fabriquer une cellule solaire à hétérojonction à partir d'utilisation de silicium a été proposée en 1972 par Fuhs et Al. En 1983, à l'utilisation de silicium amorphe hydrogéné et silicium cristallin, la première cellule photovoltaïque a été fabriquée par Okuda avec un rendement de 12.4%. Les chercheurs de l'entreprise japonaise « SANYO » se sont intéressés à cette structure telle qu'elle a été la première entité qui a appliqué l'idée avec succès. Elle a commencé ces premiers travaux en 1980, et sa première publication a été en 1991. En octobre 1997 la production industrielle a débuté pour des cellules de 100 cm^2 avec un rendement de 17.3%. Sanyo a réussi avec cette technologie à prendre 8% de la vente mondiale. Cette réussite industrielle est due aux multiples avantages de la structure HIT. La première cellule solaire à hétérojonction de silicium réalisée par l'entreprise Sanyo, comportée une couche de silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H) de type p qui a été déposée directement sur une tranche de silicium cristallin (c-Si) de type n pour former la cellule solaire à hétérojonction (figure III.1).

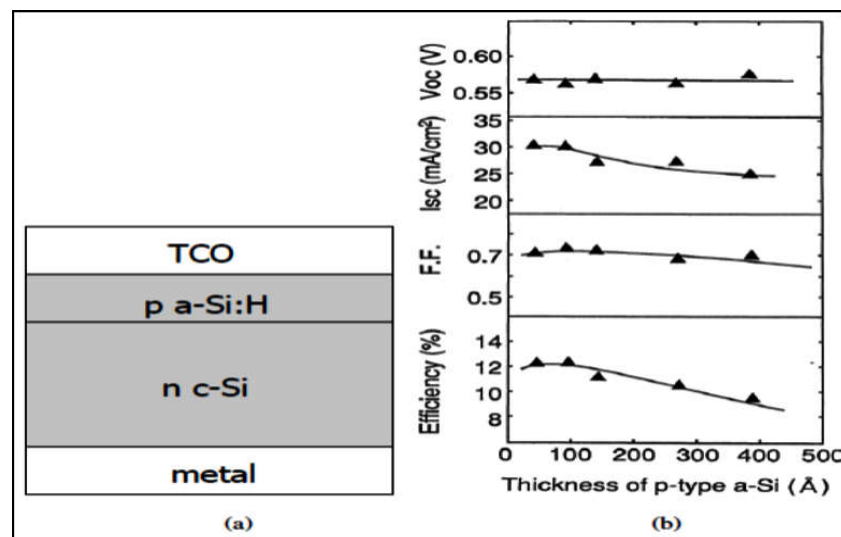


Figure (III 1): a) Structure schématique des cellules solaires à hétérojonction a-Si: H / c-Si faites par Sanyo et b) performance de la cellule solaire en fonction de l'épaisseur de a-Si: H de type p.

Avec cette cellule solaire, Sanyo a atteint un rendement de 12,3%. La figure (III.1-b) montre l'effet de l'épaisseur de la couche a-Si: H de type p sur les paramètres externes de la cellule solaire à hétérojonction. La cellule présentait un V_{co} et FF relativement bas en raison de sa densité d'état de défaut à l'interface a-Si : H / c-Si. Une augmentation de l'épaisseur de la couche a-Si : H de type p entraîne une diminution de J_{sc} , due à l'absorption pertes dans le a-Si : H.

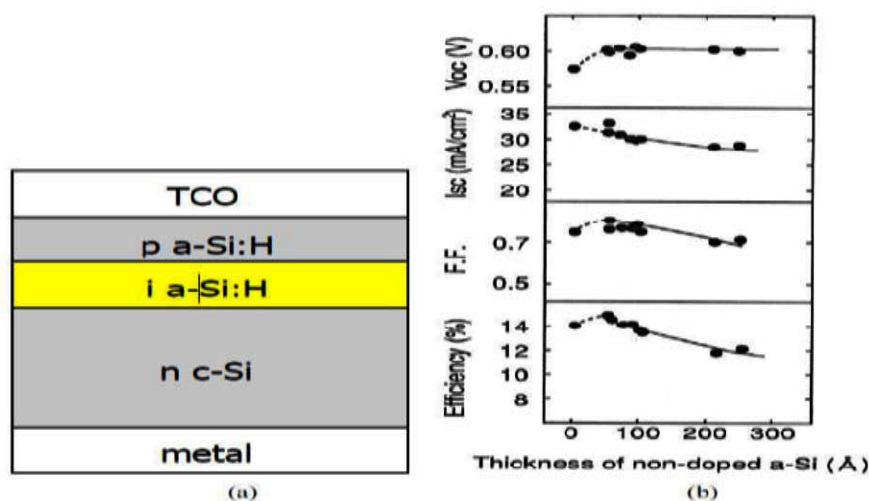


Figure (III 2): a) Structure schématique des cellules solaires ACJ-HIT fabriquées par Sanyo b) performance de la cellule solaire en fonction de l'épaisseur a-Si: H intrinsèque.

Dans le but d'améliorer cette cellule, Sanyo a incorporé une mince couche a-Si: H intrinsèque entre la plaquette c-Si de type n et l'a-Si: H de type p (figure III.2) pour but de passiver les liaisons pendantes sur la surface c-Si. En conséquence, la densité de l'état de défaut de l'interface a-Si: H / c-Si était

significativement réduite, ce qui a entraîné une amélioration du V_{co} et du FF. Sanyo a appelé cette structure la cellule solaire ACJ-HIT (jonction-hétérojonction artificielle avec film mince intrinsèque).

La figure (III.2.b) montre qu'il existe une épaisseur optimale pour les couches a-Si: H intrinsèque et de type p. Le rendement le plus élevé de 14,8% a été obtenu pour une cellule solaire HIT avec une couche intrinsèque a-Si: H de 4 nm d'épaisseur.

La performance de la cellule solaire HIT a encore été améliorée par l'introduction de surfaces texturées pour la capture de la lumière, et l'inclusion d'un BSF sur le côté arrière de la cellule solaire (figure III.3). Les surfaces texturées aident à réduire la réflexion de surface et à augmenter la longueur moyenne du chemin optique à l'intérieur de la plaquette, ce qui augmente la densité de courant J_{cc} . Cependant, la texturation de surface augmente également la surface totale, ce qui peut entraîner une augmentation de la densité de l'état de défaut de surface, elle sera compensée par le BSF, ce qui réduit la recombinaison du support à l'arrière de la plaquette. L'inclusion de la texturation de surface et du BSF a permis des rendements de cellules solaires HIT aussi élevés que 18,1%.

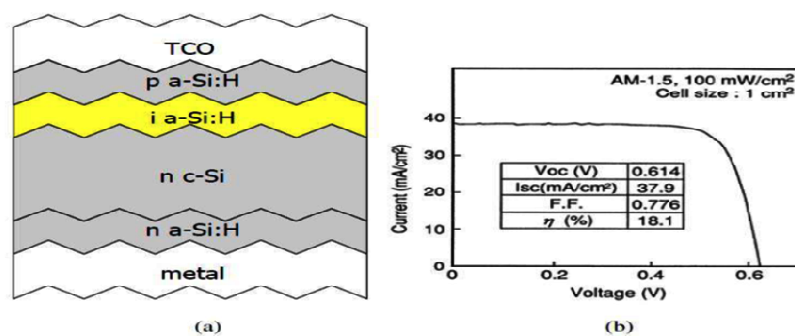


Figure (III.3): a) Structure schématique et b) caractéristique I-V de la cellule solaire HIT avec surface texturé et BSF.

Au cours de l'étape suivante, Sanyo a appliqué une passivation double face à la plaquette. Cela a entraîné une augmentation du V_{co} à 0,717 V et un rendement à 21,3%. De plus, Sanyo a conçu une structure de cellule solaire HIT hautement symétrique (figure III.4). La symétrie dans

la structure des cellules solaires aide à supprimer les contraintes thermiques et mécaniques dans les plaquettes pendant le processus de fabrication, comme elle permet également l'illumination de la cellule des deux côtés. Sanyo a démontré qu'un module HIT correctement orienté peut générer plus de puissance lorsqu'il est éclairé des deux côtés qu'un module éclairé d'un côté.

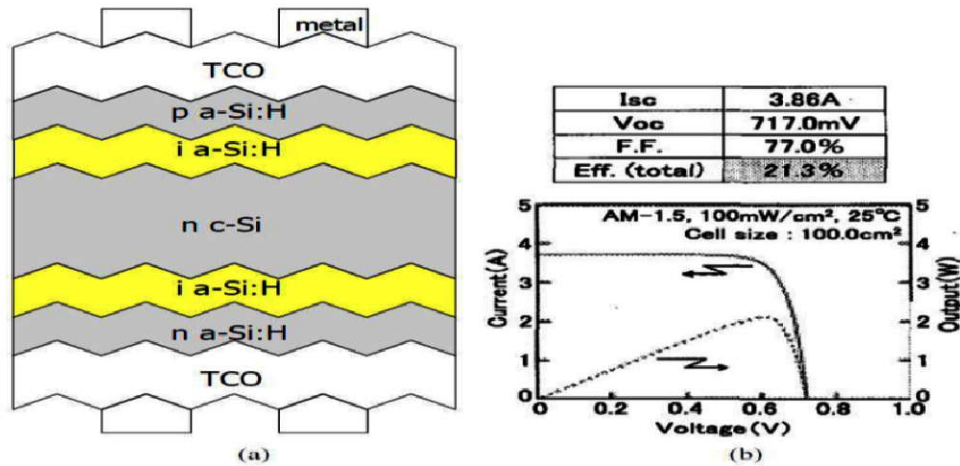


Figure (III.4): a) Structure symétrique schématique de la cellule solaire HIT avec passivation recto-verso. b) sa caractéristique I-V.

En 2008, Sanyo avait atteint des rendements de cellules solaires HIT atteignant 22,3%.

Sanyo a décrit trois étapes clés qui ont contribué à cette réussite. La première étape a été l'amélioration de la qualité de l'hétérojonction a-Si: H/c-Si. Ceci a été obtenu par un nettoyage amélioré de la plaquette c-Si avant le dépôt des couches a-Si: H, l'utilisation de couches a-Si: H de haute qualité et la réduction des dommages plasmatiques et thermiques causés à la surface c-Si pendant le traitement. La deuxième étape était l'amélioration des électrodes de la grille; le rapport d'aspect des doigts de grille, qui est le rapport entre la hauteur du doigt et sa largeur, doit être le plus élevé possible afin de réduire la surface ombrée par les électrodes de grille. La troisième étape était la réduction de l'absorption dans les couches a-Si: H et TCO en appliquant des alliages a-Si: H à large gap, et en augmentant la mobilité du TCO au lieu de la concentration du porteur.

Une optimisation supplémentaire des matériaux et du traitement a donné lieu à une cellule solaire HIT avec une efficacité record de 23%, annoncée par Sanyo en mai 2009. Le traitement à basse température et la structure hautement symétrique des cellules solaires HIT permettent l'utilisation de plaquettes ultrafines.

Sanyo a commencé la production commerciale des cellules solaires HIT en 1997. Sa capacité de production continue d'augmenter, ce qui suggère un énorme potentiel de marché pour les cellules solaires HIT.

III.3. Technique de dépôt du silicium amorphe hydrogéné a-Si: H:

Les couches de silicium amorphes dopées par la méthode PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) sont déposées directement sur le substrat. Il est ici important de préciser que toutes les opérations de fabrications industrielles se font à une température maximale de 200°C. La symétrie permet d'obtenir un éclairage des deux côtés. Ces deux avantages (structure symétrique et fabrication à basse température) permettent l'utilisation de substrats minces. Le gaz qui est envoyé à faible pression (13 à 1 300 Pa) dans une enceinte à vide propre, contenant deux électrodes. Pour une tension suffisante, une décharge électrique s'établit entre les électrodes conduisant à la décomposition du silane en éléments chimiques très actifs : radicaux Si, Si-H, Si-H₂⁺, Si-H₃⁺ accompagnés des espèces ioniques correspondantes, Si-H₄⁺, Si-H₃⁺ et Si-H₂⁺ et Si-H₃⁺. Le plasma contient aussi des électrons et des ions négatifs qui assurent la neutralité électrique globale [24].

III.4. Les composants principaux de la cellule à hétérojonction de silicium :

III.4.1. L'oxyde transparent conducteur (TCO) :

Les oxydes transparents conducteurs sont des matériaux à grand gap (supérieur à 3,5 eV). Ces matériaux doivent avoir certaines propriétés :

- Une excellente transparence optique, afin de laisser suffisamment de lumière à la région de jonction et la couche absorbante du dispositif.
- Une bonne conductivité, pour permettre le transport du photo-courant généré au circuit extérieur sans trop de pertes.
- Une bonne adhérence sur une variété de substrats.

La conductivité du silicium amorphe est très inférieure à celle du Silicium cristallin, il faut donc ajouter une couche conductrice sur toute sa surface afin de pouvoir collecter le courant. C'est à dire ajouter une couche TCO Sur la face illuminée de la cellule qui va permettre de collecter le courant. Elle assure également un bon contact avec les électrodes métalliques, tout en jouant le rôle de couche antireflet.

Il existe une grande variété d'oxydes transparents conducteurs possibles, tels que les oxydes de zinc, les oxydes d'étain et les oxydes d'indium qui peuvent être dopés avec un grand nombre d'éléments atomiques (selon les cas : Al, In, Ga, F, Sn) [25].

III.4.2.La couche tampon :

La couche tampon est une couche située entre la couche absorbante et la couche d'oxyde transparent conducteur (TCO) afin d'optimiser les performances de la cellule.

Cette couche doit avoir les propriétés suivantes :

- Une bande interdite intermédiaire permettant une transition "*souple*" entre celle du semi-conducteur et celle de TCO, soit une valeur comprise entre 2,4 et 3,2 eV.
- Une conductivité de type n pour former la jonction avec la couche absorbante qui est, elle, de type p ; de plus, afin d'éviter les effets de fuites de courant, sa conductivité doit être plus faible que celle de la couche absorbante.
- Elle doit être morphologiquement très homogène pour éviter tout effet de court-circuit au niveau des joints de grains

Dans le cas d'une cellule à hétérojonction de silicium, la couche tampon est une couche de silicium amorphe hydrogéné d'une épaisseur de quelques nanomètres qui est déposées grâce à la technique de CVD assistée par plasma ou par filament chaud (Plasma Enhanced CVD et Hot Wire CVD) [27].

III.4.3.La couche absorbante :

La couche absorbante est la partie de la cellule dans laquelle les photons vont être convertis en paires électrons-trous, une couche absorbante doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, autrement dit la valeur de sa bande interdite directe (gap), soit de l'ordre de 1,1 à 1,7 eV.

Dans le cas d'une cellule à hétérojonction de silicium l'absorbeur est le silicium cristallin [26].

III.5.Diagramme des bandes :

À partir des énergies de bord de bande de conduction E_C et de valence E_V associées à l'énergie du niveau de Fermi E_F , il est possible de construire le diagramme des bandes d'un semi-conducteur. Ce diagramme est défini à partir d'un niveau de référence $E_{vac} = 0$ appelé

niveau d'énergie du vide . A l'équilibre, le schéma suivant représente la position des bandes de conduction et de valence par rapport au niveau de fermi.

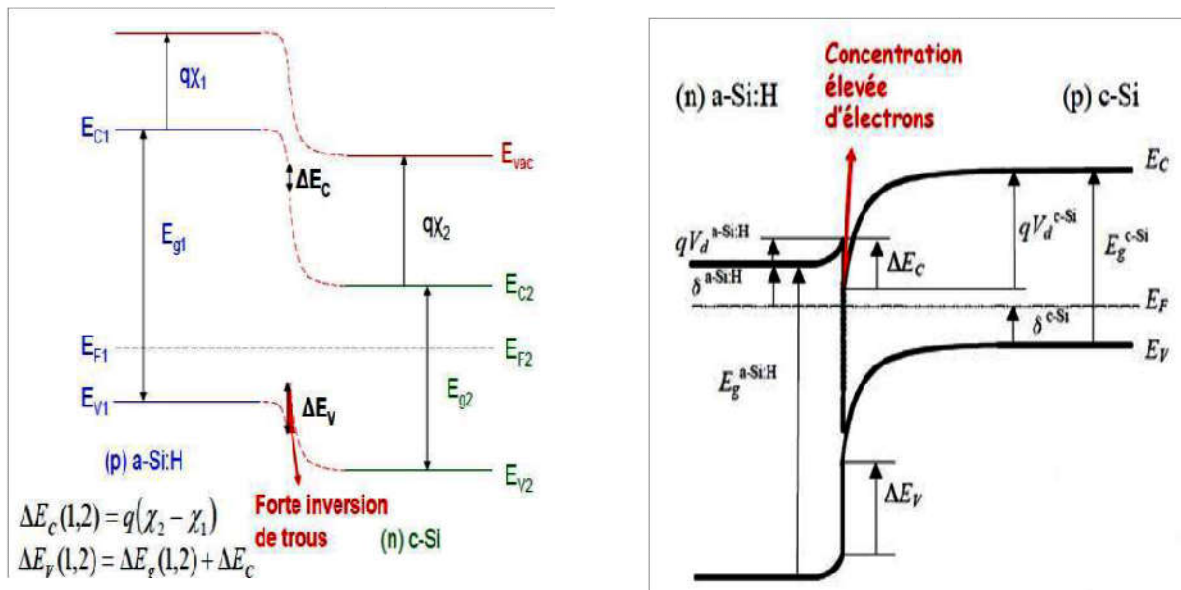


Figure (III.5): diagramme des bandes type d'une hétérojonction à l'équilibre 1) a-Si:H(p)/ c-Si(n) ; 2) a-Si:H(n)/ c-Si(p).

Le niveau de Fermi varie en fonction de la température mais surtout du dopage. À l'équilibre, le niveau de Fermi est le même dans toute la structure

L'affinité électronique ($q\chi$) est l'énergie nécessaire pour extraire un électron de la bande de conduction vers le niveau du vide. Elle vaut 4.05 eV pour le silicium cristallin et 3.87 eV pour le silicium amorphe.

III.6. Propriétés électriques :

Les propriétés électriques du silicium dépendent des paramètres cités dessous : [27]

III.6.1. Concentration des porteurs de charge libres :

Le premier paramètre à prendre en compte est la densité de porteurs libres à l'équilibre notée (n_0) pour les électrons et (p_0) pour les trous et dont les expressions sont les suivantes

$$n_0 = Nc \cdot \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{K_B T}\right) \quad \text{et} \quad p_0 = Nv \cdot \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{K_B T}\right) \quad \text{(III. 1)}$$

Où Nc et Nv sont respectivement les densités d'états effectives des bandes de conduction et de valence, K_B la constante de Boltzmann et T la température.

À l'aide de ces concentrations, on définit également la densité de porteurs intrinsèques (n_i) avec l'expression suivante :

$$n_i = \sqrt{n_0 \cdot p_0} = q \cdot N_c \cdot N_v \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right) \quad (\text{III.2})$$

Dans le cas où le matériau est dopé et que tous les atomes donneurs et accepteurs sont ionisés, les concentrations n_0 et p_0 peuvent s'écrire simplement :

Dopage type N

$$n_0 = N_d n_0 = \frac{n_i^2}{N_a} \quad (\text{III.3})$$

Dopage type P

$$p_0 = \frac{n_i^2}{N_d} p_0 = N_a \quad (\text{III.4})$$

N_a et N_d sont respectivement les concentrations d'atomes accepteurs et donneurs.

III.6.2. Mobilité des porteurs :

La mobilité (μ) des porteurs libres est également un autre paramètre important qui caractérise la facilité qu'ont les porteurs à se déplacer dans le matériau. Elle peut être mesurée par effet Hall ou par temps de vol. Elle dépend essentiellement de la température et du dopage.

Pour un dopage de type N avec une concentration $N_d = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ à une température de 300K, la mobilité des électrons est égale à $1360 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$ et celle des trous $480 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$.

III.6.3. Conductivité et résistivité :

Les matériaux semi-conducteurs sont souvent classés d'après leur conductivité ou résistivité. La conductivité σ est liée à la concentration des porteurs de charge et à leur mobilité :

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (\text{III.5})$$

Avec q la charge élémentaire.

La résistivité est l'inverse de la conductivité :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\text{III.6})$$

Ces paramètres dépendent comme les autres essentiellement du dopage et de la température.

Pour un substrat c-Si dopé avec $N_{dop} = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ à la température de 300 K, la résistivité vaut 4, 5 $\Omega \cdot \text{cm}$ pour un dopage de type N et 13, 2 $\Omega \cdot \text{cm}$ pour un dopage de type P.

III.6.4.Recombinaisons des porteurs libres :

La recombinaison des porteurs de charge influe sur le fonctionnement de la cellule et limite ses performances. En effet les électrons libres dans le semi-conducteur en tendance à se recombiner avec les trous, et lorsque ce phénomène ce produit, l'électron perd de l'énergie et cesse d'être un porteur libre.

La recombinaison dans un semi-conducteur se manifeste selon plusieurs mécanismes.

➤ Recombinaison radiative

Le processus de la recombinaison radiative ou inter-bandes est définit comme l'inverse du processus de la photo-génération. Ce processus est faible pour les matériaux à gaps indirects comme le Silicium [28].

➤ Recombinaisons Shockley-Read-Hall

La recombinaison Shockley-Read-Hall est universellement utilisée pour décrire les processus de recombinaison dans la bande interdite des matériaux semi-conducteurs. [28]

Les défauts présents dans le réseau cristallin peuvent jouer le rôle de centres recombinants pour les charges libres. Ces centres recombinants ont une énergie E_t située vers le milieu de la bande interdite. [27]

➤ Recombinaison Auger

La recombinaison Auger est décrite par un mécanisme faisant intervenir trois entités. Lors de la recombinaison d'un électron de la bande de conduction et d'un trou de la bande de valence, l'énergie excédentaire est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre porteur libre (électron ou trou). Ce porteur perd alors progressivement son énergie par thermalisation. [28]

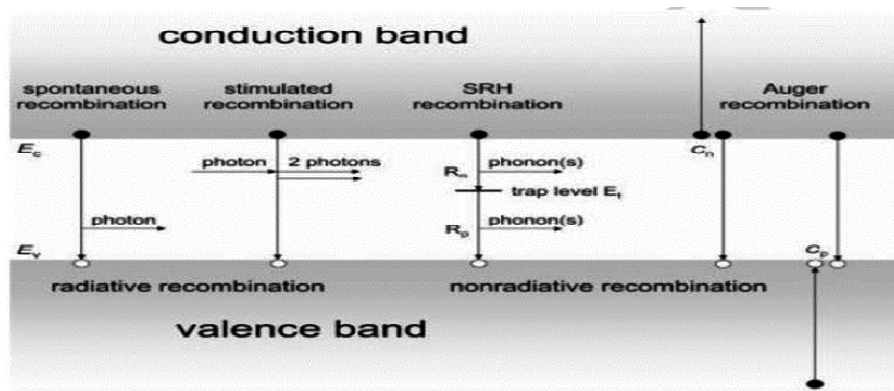


Figure (III .6): Schéma des principaux processus de recombinaisons dans les semi-conducteurs. Les directions des flèches indiquent la transition des électrons.

➤ Recombinaison de surface

Les porteurs de charge (électrons ou trous) peuvent être générés ou recombinaison à la surface du semi-conducteur en plus de la recombinaison de génération en masse [28].

En l'absence de traitement, on peut trouver à la surface du silicium cristallin des impuretés métalliques provenant de la découpe du substrat. De plus, suite à cette découpe, de nombreux atomes à proximité de la surface vont posséder des liaisons insatisfaites. Enfin, laissé à l'air libre pendant quelques heures, le substrat de silicium subit un phénomène d'oxydation qui crée de nouveaux défauts. Le traitement chimique permet d'éliminer une majorité des défauts, mais il reste cependant de nombreuses liaisons pendantes en surface responsables des recombinaison surfaciques [27].

III.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié les cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium en parlons de sa définition, son développement, les différentes couches d'une structure a-Si/c-Si ainsi une modélisation numérique de la mobilité, la concentration des porteurs et les différents types de la recombinaison.

Chapitre IV :

Simulation numérique et interprétation des résultats

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente une partie importante de notre travail. Il porte essentiellement sur l'étude, par modélisation numérique, l'influence des paramètres de la cellule solaire à base de c-Si:H(n)/a-Si:H(p) en utilisant le modèle analytique. Nous chercherons la composition optimale et les paramètres physiques, géométriques optimaux de la couche active (absorbante) qui assureront les meilleures caractéristiques de sortie de la cellule à savoir ; le rendement de conversion en puissance et le rendement quantique.

IV.2 Programme de simulation (SCAPS) :

SCAPS est un logiciel de simulation des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électronique et informatique (ELIS) de l'Université de Gent ,Belgique . Plusieurs chercheurs ont contribué à son développement : Marc Burgelman , Koen Decock , Johan Verschraegen , Alex Niemegeers , Stefaan Degraeve [20 – 25] .

Une description du logiciel , et les algorithmes qu'il utilise , se trouve dans la littérature. Le logiciel est disponible gratuitement pour la communauté de la recherche de photovoltaïques (établissements et Instituts de recherche) . Il fonctionne sur PC sous Windows 95 ,98 , NT, 2000 , XP , Vista , Windows 7 , et occupe environ 50 Mo d'espace disque.

SCAPS est développé à l'origine pour des structures des cellules de a-Si(n)/c-Si(p) et a-Si(n)/c-Si(p)/a-Si(p) . Cependant, Plusieurs versions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour des cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et des cellules amorphes (a-Si et de Si micro-morphe) .

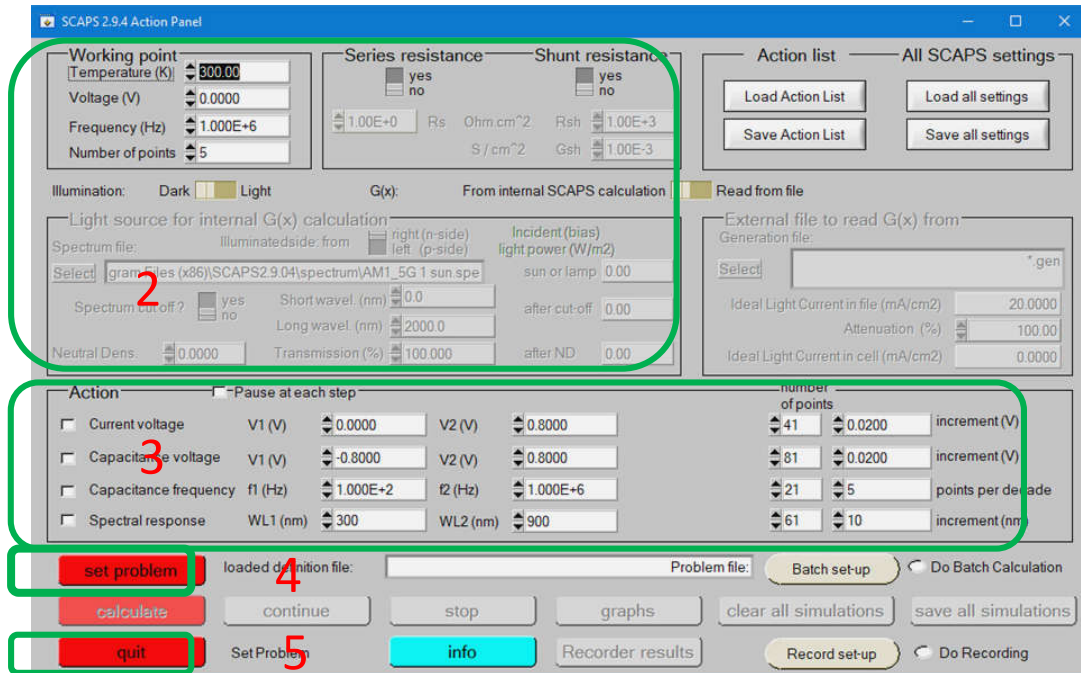
Un aperçu de ses caractéristiques principales est donné ci-dessous :

- Jusqu'à 7 couches semi-conducteurs.
- Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec variations graduées (indépendance de la composition et de la profondeur de la cellule) : Par exemple , χ , ε , N_C , N_V , V_{thn} , V_{thp} , μ_n , μ_p , N_A , N_D , tous les pièges (défauts) N_t .
- Mécanismes de recombinaison : bande à bande (direct), la SRH Auger.
- les niveaux de défauts : en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux.

- Les niveaux des défauts, type de charge : pas de charge (neutre), monovalent (un seuldonneur, accepteur), divalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
- Les niveaux des défauts, distribution énergétique : niveau discret, uniforme, Gauss, sousforme de queue ou bien une combinaison.
- Les niveaux des défauts, propriété optique : Excitation directe par la lumière est possible(connu par effet de l'impureté photovoltaïque, IPV).
- Les niveaux des défauts, transitions métastables entre les niveaux.
- Contacts : Travail de sortie du métal ou régime de bande plate ; Propriété optique(Réflexion ou transmission) du filtre.
- Tunneling, inter-bandes (dans la bande de conduction ou dans la bande de valence), tunneling à/ou à partir des états de l'interface.
- Génération : à partir d'un calcul interne ou bien d'un fichier $g(x)$ fourni par l'utilisateur.
- Illumination: du côté p ou n.
- points pour les calculs de travail : la tension , la fréquence , la température.
- le logiciel calcule les bandes d'énergie , les concentrations et les courants à un point defonctionnement donné les caractéristiques (JV) , les caractéristiques du courant alternatif(C et G en fonction de V et f ou f) , la réponse spectrale (également avec polarisationlumière ou tension).
- calculs de lots possible ; présentation des résultats et les paramètres en fonction.
- chargement et la sauvegarde de tous les paramètres ; démarrage deSCAPS dans uneconfiguration personnalisée, un langage de script compris une fonction utilisateur libre.
- interface utilisateur très intuitive.
- un centre de langage de script à exécuter SCAPS d'un « fichier de script toutes lesvariables internes peuvent être consultés et tracée par le script .
- un établissement ajustement de courbe intégré.
- un panneau pour l'interprétation des mesures d'admission.

IV.3 Notions de base :

SCAPS est un programme conçu pour fonctionner sous le système Windows, développé parLabWindows/CVI de la national Instruments. SCAPS s'ouvre avec l'icône 'Action Panel'. Lafenêtrer qui s'ouvre est présentée dans la figure(IV.1).



Figure(IV.1) : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d’action ou principal.

La signification des blocs numérotés de 1 à 6 est expliquée dans le texte. Il ya despanneaux dédiés pour les actions de base :

1. Lancer SCAPS.
2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellulesolaire étudiée.
3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point defonctionnement).
4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
5. Commencer le(s) calcul(s).
6. Afficher les courbes de simulation .

Ces étapes sont plus détaillées dans ce qui suit

IV.3.1 Lancer SCAPS :

On clique sur l’icône ci-dessous sur le bureau, ou bien double-clique sur le fichierSCAPS3200.EXE dans le gestionnaire de fichiers (ou dans n’importe quelle autre version de SCAPS). SCAPS s’ouvre avec le panneau d’action.



IV.3.2 Définir le problème :

set problem

On clique sur le bouton SET PROBLEM dans le panneau d'action, et on choisit LOAD dans le

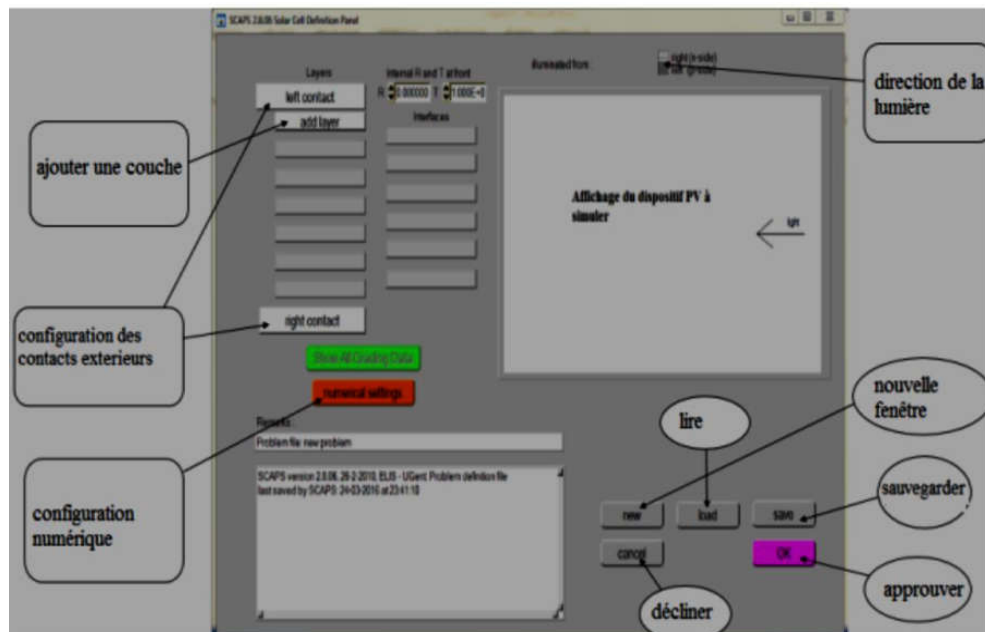


Figure (IV.2): Panneau de définition d'une cellule solaire

coin droit en bas du panneau qui s'ouvre par la suite. On sélectionne et on ouvre (par exemple NUMOS CIGS Baseline.def). Ceci est un fichier exemple d'une cellule solaire à base de CIGS. Par la suite, il est possible de modifier toutes les propriétés de la cellule en cliquant sur 'SETPROBLEM' dans le panneau d'action.

- a. New : afin de créer un nouveau dispositif photovoltaïque.
- b. Add a layer : une fenêtre s'ouvre qui contient des cases à remplir avec des paramètres qui caractérisent la couche à étudier, à savoir : le nom de la couche, l'épaisseur, l'énergie de la bande interdite, l'affinité électronique, la permittivité électrique, la mobilité, le type de dopage, ... Pour finir on clique sur « Add ».
- c. Save : afin de sauvegarder la cellule à étudier.
- d. Load : afin de sélectionner une cellule déjà sauvegardée.
- e. Ok : approuver la cellule construite et revenir au panneau d'action pour finir le travail.
- f. Right et left contact : afin de modifier les paramètres des surfaces extérieures gauche et droite de la cellule.

- g. Cancel : décliner le panneau de définition et revenir au panneau d'action.

IV.3.3 Définir le point de fonctionnement :

Le point de fonctionnement spécifie les paramètres qui ne sont pas variables dans les mesures de la simulation, et qui sont relatifs à l'opération de mesure. Ceci implique :

- La température T : Importante pour toutes les mesures. Note : dans SCAPS : $N_c(T)$, $N_v(T)$, les vitesses thermiques, le voltage thermique kT et tous leurs dérivés sont les seuls variables qui ont une dépendance thermique explicite ; on doit saisir manuellement, pour chaque valeur T , les paramètres du matériau correspondant.

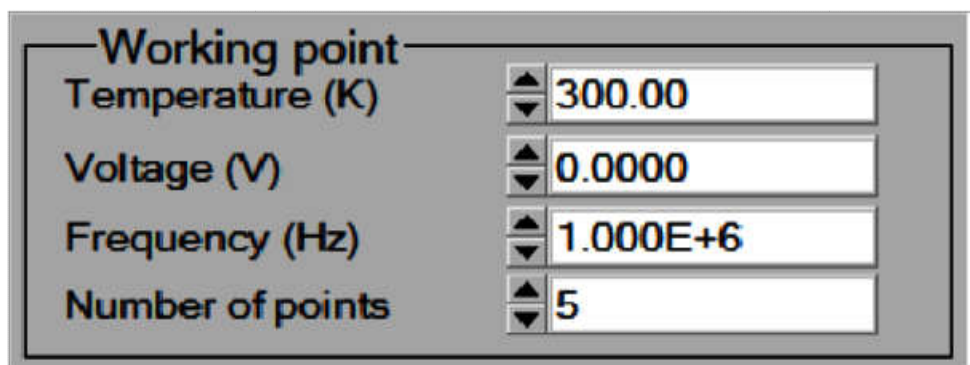


Figure (IV.3) : Le point de fonctionnement.

- Le voltage V : il ne concerne pas les simulations $I-V$ et $C-V$. C'est le voltage de la polarisation DC dans une simulation $C-f$ et $QE(\lambda)$. SCAPS commence toujours à 0 V, et s'exécute au voltage du point de fonctionnement par un nombre d'étapes qu'on doit aussi spécifier.
- La fréquence f : elle ne concerne pas les simulations $I-V$, $QE(\lambda)$ et $C-f$. C'est la fréquence dans laquelle la caractéristique $C-V$ est simulée.
- L'illumination : elle est utilisée dans toutes les mesures. Pour $QE(\lambda)$, elle détermine les conditions de polarisation de la lumière. Les paramètres de base sont : l'obscurité ou la lumière, le choix du côté illuminé, le choix du spectre. Le spectre d'illumination on Sun (= 1000 W/m²) avec la masse d'air 1.5 global est le spectre par défaut, mais il existe aussi une large gamme de lumières monochromatiques et de spectres pour plus de simulations personnalisées. S'il y a un simulateur optique, on peut immédiatement charger un profil de génération au lieu d'utiliser un spectre.

IV.3.4 Sélection des caractéristiques à simuler :

Dans la partie Action du panneau action, on peut choisir un ou plusieurs mesures à simuler: I_V , $C-V$, $C-f$ et $QE(\lambda)$. On peut ajuster également, les valeurs initiales et finales de l'argument, ainsi que le nombre des étapes.

IV.3.5 Lancer le calcul :



IV.3.6 Afficher les courbes simulées :

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la figure (IV.4). Dans ce panneau, on peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres, la densité du courant ; au dernier point de polarisation. Si on veut afficher les résultats pour des tensions intermédiaires, on utilise le bouton pause dans le panneau d'action. On peut faire apparaître les résultats par les commandes PRINT, SAVE GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran. Il est possible de faire du Couper & Coller vers, par ex., Excel, ou sauvegarder les valeurs dans un fichier de données.

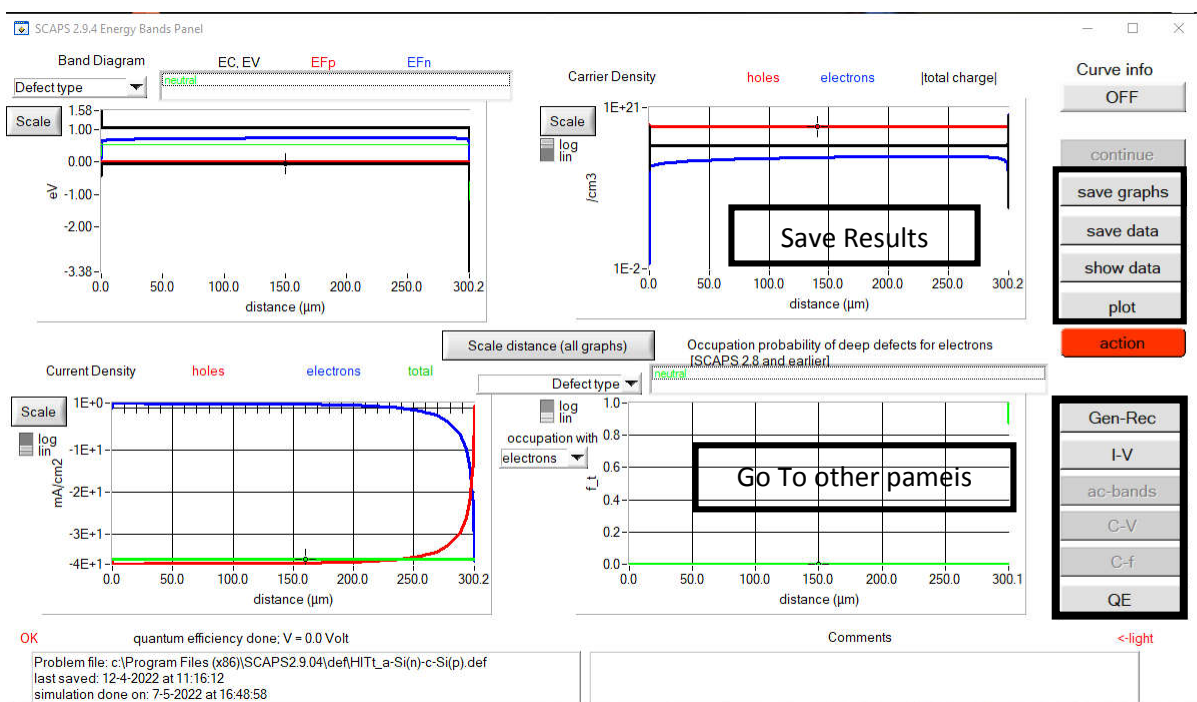


Figure (IV.4) : Panneau des bandes d'énergie.

IV.3.7 Les courbes I-V :

La figure(IV.5) montre le panneau d'affichage des courbes $I-V$ à l'obscurité et sous-éclairage. La couleur de la dernière courbe calculée est indiquée (lorsque le graphe est trop encombré, on clique CLEAR ALL GRAPHS dans le panneau d'action). Les courbes des taux derecombinaison sont affichées seulement pour la dernière simulation. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe. Si CURVE INFO est sur ON et si on clique sur une courbe du graphe, un panneau pop-up apparaîtra, avec des informations concernant le graphe, la courbe ainsi que le point cliqué.

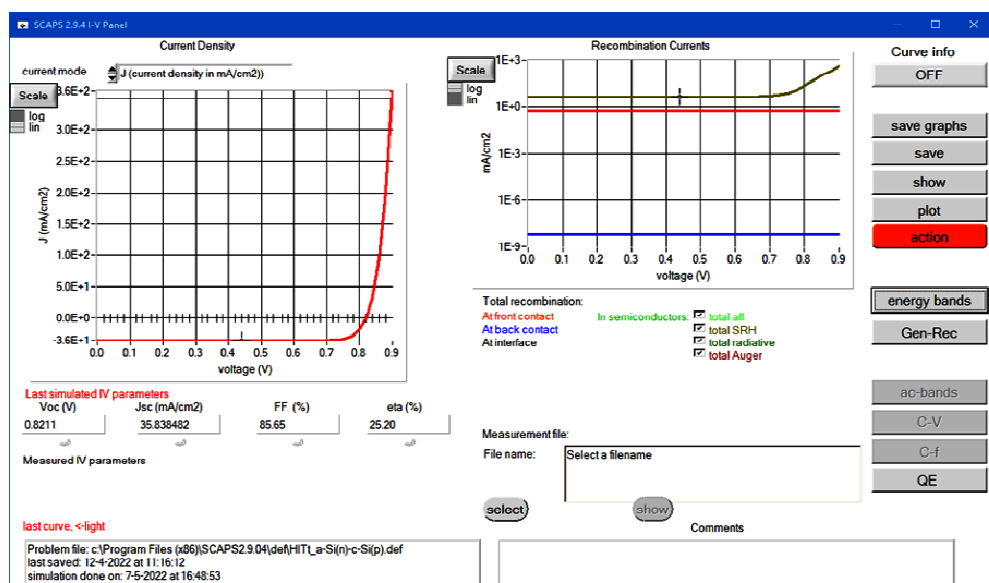


Figure (IV.5) : Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclaircissement

Le bouton SCALE aide à changer la gamme et l'échelle des axes. Si on appuie sur le bouton CTRL et on sélectionne une aire rectangulaire dans un graphe, celui-ci fera un zoom intérieur (agrandissant) dans la zone sélectionnée. L'appui sur le bouton CTRL accompagné d'un clic droit donnera un zoom extérieur (Zoom out).

IV.4 Définition d'une cellule solaire :

La méthode recommandée pour introduire une cellule solaire est d'utiliser l'interface graphique du programme. De cette façon on peut introduire interactivement tous les paramètres qui seront contrôlés par SCAPS de manière à ne pas obtenir des valeurs impossibles ou incohérentes.

Quand on clique sur le bouton 'SET PROBLEM' sur le panneau d'action, le panneau 'SOLARCELL DEFINITION' s'affichera. Ce dernier permettra de créer ou de modifier les

structures des cellules solaires et de les enregistrer, ou bien de les charger à partir d'autres fichiers. Ces fichiers de définition sont des fichiers standards ASCII (American Standard Code for Information Interchange) d'extension .def qui peuvent s'ouvrir avec Notepad.exe ou Wordpad.exe. Il est déconseillé de les modifier au risque de les rendre inutilisables par la suite. Les propriétés des couches, des contacts et d'interfaces peuvent être modifiées en cliquant sur le bouton approprié comme le montre la figure III 6. De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant 'ADD LAYER'.

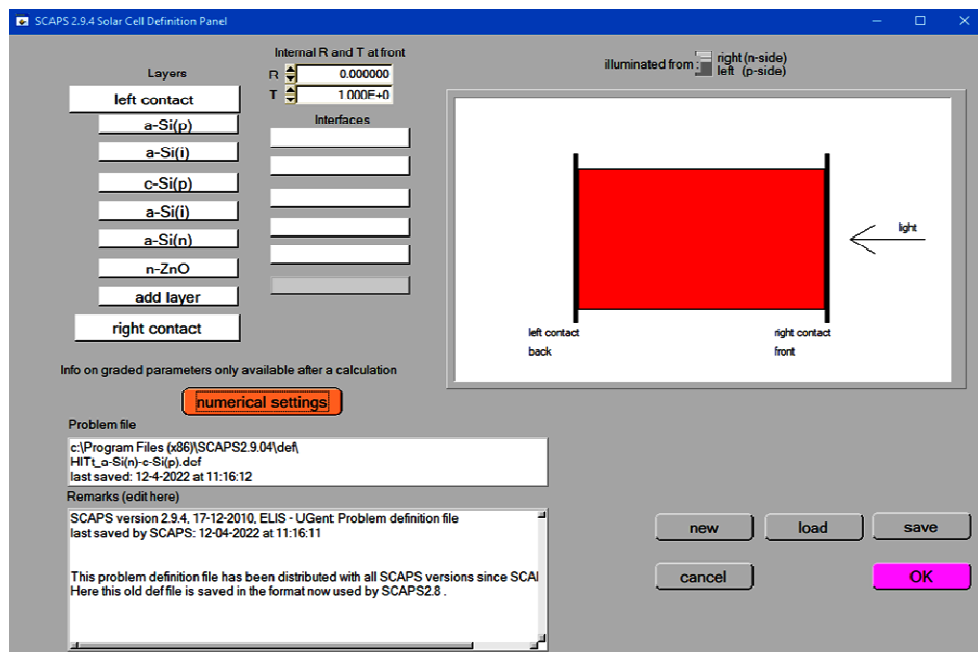


Figure (IV.6) : Définition de la structure d'une cellule solaire

IV.4.1. Contacts :

Les propriétés des contacts peuvent être introduites soit en cliquant sur le bouton du contact avant ou celui du contact arrière sur le panneau de définition de la cellule. Un panneau des propriétés de contact 'CONTACT PROPERTIES PANEL' s'ouvre, comme le montre la figure (IV.7).

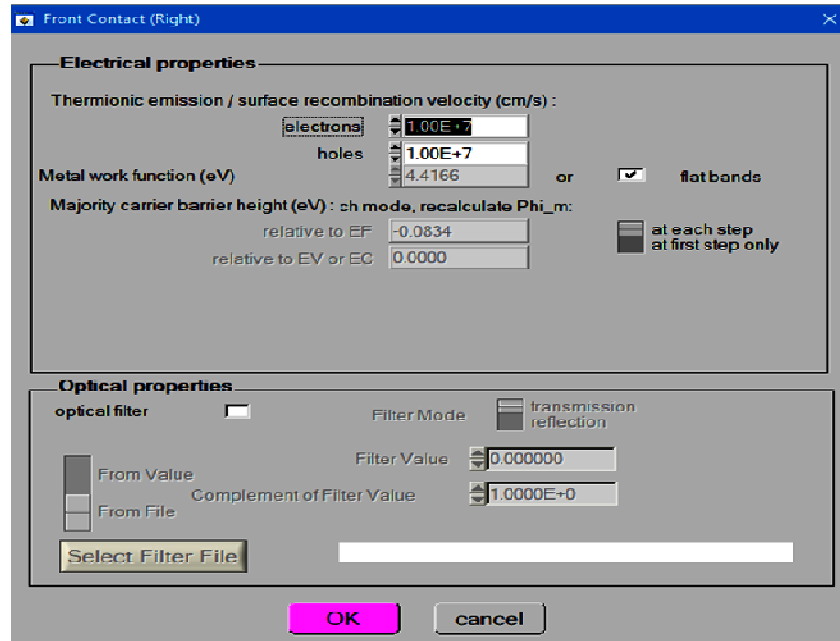


Figure (IV.7) : Panneau des propriétés des contacts.

Les propriétés des contacts, se divisent en propriétés électriques et optiques. Dans les propriétés électriques, on définit :

- Les vitesses de recombinaison surfaciques des électrons et des trous libres.
- Si le contact a un travail de sortie, ou il est idéal (régime de bande plates).
- La barrière des porteurs majoritaires.
- L'effet tunnel (si on veut en tenir compte).

Pour les propriétés optiques, on peut définir la transmission ou la réflexion, par une valeur ou un fichier de données.

IV.4.2 Définition des couches :

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre (Figure IV.8) s'ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau. Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type de dopage). Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite. Le troisième block, concerne la pureté du matériau et son profil. Dans le quatrième block, on introduit : le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, vitesse thermique des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous. Finalement,

une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel. Si le matériau est un composé d'éléments avec des concentrations non uniforme, on peut introduire des variations graduelles des précédents paramètres. Dans le cinquième block, figure (III.9), on introduit le dopage, type et densité. Le dopage aussi peut être introduit comme étant uniforme, comme il peut avoir des variations graduelles (linéaire, paraboliques,...). Dans le sixième block, on définit l'absorption de la couche, comme le montre la figure (III.10). L'absorption peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut être introduite sous forme de données. SCAPS fournit un nombre de données de l'absorption pour plusieurs types de semi-conducteurs. On peut également utiliser d'autres données de l'absorption pour des semi-conducteurs non disponibles dans SCAPS, à condition que le fichier ait la même extension des fichiers de l'absorption fournis par SCAPS.

The screenshot shows the 'SCAPS 2.9.4 Layer Properties Panel' for 'LAYER 1' of a p-type Silicon layer. The material is identified as 'p-Si(p)'. The thickness is set to 0.005 μm. The layer composition grading type is 'uniform pure A (y=0)'. The layer is pure A: y = 0, uniform, with a value of 0.000. The semiconductor property P of the pure material is 'pure A (y = 0)'. The following table lists the material properties:

bandgap (eV)	1.700
electron affinity (eV)	3.800
dielectric permittivity (relative)	10.000
CB effective density of states (1/cm ³)	2.000E+19
VB effective density of states (1/cm ³)	2.000E+19
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
electron mobility (cm ² /Vs)	5.000E+1
hole mobility (cm ² /Vs)	2.000E+1

At the bottom, the doping parameters are defined:

shallow uniform donor density ND (1/cm ³)	0.000E+0
shallow uniform acceptor density NA (1/cm ³)	2.000E+17

Figure (IV.8) : Propriétés de la couche ajoutée.

This figure shows a close-up of the doping density input fields from the previous figure:

shallow uniform donor density ND (1/cm ³)	0.000E+0
shallow uniform acceptor density NA (1/cm ³)	2.000E+17

Figure (IV.9) : Propriétés des dopages définis.

Absorption model

alpha (y=0)
 from model
 from file

absorption constant A (1/cm eV ^{1/2})	1.000E+5
absorption constant B (eV ^{1/2} /cm)	0.000E+0

2.9.04\absorption\a-Si.abs
 absorption file for y = 0

Figure (IV.10) : Modèle de l'absorption.

Le type des recombinaisons en volume présent est indiqué dans le côté droite du panneau des propriétés de la couche (Figure IV.11). Tous les types des recombinaisons sont présents ; directsou à travers les pièges.

Recombination model

Band to band recombination

Radiative recombination coefficient (cm ³ /s)	0.000E+0
Auger hole capture coefficient (cm ⁶ /s)	0.000E+0
Auger hole capture coefficient (cm ⁶ /s)	0.000E+0

Recombination at defects

Defect 1 of a-Si(p)

defect type	Neutral
capture cross section electrons (cm ²)	1.000E-15
capture cross section holes (cm ²)	1.000E-15
energetic distribution	Single
reference for defect energy level Et	Above EV (SCAPS < 2.7)
energy level with respect to Reference (eV)	0.600
characteristic energy (eV)	0.100

Nt total (1/cm3) uniform Nt 1.000E+12

Figure (IV.11) : Définition des types de recombinaison présents.

Si on introduit les défauts (pièges) ; ils peuvent être uniformes ou non uniformes, discrets, avec des distributions gaussiennes, donneurs, accepteurs, neutres, monovalents ou divalents. On peut même définir des transitions de porteurs entre les différents niveaux d'énergie des pièges.

IV.5 Structure de la cellule à simuler :

Le schéma de principe de la cellule solaire que nous avons étudiée est donné dans la Figure (IV.12) est constituée d'un empilement de différentes couches :

La structure HIT est présentée de façon symétrique. De chaque côté repose une couche antiréfléchissante (TCO : Oxyde Transparent Conducteur) sur du silicium amorphe dopé p+ côté émetteur et dopé n+ côté face arrière pour la réalisation du champ de surface arrière (BSF : Back Surface Field). Cette couche d'oxyde transparent conducteur permet notamment d'établir la liaison entre le silicium amorphe dopé de chaque côté de la cellule et les contacts métalliques servant d'électrode.

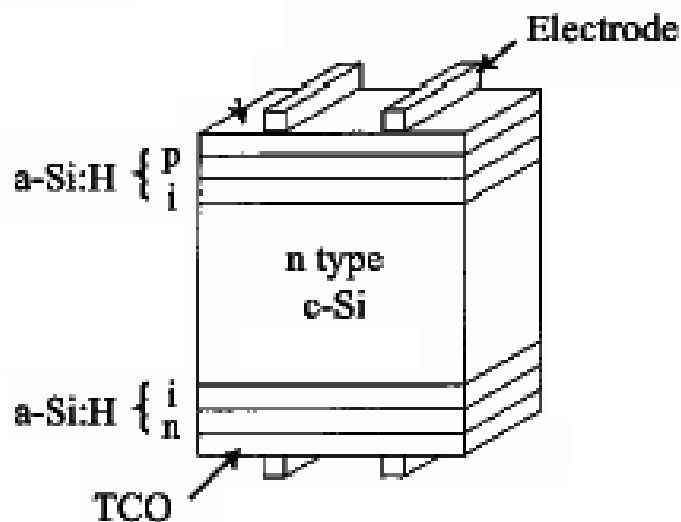


Figure (IV.12): Structure d'une cellule solaire HIT de type n.

IV.6 Paramètres utilisés dans le logiciel de simulation :

Les choix des paramètres reposent principalement sur des données générales que l'on a trouvées dans la littérature [12,26,27,28]. Le rayonnement solaire AM1.5G a été utilisé en tant que source d'éclairage avec une puissance de 100 mW/cm². La réflexion aux niveaux des

contacts avant a été fixée à 0,1 et 1, respectivement. Les autres paramètres de simulation sont donnés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Paramètres géométriques et électriques des différentes couches de la cellule

Couche		a-Si(p)	a-Si(i)	C-Si(n)	ZnO:Al	a-Si(n)
Propriété de couche	symbole					
Epaisseur	$d(\mu\text{m})$	0.01	0.010	300	0.2	0.010
Permittivité	$\varepsilon/\varepsilon_0$	10	10	10	9	10
Bande interdite	$E_g(\text{eV})$	1.7	1.7	1.12	3.3	1.7
Affinité électronique	$\chi(\text{eV})$	3.8	3.8	4	4	4.55
Mobilité des électrons	$\mu_e(\text{cm}^2/\text{Vs})$	50	50	50	100	50
Mobilité des trous	$\mu_h(\text{cm}^2/\text{Vs})$	20	20	20	25	20
Densité des trous	$N_a(\text{cm}^{-3})$	2×10^{-17}	/	/	/	/
Densité des électrons	$N_d(\text{cm}^{-3})$	/	/	2×10^{18}	1.5×10^{19}	2×10^{18}
Densité équivalente d'états dans la BdV	$N_v(\text{cm}^{-3})$	2×10^{19}	2×10^{19}	2×10^{19}	1×10^{18}	1.5×10^{19}
Densité équivalente d'états dans la BdC	$N_c(\text{cm}^{-3})$	2×10^{19}	2×10^{19}	2×10^{19}	1×10^{18}	2×10^{18}

IV.7 Résultats de la simulation et interprétations

IV.7.1 Caractéristique J(V)

La figure (IV.13) représente la variation de la densité de courant en fonction de la tension de polarisation pour différentes structures étudiées. Les paramètres électriques correspondants sont représentés dans le tableau IV-2.

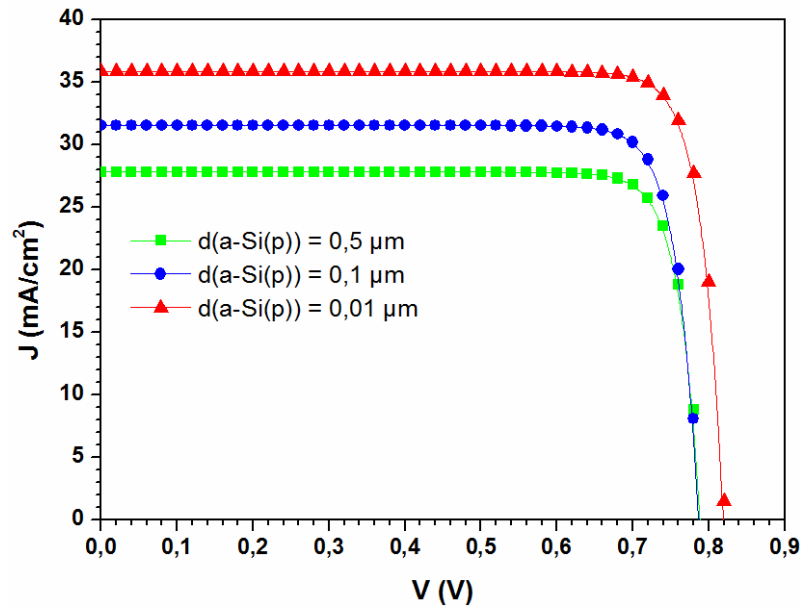


Figure (IV.13): caractéristiques I(V) des cellules solaires simulées, simple hétérojonction, double hétérojonction et cellule HIT

Tableau (IV.2) : Paramètres électriques des cellules solaires simulées.

Paramètres photovoltaïques	$d[\text{a-Si(p)}] = 0,5\mu\text{m}$	$d[\text{a-Si(p)}] = 0,1\mu\text{m}$	$d[\text{a-Si(p)}] = 0,01\mu\text{m}$
V_{oc} (V)	0,75	0,77	0,83
J_{sc} (mA/cm^2)	28,70	32,20	35,88
FF (%)	84,8	85,15	85,83
η (%)	19,10	22,5	25,55
V_{MPP} (V)	0,70	0,72	0,74
J_{MPP} (mA/cm^2)	27,10	31,40	34,54

Le premier paramètre important est l'épaisseur de l'émetteur, ici il s'agit du silicium amorphe. La simulation suggère que l'épaisseur de l'émetteur doit être la plus fine possible technologiquement afin que les porteurs minoritaires puissent atteindre la zone de charge d'espace. Ainsi, un plus grand nombre de porteurs minoritaires peuvent traverser l'hétérojonction.

Les résultats de simulation que nous avons obtenus montrent que les cellules solaires HIT présentent de meilleures caractéristiques courant-tension (Figure IV.13) combinées à de meilleurs paramètres photovoltaïques (Tableau IV-2) comparativement aux cellules solaires à simple

hétérojonction, en raison de la présence de la couche amorphe a-Si:H(p) entre le silicium cristallin (base) et le contact arrière (Mo), formant ainsi un champ de surface arrière répulsif, qui permet de repousser les électrons de la surface arrière très recombinaison et de les confiner dans la base, augmentant ainsi leur statistique de collection par le contact de face avant de la cellule. Ceci permet de réduire les pertes par recombinaison sur la surface arrière du silicium cristallin.

IV.7.2 Réponse spectrale (QE)

Le rendement quantique est illustré sur la figure (IV.14). Montre que le rendement quantique externe est maximum pour des longueurs d'onde comprises entre 400nm et 850nm il est de l'ordre de 60-85%, QE diminue brusquement dans la gamme en dessus de 800nm. Cela est dû à l'absorption et à la recombinaison qui se produit aux interfaces a-Si:H(p)/c-Si:H(n).

Par conséquent un meilleur rendement quantique QE est obtenu à la présence de la couche a-Si:H(i) pour la cellule HIT.

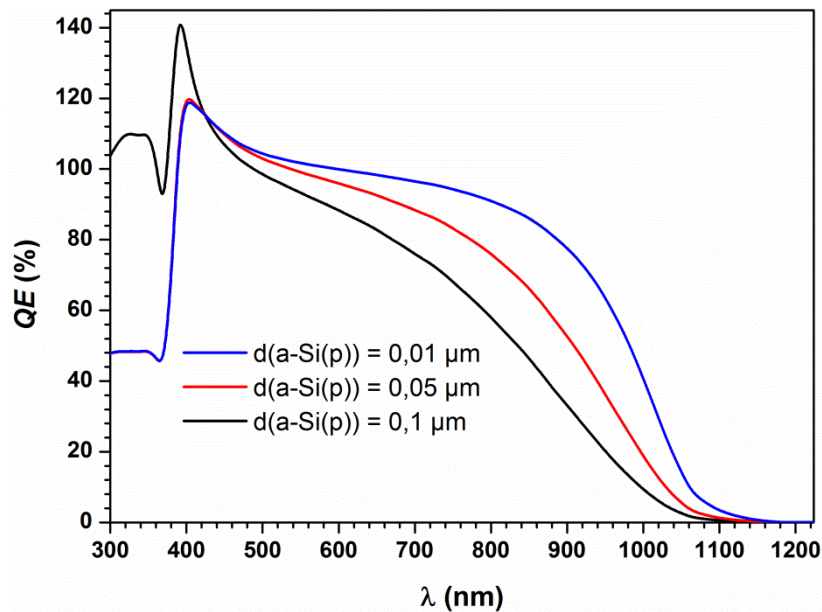


Figure (IV.14) : variation du rendement quantique des cellules solaires simulées, simple hétérojonction, double hétérojonction et cellule HIT.

IV.7.3 Influence du dopage du substrat c-Si(n) sur les performances des cellules simulées

Les figures (IV.15) représentent l'effet de la concentration de la couche c-Si(n) sur les paramètres photovoltaïques (J_{sc} , V_{oc} , FF et η) pour différentes cellules solaires simulées.

Les performances de la cellule sont meilleures pour des concentrations des porteurs (N_d) dans la gamme de 10^{17} à 10^{19} cm^{-3} , car pour des couches de c-Si(n) et plus conductrices induit une augmentation de sa conductivité et la diminution des pertes résistives.

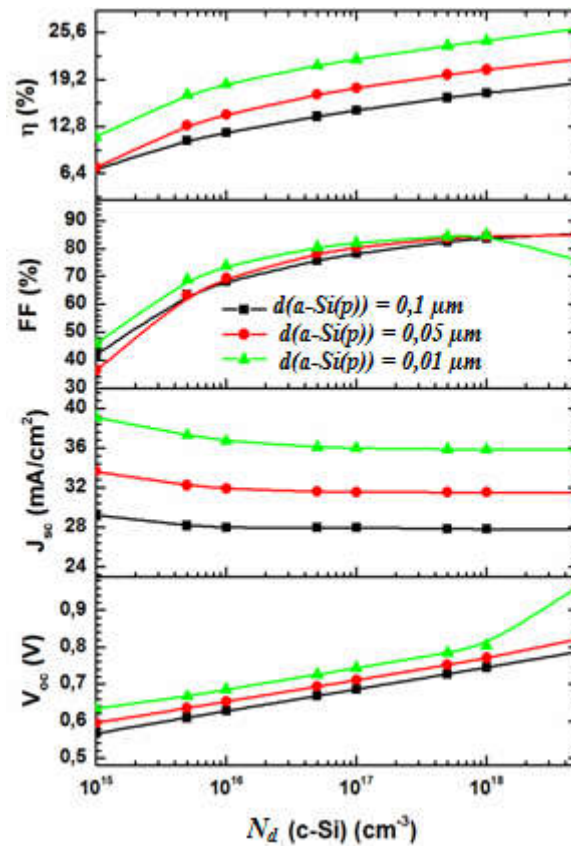


Figure (IV.15): Evolution du courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement la cellule en fonction de la concentration du dopage de la couche c-Si(n).

IV.7.4 Influence de la concentration des défauts sur les paramètres photovoltaïques

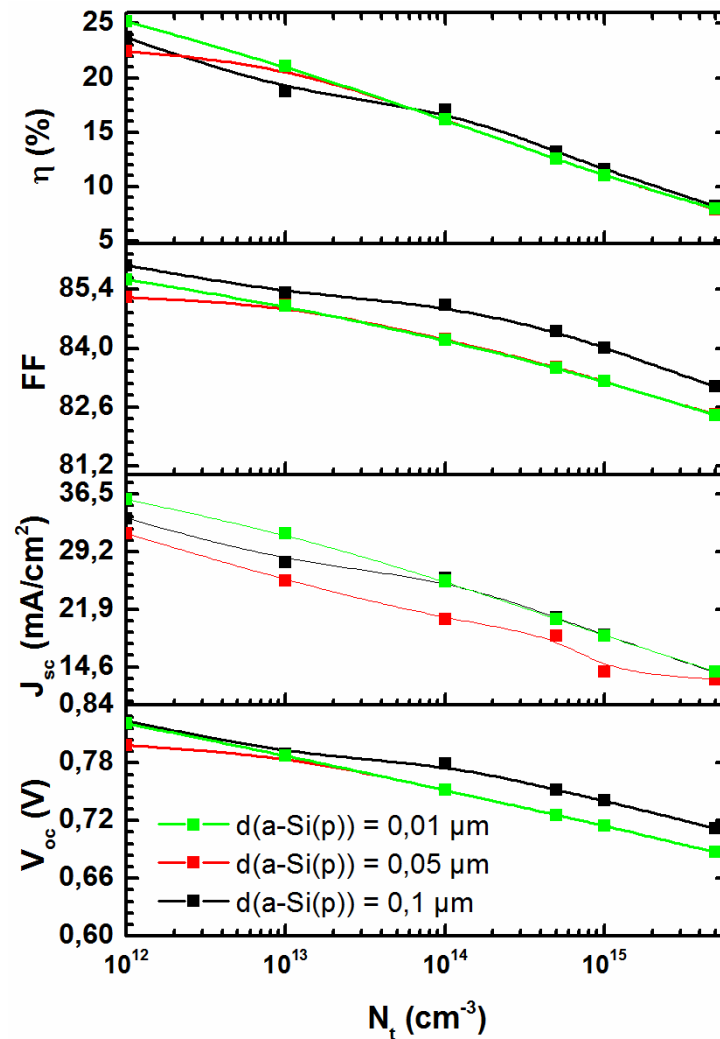
Les figures suivantes représentent l'effet de la concentration des défauts de la couche c-Si sur les paramètres photovoltaïques (J_{sc} , V_{oc} , FF et η) pour différentes cellules solaires simulées.

Les performances de la cellule sont meilleures pour des concentrations des porteurs (N_t) de 10^{12} à 10^{13} cm^{-3} ,

Dans les figures (IV.16) et pour $N_t > 10^{15} \text{cm}^{-3}$, la variation de V_{oc} , J_{sc} , FF est très significative, et que la concentration de surface de la couche absorbante influe d'une manière considérable sur le rendement lorsque N_t varie. On remarque une diminution du rendement lorsque N_t augmente et il est plus important pour de faible valeur de N_t .

De ce fait, la concentration des défauts doit être faible ce qui réduirait la résistance série et une forte résistance shunte, cela permettrait d'avoir de meilleures performances.

L'effet de la concentration des défauts est similaire sur les différentes cellules solaires simulées.



(IV.16) : Variation de V_{oc} , J_{sc} , FF et η en fonction de la concentration des défauts.

IV.7.5 Effet de la couche de passivation a-Si:H(i)

Introduire une fine couche dopée de type a-Si:H(i) entre l'émetteur et le substrat et entre le substrat et le BSF est un point clé de la cellule étudiée. Pour les raisons suivantes : augmenter la collecte des porteurs photogénérés et diminuer la recombinaison éventuelle à l'interface c-Si(n)/a-Si(p). Cette couche intrinsèque a pour rôle de diminuer le taux de recombinaison à l'interface a-Si:H/c-Si par une passivation efficace de la surface de la base.

Il apparaît que la valeur du courant de court-circuit est principalement affectée, et la tension de circuit-ouvert V_{co} reste inchangée suite à cette variation. En effet, la structure HIT et la cellule à double hétérojonction permet d'obtenir un plus fort courant de court-circuit J_{cc} est obtenue à la présence de la couche de a-Si:H(i) comme indique la figure (IV.17).

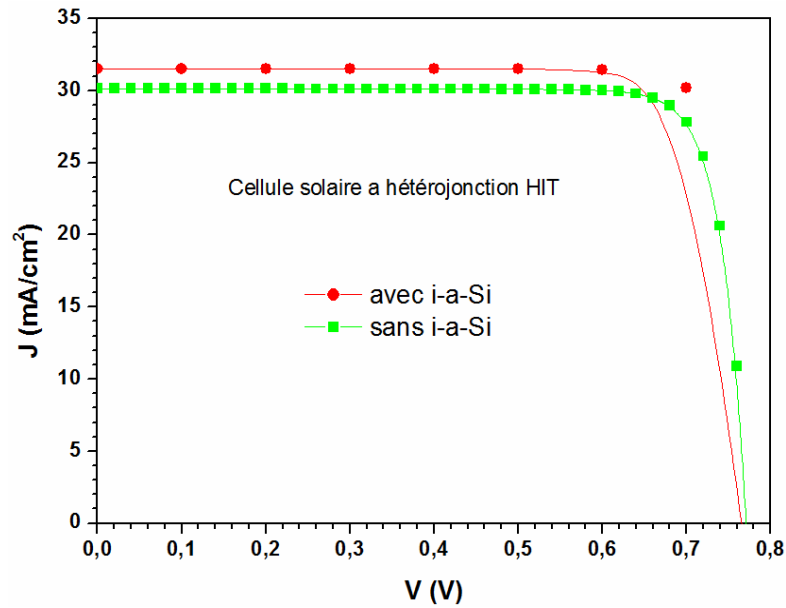


Figure (IV.17) : Densité de courant en fonction de la tension avec et sans présence de la couche a-Si:H(i) pour la cellule HIT.

IV.7.6 Effet de la largeur de la bande interdite de la couche a-Si:H(p)

Les résultats de la simulation sont présentés sur les figures ci-dessous, résulte que, l'augmentation de la largeur de bande de la couche a-Si:H(p) réduit ΔE_c , ce qui conduit à une amélioration de V_{oc} , FF et l'efficacité de conversion. Pour de grandes valeurs de ΔE_c , ces paramètres électriques commencent à baisser. Cela est certainement dû à l'augmentation du processus de recombinaison à l'interface c-Si:H(n)/a-Si:H(p) causé par une forte ΔE_c , qui agit comme une barrière contre les porteurs photo-générés. En effet, un large gap augmente le coefficient d'absorption du matériau, ce qui est avantageux pour la conversion photovoltaïque. Les performances de la cellule sont meilleures pour un gap compris entre 1.4 eV et 1.8 eV.

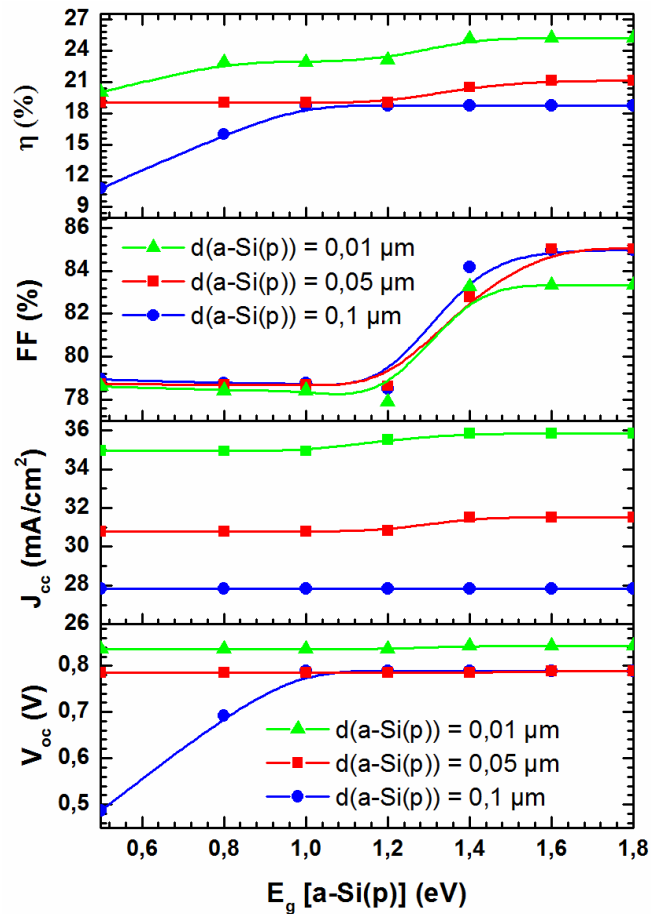


Figure (IV.18): Evolution du courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement des cellules en fonction de la largeur de bande a-Si:H(p).

IV.8 Conclusion :

Dans ce chapitre des simulations numériques ont été réalisées par logiciel SCAPS pour modéliser le comportement des différentes cellules solaires à hétérojonction de type : c-Si:H(n)/a-Si:H(p). Les cellules solaires HIT ont montré de meilleures performances photovoltaïques et cela revient au rôle important qu'apporte.

Conclusion général

Conclusion général

Le travail réalisé dans ce mémoire de fin d'étude nous a permis de développer la théorie de base des cellules solaires à base du matériau CIGS et d'étudier les différents phénomènes associés. On a utilisé un logiciel de simulation numérique unidimensionnel appelé SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator), la simulation des caractéristiques densité de courant-tension des cellules solaires à hétérojonctions à base de silicium a permis de déterminer les performances de ces dernières. Le but est d'estimer les paramètres électriques et d'évaluer numériquement le rendement de conversion en fonction des divers paramètres de la cellule (concentration de dopage et des défauts, couche de passivation et la largeur de la bande interdite etc.). Cette approche amène l'expérimentateur à une optimisation des conditions d'élaboration des hétérostructures envisagées. En effet, la modélisation numérique nous a permis d'accéder aux paramètres les plus importants pour le bon fonctionnement de la cellule solaire à hétérojonctions à base de silicium et d'optimiser son rendement de conversion.

Nous en avons conclu que pour avoir des cellules HIT de type n de qualité, il faut :

- ✓ Développement des cellules sur substrats minces ;
- ✓ Une bonne passivation de surface permettant d'atteindre de hauts rendements ;
- ✓ Introduire des couches de c-Si(n) plus conductrices qui induit une augmentation de sa conductivité et la diminution des pertes résistives ;
- ✓ La concentration des défauts doit être faible ce qui réduirait la résistance série et une forte résistance shunte, cela permettrait d'avoir de meilleures performances ;

Introduire une fine couche non dopée de type a-Si:H(i) entre l'émetteur et le substrat et entre le substrat et le BSF augmente la collecte des porteurs photogénérés et diminue la recombinaison éventuelle à l'interface c-Si(n)/a-Si:H(p). Cette couche intrinsèque a pour rôle de diminuer le taux de recombinaison à l'interface a-Si:H/c-Si par une passivation efficace de la surface de la base.

Réduire l'effet des discontinuités au niveau du raccordement de la couche p-a-Si:H et de la couche n-c-Si. Pour cela un gap compris entre 1.6 eV et 1.8 eV. Ce qui conduit à une ΔE_c faible, qui agit comme une barrière contre les porteurs photo-générés.

Les résultats de la simulation obtenus ont montré que : Les cellules HIT présentent un fort potentiel d'amélioration du rendement de conversion, tout en réduisant les coûts de production.

En effet, les cellules HIT présentent plusieurs avantages par rapport aux cellules solaires classiques à base de Si.

Le rendement de conversion des cellules HIT à 25.56% en misant sur les paramètres optimaux à savoir : un émetteur ayant un gap de 1,75 eV et une épaisseur de 0.01 μm dopé à $2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$, une épaisseur du substrat de 250 nm dopé à $2 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-3}$ et une épaisseur de couche intrinsèque (i) de 0.01 μm .

Plusieurs perspectives peuvent être avancées à l'issue de cette étude, telles que : La possibilité de développer des cellules solaires des structures HIT de type p à base de silicium polymorphe [silicium amorphe dopé n (n-a-Si :H)/silicium polymorphe intrinsèque (i-pm-Si :H)/silicium cristallin dopé p (p-c-Si)]. pour atteindre de meilleurs rendements de conversion.

Ceci constitue certainement une voie de recherche d'avenir.

Bibliographie

The word 'Bibliographie' is rendered in a bold, sans-serif font. Each letter is filled with a different color from a rainbow spectrum, starting with magenta for 'B', transitioning through red, orange, yellow, green, blue, and ending with purple for 'e'. The text is presented with a 3D effect, featuring a soft, grey shadow cast beneath it onto the white background.

Bibliographie:

- [1] Y.El.Gmili , Étude et caractérisations par cathodoluminescence de couches minces d'InGaN pour le photovoltaïque , Mémoire de Doctorat, Université de Lorraine, (2013).
- [2] Z. Biskri , Prediction a partir des différentes phases cristallines des propriétés physiques et mécaniques des ceramiques dentaires , Mémoire de Doctorat , Université Freres Mentouri Constantine 1, (2017).
- [3] A.Goetzbergera , C. Heblinga , H. Schockb , Photovoltaic materials, history, status and outlook , Materials Science and Engineering , 1-46, (2003) .
- [4] Z.Zerrouki , R.Bereksi , Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome , Mémoire de Magister, Université Aboubakr Belkaid Tlemcen , (2017).
- [5] M.Bouzaki , Etudes comparées et modélisation des performances des différentes technologies de cellules photovoltaïques en vue du dimensionnement des systèmes et installations photovoltaïques , Mémoire de Doctorat , Université de Tlemcen , (2016) .
- [6] A.Mahfoude , modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement , Mémoire de Doctorat , Université Stif , (2015) .
- [7] T. Mambrini , Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies , Mémoire de Doctorat , Université Paris-Sud , Ecole Doctorale : STITS , (2014).
- [8] M. Belarbi , A. Benyoucef , B. Benyoucef , Study of the equivalent circuit of a dyesensitized solar cells , Énergie Avancée An International Journal (AEIJ), Vol. 1, No. 2, April , (2014).
- [9] H. Kintz , Réalisation de couches minces nano composites par un procédé original couplant la pyrolyse laser et la pulvérisation magnétron : application aux cellules solaires tout silicium de troisième génération , Mémoire de Doctorat , Université Paris Sud , (2013).
- [10] S.Bensalem, , Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires , Mémoire de Magister , Université Ferhat Abbas– Setif , (2011).
- [11] W.Favre , Silicium de type n pour cellules à hétérojonctions : caractérisations et modélisations , Mémoire de Doctorat , Université Paris-Sud 11 , (2011).

Bibliographie

- [12] S.De.Vecchi , Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium et contacts interdigités en face arrière , Matériaux. INSA de Lyon , (2013).
- [13] K. Fukutani , M. Kanbe , W. Futako , B. Kaplan , T. Kamiya , C. Fortmann , I Shimizu , Band gap tuning of a-Si :H from 1.55 ev to 2.10 ev by intentionally promoting structural relaxation , Journal of Non-Crystalline Solids , vol. 227–230, Part 1, page 63–67 , (1988).
- [14] JE.Cotter , JH.Guo , PJ.Cousins , FW Abbott MD Chen & KC Fisher P-Type Versus n-Type Silicon Wafers : Prospects for High-Efficiency Commercial Silicon Solar Cell , IEEE Transactions on Electron Devices , vol. 53 :8, pages 1893 – 1901 , (2006).
- [15] T.Saitoh , H.Hashigami , S.Rein , S.Glunz , Overview of light degradation research on crystalline silicon solar cells , Progress in photovoltaics , vol. 8 , pages 537–547 , (2000).
- [16] M.Stutzmann , K. Biegelsen , Microscopic nature of coordination defects in amorphous silicon , Physical Review B, vol. 40, no. 14, page 9834–9840 , (1989).
- [17] P.G.Spear , Lecomber , Substitutional doping of amorphous silicon , Solid State Communications vol. 117, page 1193, (1975).
- [18] C.R.Wronski , S.Lee , M.Hicks , S.Kumar , Internal photoemission of holes and the mobility gap of hydrogenated amorphous silicon , Physical Review Letters, vol. 63, no. 13, (1989).
- [19] R.A.Street , Hydrogenated amorphous silicon , Cambridge Solid State Science Series ,(1991).
- [20] R. A.Street , D.K.Biegelsen , J.C.Knights , Defect states in doped and compensated a-Si : H , Physical Review B, vol. 24, pages 969–984, Jul (1981).
- [21] S.De Vecchi. , Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium et contacts interdigités en face arrière , Matériaux. INSA de Lyon , (2013).
- [22] D.Diouf , Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière , Mémoire de Doctorat, Université Paris-sud , (2010).
- [23] M.Rahmouni , Etude des cellules photovoltaïques ‘HET’ en vue d’améliorer leur rendement , Mémoire de Doctorat , Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohamed Boudiaf , (2010).
- [24] K.fouad , Caractéristique électrique d’une cellule solaire à hétérojonction a-Si: H/ μ c-Si , mémoire de master , Université Mohamed Khider Biskra , (2014).

Bibliographie

[25] A.Abdelghafour , D.Abderrahmane , Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p) , Mémoire de Master Académique , Université de Ouargla ,(2016).

[26] M.Krarroubi , Structure Oxyde / Métal / Oxyde destinée à remplacer les oxydes transparents conducteurs classiques dans les cellules solaires par effet photovoltaïque , Mémoire de Magister Université d'Oran , page13, (2012).

[27] D.Reaux , Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-Si :H/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface , Archives HAL.

[28] D.Diouf , J.Kleider , C.Longeaud , Two-Dimensional Simulations of Interdigitated Back Contact Silicon Heterojunctions Solar Cells , Chapter 15.

Résumé

Dans ce travail nous avons étudié les caractéristiques électriques d'une cellule solaire de structure HIT ("Heterojunction with Intrinsic Layer") sont constituées d'un substrat de silicium cristallin (c-Si) d'épaisseur comprise entre 100 et 300 μm , et d'une fine couche de silicium amorphe (a-Si:H) jouant le rôle d'émetteur en face avant et de champ de surface arrière (BSF), et une couche de a-Si:H non dopé entre le substrat et l'émetteur. En vue d'améliorer les performances de ces, une optimisation par simulation à l'aide du logiciel SCAPS. Cette optimisation nous permet de donner les différents paramètres des matériaux qui correspondent au rendement maximal de la cellule.

Les résultats de la simulation obtenus ont montré que :

Les performances des cellules sont meilleures pour des couches de c-Si(n) plus conductrices. L'effet de la concentration des défauts est similaire sur les différentes cellules solaires simulées, doit être faible. La couche Si:H(i) a pour rôle de diminuer le taux de recombinaison à l'interface a-Si:H/c-Si par une passivation efficace de la surface de la base. Les résultats de la simulation obtenus ont montré que : le rendement de conversion des cellules HIT à 25.56% en misant sur les paramètres optimaux à savoir : un émetteur ayant un gap de 1,75 eV et une épaisseur de 0.01 μm dopé à $2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$, une épaisseur du substrat de 250 nm dopé à $2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ et une épaisseur de la couche intrinsèque (i) de 0.01 μm .

Mots clés : Cellule solaire, HIT, c-Si/a-Si:H, rendement, Simulation, SCAPS.

Abstract

In this work we have studied the electrical characteristics of a solar cell of HIT structure ("Heterojunction with Intrinsic Layer") consist of a crystalline silicon substrate (c-Si) with a thickness between 100 and 300 μm , and a thin layer of amorphous silicon (a-Si:H) acting as a front face emitter and back surface field (BSF), and a layer of undoped a-Si:H between the substrate and the transmitter. In order to improve the performance of these, an optimization by simulation using the SCAPS software. This optimization allows us to give the different parameters of the materials that correspond to the maximum efficiency of the cell.

The simulation results obtained showed that:

Cell performance is better for more conductive c-Si(n) layers. The effect of defect concentration is similar on different simulated solar cells, should be small. The role of the Si:H(i) layer is to reduce the recombination rate at the a-Si:H/c-Si interface by effective passivation of the base surface. The results of the simulation obtained showed that: the conversion efficiency of the HIT cells at 25.56% by betting on the optimal parameters, namely: an emitter having a gap of 1.75 eV and a thickness of 0.01 μm doped at $2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$, a thickness of the substrate of 250 nm doped at $2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ and a thickness of the intrinsic layer (i) of 0.01 μm .

Keywords: solar cells, HIT, c-Si/a-Si:H, efficiency, simulation, SCAPS

المخلص:

في هذا العمل، درسنا الخصائص الكهربائية لخلايا شمسية لهيكل ("HIT ارتباط غير متجانس مع طبقة داخلية") تتكون من ركيزة بلورية من السيليكون (c-Si) بسُمك يتراوح بين 100 و 300 ميكرومتر، وطبقة رقيقة من غير متبلور السيليكون (a-Si:H) يعمل كباعث للوجه الأمامي ومجال السطح الخلفي (BSF)، وطبقة غير مطلية من (a-Si:H) بين الركيزة وجهاز الإرسال. من أجل تحسين أداء هذه، التحسين عن طريق المحاكاة باستخدام برنامج SCAPS. يسمح لنا هذا التحسين بإعطاء المعلمات المختلفة للمواد التي تتوافق مع أقصى كفاءة للخلايا. أظهرت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها ما يلي:

يكون أداء الخلية أفضل بالنسبة لطبقات c-Si (n) الموصلة. تأثير تركيز الخلل مشابه على خلايا شمسية مختلفة، يجب أن يكون صغيراً. يمثل دور طبقة Si:H (i) في تقليل معدل إعادة التركيب في واجهة a-Si:H / c-Si عن طريق التخميل الفعال لسطح القاعدة. أظهرت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها ما يلي: كفاءة التحويل لخلايا HIT عند 25.56% من خلال الرهان على المعلمات المثلى، وهي: باعث به فجوة 1.75 فولت وسُمك 0.01 ميكرومتر مخدر عند $2 \cdot 10^{18} \text{سم}^{-3}$ ، أ. سُمك الركيزة 250 نانومتر مخدر عند $2 \cdot 10^{18} \text{سم}^{-3}$ وسُمك الطبقة الداخلية (i) من 0.01 ميكرومتر.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية، HIT، c-Si / a-Si:H، الكفاءة، المحاكاة، SCAPS.