

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D' ELECTRONIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologies**

Filière : **Génie électrique**

Spécialité : **MATERIAUX ET DISPOSITIFS ELECTRONIQUES ET
PHOTOVOLTAIQUES**

Présenté par
LOUNA KAISSA

SADI BRAHIM

Thème

Influence du dioxyde d'étain sur les performances des cellules photovoltaïques de type a-Si:H/c-Si.

Mémoire soutenu publiquement le 04/07/2017 devant le jury composé de :

Mr ATTAF YUCEF
M.C.B, UMMTO, Président

M^{ELLE} Dalila HOCINE
M.C.A, UMMTO, Encadreur

Md BOUGHIAS OUIZA
M.A.A, UMMTO, Examineur

REMERCIEMENT

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu de nos avoir donné la force et le courage.

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promotrice **Mlle Dalila HOCINE** pour nous avoir encadrés durant notre projet de fin d'études et nous conseillé tout le long de notre travail.*

*Nous remercions chaleureusement **Mlle Samira OUSSIDHOUM** pour l'initiation au logiciel **AJORS-HET**, pour ses explications et sa gentillesse, et de m'avoir aidée à accomplir se travail.*

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur de juger notre travail.

Enfin, nous aimerions adresser nos plus fervents remerciements à nos parents, car nul autres qu'eux se sont plus sacrifiés pour notre bien et l'accomplissement de nos projets.

Enfin, nous remercions a toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre on contribué au bon déroulement de ce travail.



Dédicaces

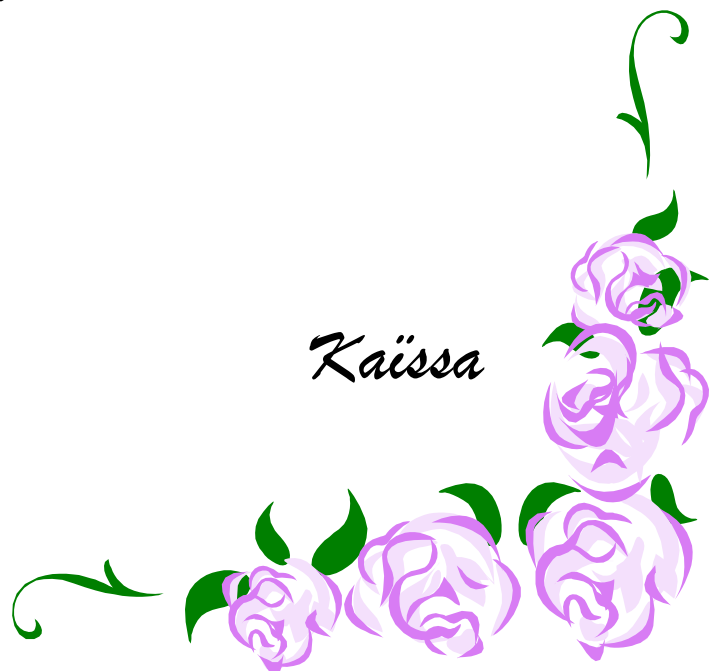
A mes parents

A mes frères et sœurs

A ma famille

A tous ceux et celles qui me sont chère(s).

Kaïssa





Dédicaces

A mes parents

A mes frères et sœurs

A ma famille

A tous ceux et celles qui me sont chère(s).

Brahim



Sommaire

Introduction general	1
Chapitre I : Etude d'oxyde d'étain en couche mince	
Introduction	3
I.1 Définition	3
I.2 Propriétés de l'oxyde d'étain	3
I.2.1 Propriétés structurales	3
I.2.2 Propriétés électroniques	4
I.2.3 Propriétés optiques	5
I.2.4 Propriétés électriques	5
I.3 Effet du dopage sur les propriétés de l'oxyde d'étain	6
I.3.1. Effet du dopage sur les propriétés structurales	6
I.3.2 Effet du dopage sur les propriétés électriques	7
I.3.3 Effet de dopage sur les propriétés optiques du SnO ₂	8
I.4 Rôle de l'épaisseur du film déposé sur les propriétés du SnO ₂	8
I.5 Les techniques d'élaboration du SnO ₂	9
I.5.1 Evaporation thermique	9
Evaporation par effet joule	10
Evaporation par bombardement électronique:	11
Evaporation par ablation Laser	12
I.5.2 La méthode Sol-Gel	13
la centrifugation ou " spin-coating "	13
Trempage – tirage ou Dip-Coating	14
Les inconvénients de la technique sol- gel	14
I.6 Les domaines d'application du SnO ₂	15
Un matériau de base dans les batteries de lithium :	15
Une électrode conductrice dans les couches minces des cellules photovoltaïques :	15
Vitrage à isolation thermique	16
I.7 Conclusion	16
Chapitre II : Etat de l'art sur les cellules solaires au silicium	
Introduction	17
II.1 L'effet photovoltaïque	17

II.2 Principe de fonctionnement de la cellule solaire	18
II.2.1 Définition d'une cellule solaire	18
II.2.2 Structure d'une cellule solaire:	18
Couches de passivation des faces avant et arrière.....	19
Couche antireflet	19
Texturation de la surface	20
Création de la jonction p/p+ à l'arrière (BSF).....	20
II.2.3 Principe de fonctionnement	21
II.3 Schéma électrique équivalent	22
II.4 La Caractéristique courant/tension :	26
II.5 Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire.....	26
II.6 Les filières technologiques des cellules photovoltaïques	28
II.6.1 Le silicium monocristallin	29
II.6.2 Le silicium poly cristallin	30
II.6.3 Silicium amorphe.....	31
II.7 Regroupement des cellules	31
II.7.1 Regroupement en série	31
II.7.2 Regroupement en parallèle	32
II.7.3 Regroupement en série/parallèle (Association en hybride).....	33
II.8 Influence de la température et de l'éclairement.....	34
II.8.1 Influence de la température	34
II.8.2 Influence de l'éclairement	35
II.9 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque	37
II.9.1 Les avantage	37
II.9.2 Les inconvénients	37
II.10.Conclusion	37
Chapitre III : Etude des cellules solaires à hétérojonction de type a-Si:H/c-Si.	
Introduction	38
III.1 Définition de l' hétérojonction	38
III.2 Les différents types d'hétérojonctions	40
III.3 Fonctionnement physique d'une hétérojonction	41
III.3.1 Hétérojonction à l'équilibre thermodynamique	41
III.3.2 Calcul du champ, potentiel et W (largeur de la ZCE)	42

III.4 Les cellules solaires à hétérojonction (a-Si : H(n) /c-Si(p)).....	46
III.4.1 Historique des cellules à hétérojonction a-Si:H/c-Si.....	46
III.4.2 Les composants de la cellule PV à hétérojonction.....	47
III.4.3 Structure de la cellule a-Si:H/c-Si.....	48
III.4.4 Principe de fonctionnement de l'hétérojonction a-Si:H/c-Si	49
III.5 Les deux semi-conducteurs de base	52
III.5.1 Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si: H).....	53
III.5.1.1 Définition :	53
III.5.1.2 Propriétés structurales du silicium amorphe hydrogéné.....	53
III.5.1.3 Propriétés optique du silicium amorphe hydrogéné.....	54
III.5.1.4 Le rôle de l'hydrogène	54
III.5.1.5 Technique de dépôt du a-Si :H.....	55
III.5.2 Le silicium cristallin c-Si	56
III.5.2.1 Définition	56
III.5.2.2 Propriétés fondamentales du silicium cristallin	56
III.5.2.3 Propriété structurelle du silicium cristallin	57
III.5.2.4. Propriété optique de silicium cristallin.....	57
III.5.2.5 Paramètre de gap :	58
III.6 Les avantages de la technologie silicium à hétérojonction	59
III.7 Critères pour l'optimisation des cellules à hétérojonction silicium	59
III.8 Conclusion.....	60
Chapitre IV : Influence de l'oxyde d'étain sur les performances des cellules a-Si:H/c-Si	
Introduction	61
IV.1 Présentation du logiciel de simulation AFORS-HET :	61
IV.2 Les étapes de simulation :	62
IV.3 Structure de la cellule photovoltaïque à simuler :	66
IV.4 Les paramètres de simulation :	67
IV.5 Les résultats de simulation:.....	69
IV.5.1 Diagrammes des bandes d'énergie.....	69
IV.5.2 Caractéristiques courant/tension des cellules solaires simulées.....	69
IV.5.3 L'effet de l'épaisseur de l'émetteur (a-Si :H) sur les performances des cellules solaires SnO ₂ / a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al.....	70
IV.5.4 L'effet de l'épaisseur de la base (c-Si) sur les performances des cellules solaires SnO ₂ /a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al	71

IV.5.3 L'effet de l'épaisseur de la couche antireflet du SnO ₂	72
IV.5.4 Effet du dopage du c-Si sur le rendement des cellules SnO ₂ /a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al	74
Conclusion	74
Conclusion générale	75

Liste des figures :

FigureI-1: Structure cristalline de la cassitérite SnO ₂	4
Figure I-2 : Spectre de Diffraction des rayons X (DRX) des films SnO ₂	4
Figure I-3:Spectre de diffractions des Rayons X (XRD) des films SnO ₂ obtenus par spray pyrolyse après un recuit à 700 0C avec un rapport atomique In /Sn : (a)=0.1, (b)=0.2, (c)=0.3, (d)=0.4	7
Figure 4:Spectre de transmission UV–Visible des films SnO ₂ avec différents rapports atomiques : In /Sn = (a) =0.1, (b)=0.2, (c)=0.3, (d)=0.4	8
FigureI-5:Variation de Résistance carrée en fonction des épaisseurs de différents films de SnO ₂ recuits à 400 °C : (a) SnO ₂ non dopé (b) SnO ₂ : Mo (6 at %); (c) SnO ₂ : Sb (1.5 at. %); SnO ₂ : F (4.5 at. %).....	9
FigureI-6:Schéma d’une installation de dépôt par évaporation sous vide	11
Figure I-7:Principe de l’évaporation à canon à électron	12
Figure I-8:Schéma de principe de l’ablation laser	12
Figure I-9:Technique de spin-coating	14
FigureI-10:Dépôt de couches minces par trempage-tirage.....	14
FigureII-1:L’effet photovoltaïque	17
FigureII- 2:Schéma simplifié illustratif d’une cellule solaire.	18
Figure II-3: Composition d’une cellule photovoltaïque.....	19
Figure II-4:Structure d’une cellule solaire au silicium et son diagramme de bande.....	21
Figure II-5:Circuit équivalent d’une cellule solaire photovoltaïque idéale sous éclairement..	23
Figure II-6:Circuit électrique équivalent d’une cellule solaire photovoltaïque réelle sou éclairement	24
Figure II-7:Influence de résistance série sur la caractéristique I(V)	25
Figure II-8:Influence de résistance shunt sur la caractéristique I(V)	25
Figure II-9:Caractéristique I-V d’une cellule solaire; à l’obscurité et sous éclairement.....	26
Figure II-10:Organigramme des différentes technologies	29
Figure II-11:Méthode de Czochralski	30
Figure II-12:Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin	30
Figure II-13:Cellule photovoltaïque à base de silicium poly cristallin	31
Figure II-14:Schéma d’un regroupement en série et sa caractéristique I(V)	32
Figure II-15:Schéma d’un regroupement en parallèle et sa caractéristique I(V)	33
Figure II-16:Caractéristique I(V) d’une Association en hybride	34
Figure II-17:La caractéristique de I=f(V) en fonction de température.....	35
Figure II-18:La caractéristique P=f(V) en fonction de la température.....	36
Figure II-19:La caractéristique I=f(v) en fonction de l’éclairement.....	37
Figure II-20:La caractéristique P=f(V) en fonction de l’éclairement	37
FigureIII-1:Diagramme de bandes d’énergie d’une hétérojonction isotype	39
Figure III-2:Diagramme de bandes d’énergie d’une hétérojonction anisotype.....	40
Figure III-3:Diagrammes schématiques montrant les différents types d’hétérojonctions	41
Figure III-4:champ et potentiel électriques à l’interface d’une hétérojonction a-Si:H/c-Si.....	44

Figure III-5: structure de cellule solaire SHJ proposée par Tanaka et al	46
Figure III-6: Structure d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si:H / c-Si.....	49
Figure III-7a: Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p) à l'équilibre thermodynamique.....	50
Figure III-8: Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si:H(p)/c-Si(n) à l'équilibre thermodynamique.....	51
Figure III-9: Diagramme de bandes d'énergie selon trois modèles : (a) modèle d'Anderson ..	52
Figure III-10: Réseau d'a-Si: H montrant des liaisons brisées d'atome de silicium, qui sont passivés par les atomes d'hydrogène.	54
Figure III-11: Coefficient d'absorption α du silicium cristallin (c-Si), du silicium amorphe hydrogéné mesuré par spectroscopie de déviation photo thermique (PDS). Les données proviennent du travail réalisé par Carius et al.....	54
Figure III-12: Schéma de dépôt PECVD dans une boîte à plasma d'un module à	56
Figure III-13: Représentation tridimensionnelle de la maille élémentaire du silicium cristallin	57
Figure III-14: Structure du silicium cristallin	58
Figure III-15: Structure de bandes du silicium cristallin et transitions possibles dans l'espace des k.....	59
Figure IV-1 : Fenêtre principale de l'interface graphique du logiciel de simulation.....	62
Figure IV-2: Fenêtre correspondant à la définition de la structure	63
Figure IV-3: les différents paramètres de la cellule	64
Figure IV-4: calcul des conditions thermodynamique de la cellule.....	65
Figure IV-5: mode de calcul pour l'illumination de la cellule.....	66
Figure IV-6: les deux structures des cellules solaires simulées	67
Figure IV-7: Diagramme de bandes de la cellule a-Si : H(n) /c-Si(p) avec CAR de SnO2	69
Figure IV-8: Caractéristiques I(V) de la cellule a-Si : H(n) /c-Si(p) avec et sans la CAR de SnO2.....	70
Figure IV-9: Variation du rendement des cellules SnO2/a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al en fonction de l'épaisseur de l'émetteur	71
Figure IV-10: Variation du rendement des cellules SnO2/a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al en fonction de l'épaisseur de la base (c-Si).....	72
Figure IV-11: Variation du rendement des cellules SnO2/a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al en fonction de l'épaisseur de la couche antireflet du SnO2	73
Figure IV-12: Variation du rendement des cellules SnO2/a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al en fonction du dopage de c-Si	74

Liste des tableaux :

Tableau I-1:Principales propriétés des différentes couches TCO.....	16
Tableau IV-1:Les paramètres de simulation	68
Tableau IV-2: Paramètres électriques des cellules solaires a-Si : H(n) /c-Si(p) sans et avec couche antireflet de SnO2	69
Tableau IV-3:Paramètres photovoltaïques des cellules solaires SnO2/a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al pour différentes valeurs d'épaisseurs de l'émetteur	71
Tableau IV-4: Paramètres photovoltaïques des cellules solaires SnO2/a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al pour différentes valeurs d'épaisseurs de la base.....	72
Tableau IV-5:Paramètres photovoltaïques des cellules solaires SnO2/a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al pour différentes valeurs d'épaisseurs de la couche antireflet du SnO2	73

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie a été depuis l'antiquité le moteur de l'activité humaine, elle joue un rôle très important dans la vie quotidienne et dans le développement des nations. Le contexte énergétique mondial actuel est marqué par une demande croissante de besoins énergétiques.

En effet, le scénario de référence de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) prévoit une augmentation de 55% entre 2005 et 2030. Or, actuellement, cette énergie est principalement sous forme d'énergie fossile (pétrole, gaz, charbon...). Ceci pose d'énormes problèmes. D'un côté, Il y a le danger de la radioactivité sur la vie humaine que cause les explosions des centrales nucléaires comme les accidents enregistrés à Tchernobyl en Ukraine en avril 1986 et à Fukushima au Japon en mars 2011 ; d'un autre côté, ces énergies fossiles s'épuisent et engendrent des gaz à effet de serre qui en grande partie, contribuent au réchauffement climatique.

La solution à cette problématique réside dans l'accroissement de la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique. Et parmi elles, l'énergie solaire à conversion photovoltaïque. Cette énergie inépuisable et propre, occupe une place prépondérante. C'est une transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique. Elle est assurée fondamentalement par des cellules solaires au silicium basé sur l'effet photovoltaïque, dont la fabrication est de plus en plus maîtrisée. Seulement il y a un caractère qui freine encore l'utilisation massive de ce procédé de production d'énergie propre c'est le coût de fabrication et le faible rendement.

Pour diminuer le prix de ces dispositifs et augmenter leur rendement physique, des cellules en couches minces ont été réalisées avec de nombreuses technologies qui se sont développées et qui se sont basées sur le silicium (plus de 95% du marché mondial). Le coût des cellules photovoltaïques à base de silicium est donc moins élevé par rapport à celui des cellules basées sur certains composites (CdTe, InSe₂ ...).

Parmi les cellules solaires qui combinent un haut rendement et une production avec une faible consommation d'énergie, les cellules solaire à simple hétérojonction en silicium (SHJ) qui sont composées du silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) et du silicium cristallin (c-Si).

L'obtention d'un rendement énergétique significatif nécessite une forte absorption de la lumière. Les propriétés de la couche antireflet (type, épaisseur, transmission,...) joue un rôle primordial sur les performances de ces cellules. Le TCO couramment utilisé est l'oxyde d'indium dopé étain (ITO) mais la rareté de l'indium et son prix coûteux augmente le besoin de le remplacer par un matériau disponible commercialement et présentant de bonnes propriétés optoélectroniques. Dans ce sens, nous avons choisi d'utiliser l'oxyde d'étain (SnO_2) comme un remplaçant de l'ITO et ce, grâce à sa disponibilité commercialement et ses propriétés optoélectroniques très intéressantes.

Nous étudions son influence sur les performances photovoltaïques des cellules solaires à simple hétérojonction de type a-Si:H/c-Si à l'aide d'un logiciel de simulation AFORS-HET. L'objectif de cette étude, est une optimisation de ces structure afin d'extraire le maximum possible du rendement de conversion.

Pour mener à bien notre étude nous avons structuré ce travail en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous étudions le matériau d'oxyde d'étain en couche mince (propriétés structurales, optoélectroniques, dopage...). Nous décrivons ensuite ses techniques d'élaboration et ses domaines d'application.

Le deuxième chapitre concerne un état de l'art sur les cellules solaires au silicium. Nous expliquons le principe de fonctionnement des cellules solaires et leurs caractéristiques principales puis nous présentons les différentes filières technologiques.

Dans le troisième chapitre, nous focalisons notre étude sur les cellules solaires à hétérojonction de type a-Si:H/c-Si en expliquant leur principe de fonctionnement.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation des cellules solaires a-Si:H/c-Si en étudiant l'effet de différents paramètres structuraux (épaisseur et dopage des couches) sur leurs performances PV. Nous présentons, aussi, une étude comparative entre ces cellules solaires à hétérojonction avec et sans couche antireflet du SnO_2 . Cette étude sera suivie d'une analyse et discussion des résultats obtenus. Nous terminons avec une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I : Etude d'oxyde d'étain en couche mince

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier les propriétés (structurales et optoélectroniques) des couches minces du dioxyde d'étain (SnO_2) et nous décrivons ses techniques d'élaboration. Nous présenterons ensuite des différentes applications notamment dans le domaine photovoltaïque.

I.1 Définition

Le dioxyde d'étain est un solide diamagnétique incolore, semi-conducteur, prenant l'apparence d'une poudre cristallisée.

Le dioxyde d'étain est le principal minerai d'étain. En général, c'est un semi-conducteur dégénéré de type « n » caractérisé par une large bande interdite : $E_g = 3.6\text{eV}$ [1].

I.2 Propriétés de l'oxyde d'étain

Le dioxyde d'étain ou « oxyde stannique » se trouve à l'état naturel sous forme de cassitérite minérale. La cassitérite est un oxyde de couleur variable, allant du jaunâtre au noir, elle est connue et exploitée depuis les temps les plus anciens. Son nom (du grec kassiteros, "étain") lui a été donné par le minéralogiste français Beudant en 1832.

Ce matériau faisant objet de notre travail, nous passons en revue ses principales propriétés.

I.2.1 Propriétés structurales

Le dioxyde d'étain a une structure cristalline de type rutile. Les paramètres du réseau cristallin sont les suivants: $a=b= 4.74\text{Å}$, $c= 3.19\text{Å}$ [2].

La maille élémentaire contient : deux atomes d'étain et quatre atomes d'oxygène. Chaque atome d'étain est le centre d'un octaèdre régulier formé par six atomes d'oxygène, tandis que chaque atome d'oxygène est entouré par trois atomes d'étain situés au sommet d'un triangle isocèle. Les rayons ioniques du cation Sn^{4+} et de l'anion O^{2-} ont pour valeurs respectivement 0.071 et 0.14 nm [3]. La figure I.1 représente un schéma d'une maille élémentaire de dioxyde d'étain.

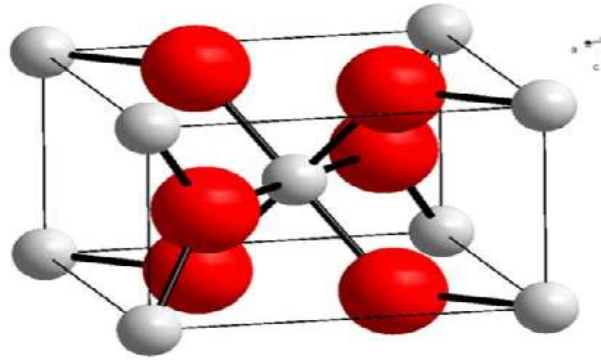


Figure I.1 : Structure cristalline de la cassitérite SnO₂.

Les raies de diffraction les plus dominants sont montrés dans la figure I.2.

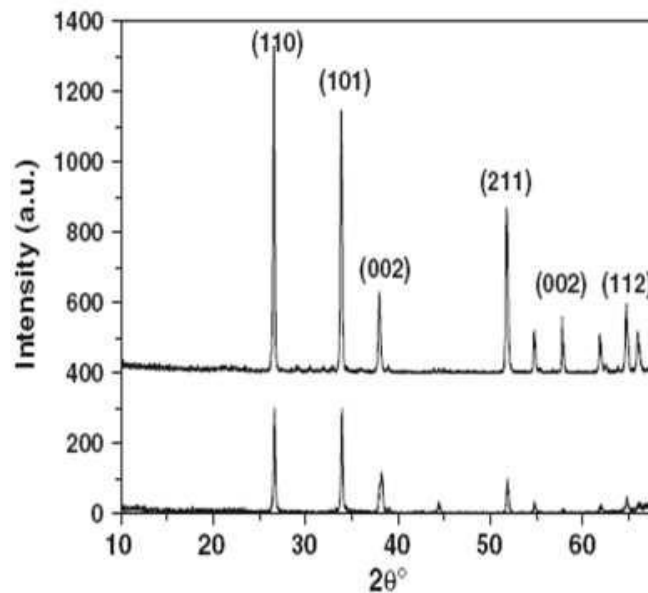


Figure I.2 : Spectre de Diffraction des rayons X (DRX) des films SnO₂ [4]

Selon des recherches intensives sur les propriétés de surface du SnO₂ [5], la surface (110) est la plus stable. Une autre surface tout aussi favorable du point de vue thermodynamique est la surface (101). Il existe aussi les surfaces (200), (211) et (220) qui sont des phases métastables.

I.2.2 Propriétés électroniques

La conductivité électrique d'oxyde d'étain est due aux défauts intrinsèques tels que les lacunes d'oxygènes qui sont formées par le transfert d'un atome d'oxygène, ou bien par l'existence d'atomes d'étain interstitiels [6].

La concentration d'électrons dans le SnO₂ pur est directement proportionnelle à celle des lacunes. La conductivité électronique est produite à cause de la mobilité des électrons à partir

de la lacune d'oxygène créée possédant 2 électrons -alors elle est dite neutre - qu'elle peut céder sous l'effet de la température. Les électrons libérés peuvent se fixer sur des atomes d'étain Sn^{4+} . Ils deviennent alors Sn^{2+} et se comportent comme des donneurs d'électrons.

I.2.3 Propriétés optiques

L'oxyde d'étain présente une forte absorption dans le domaine de l'ultraviolet. Il présente une forte transmission dans toute la gamme spectrale du visible et une partie de l'infrarouge [7].

On relève d'après la bibliographie [4] une grande dispersion de l'énergie de cette bande interdite qui varie suivant le mode de préparation et le taux du dopage (3.6- 4.22eV). La valeur moyenne expérimentale est de 3,6 eV. Le gap du dioxyde d'étain est du type direct. Les transitions des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction se font verticalement.

La transmission optique des couches minces du dioxyde d'étain est importante dans le spectre du visible $400 < \lambda < 800$ nm, elle est au-dessus de 80% [8]; et décroît pour les faibles longueurs d'ondes $\lambda < 400$ nm (hautes énergies). Pour des longueurs d'ondes importantes (faibles énergies) la lumière sera réfléchie.

I.2.4 Propriétés électriques

Les semi-conducteurs sont des matériaux présentant une conductivité électrique intermédiaire entre celle des métaux et des isolants. Les semi-conducteurs sont primordiaux en électronique, car ils offrent la possibilité de contrôler par divers moyens, aussi bien la quantité de courant électrique susceptible de les traverser que la direction que peut prendre ce courant.

Le dioxyde d'étain, étant un semi-conducteur dégénéré, possède une bonne conductivité électrique de l'ordre de 10^{-1} à $10^4 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ [9].

On réalise le dopage avec les atomes de la colonne III comme l'Indium(In) ou bien les atomes de colonne II comme le zinc (Zn) qui ont environ les mêmes rayons ioniques (0.081nm) pour In^{3+} et 0,074nm pour Zn^{2+} que les ions d'étain Sn^{4+} (0.071nm) [4].

I.3 Effet du dopage sur les propriétés de l'oxyde d'étain

On peut modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'oxyde d'étain en ayant recours au dopage. On distingue deux types de dopage :

- Le dopage non-intentionnel, lié à l'incorporation au sein de la matrice d'éléments provenant du substrat sous l'effet de hautes températures, des ions qui de fait de leurs faibles rayons atomiques peuvent facilement migrer dans la matrice.
- Le dopage contrôlé, qui consiste à introduire au sein de la matrice un élément présentant une valence différente de celle des éléments composant l'oxyde. Pour cela, il faut que le rayon atomique de l'ion "entrant" soit plus faible que celui de l'ion "hôte" afin de pouvoir réaliser une substitution. Le dopage par substitution peut se faire sur le cation (le métal) ou l'anion (l'oxygène), soit par substitution de l'étain (par l'antimoine) soit par substitution de l'oxygène (par le fluor). Nous aurons dans ces deux cas les réactions suivantes :

Substitution de l'étain [10] :



Substitution de l'oxygène [11] :



Il y a une libération des électrons dans la bande de valence qui passe dans la bande de conduction, et l'augmentation des porteurs de charge ainsi que la conductivité. La technique d'élaboration des films SnO_2 peut influencer sur la résistivité électrique et l'absorption optique.

I.3.1. Effet du dopage sur les propriétés structurales

Des modifications dans l'orientation cristallographique [12] et la taille des cristaux [13] peuvent se produire quand on augmente le taux de n'importe quel élément dopant.

Selon la teneur introduite dans la matrice du dioxyde d'étain et selon l'élément dopant (l'Antimoine, le Fluor, le Molybdène, l'Indium), le dopage s'accompagne d'un changement de la taille des grains ; Ces atomes augmentent les contraintes internes et réduisent la croissance des cristallites.

Le dioxyde d'étain obtenu par la méthode sol-gel dip-coating recuit à des températures allant de 300°C à 600 °C ou celui élaboré par la méthode spray pyrolyse recuit à des températures allant de 400°C à 700°C ne gardent pas la même structure et orientations cristallographiques [14] après dopage.

L'introduction de l'indium jusqu'à $In/Sn < 0,4$ favorise la structure tétragonale du SnO_2 comme le montre la Figure I-3 (a, b, c); par contre si $In/Sn \geq 0,4$ les pics relatifs à cette structure sont un peu décalés de quelques degrés et de nouveaux pics apparaissent. Ces derniers caractérisent les plans $\langle 222 \rangle$ et $\langle 400 \rangle$ de la structure cubique d'oxyde d'indium (In_2O_3) Figure I-3 (d).

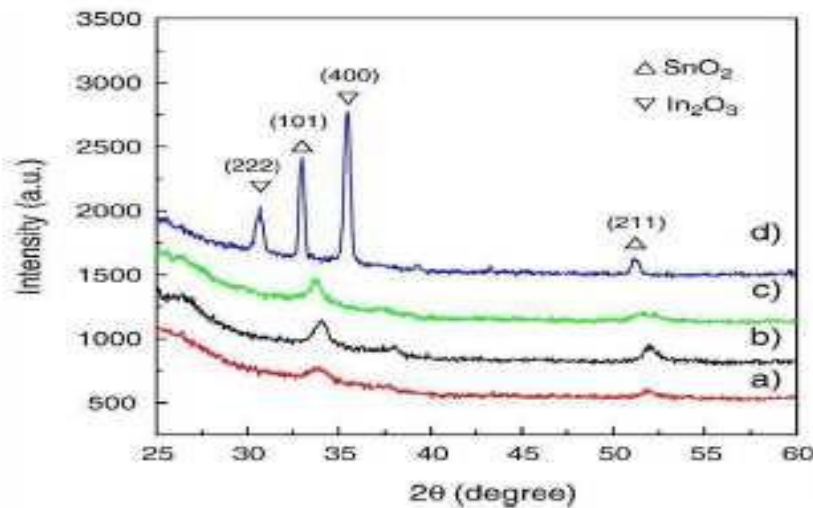


Figure I-3: Spectre de diffractions des Rayons X (XRD) des films SnO_2 obtenus par spray pyrolyse après un recuit à 700 °C avec un rapport atomique In / Sn : (a)=0.1, (b)=0.2, (c)=0.3, (d)=0.4 [14].

I.3.2 Effet du dopage sur les propriétés électriques

La variation structurelle provoque des modifications de propriétés électriques car le dopage augmente le nombre de porteurs de charges au sein de la matrice, et donc peut modifier de façon plus ou moins importante, selon le dopant et le taux de dopage, la conductivité du matériau.

Le dopage des films de SnO_2 à l'antimoine augmente la densité et la mobilité des porteurs de charge conduisant ainsi à une diminution de la résistivité [15] qui est l'inverse de la conductivité comme le montre la relation (3).

$$\rho = \frac{1}{eN_D\mu_n} \quad (3)$$

I.3.3 Effet de dopage sur les propriétés optiques du SnO₂

Le dopage améliore les propriétés optiques des couches de SnO₂, les films dopés au fluor ou l'indium présentent une forte transmission dans le spectre visible. La transmission dans le domaine UV-Vis est influencée par le taux de dopage (figure I-4).

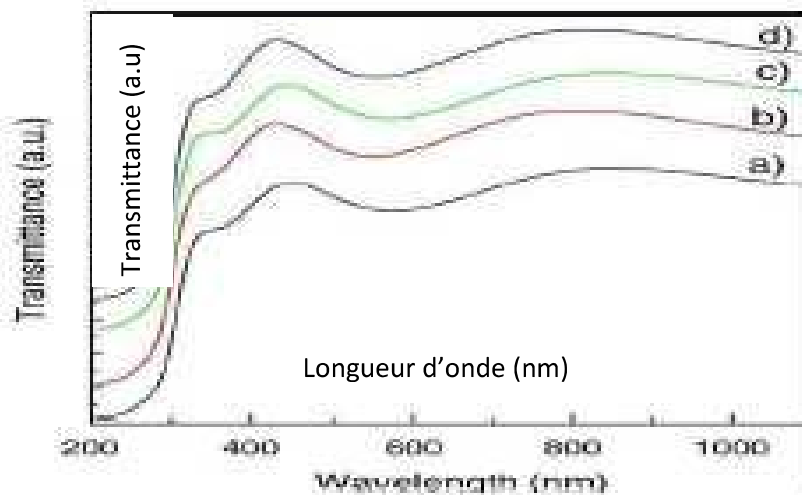


Figure I-4 : Spectre de transmission UV–Visible des films SnO₂ avec différents rapports atomiques : In /Sn = (a) =0.1, (b)=0.2, (c)=0.3, (d)=0.4 [14].

I.4 Rôle de l'épaisseur du film déposé sur les propriétés du SnO₂

L'épaisseur des films joue un rôle très important sur les propriétés optiques des couches minces de SnO₂. En effet, leur taux de transmission diminue lorsque les films deviennent plus épais [12]. Quand l'épaisseur des couches augmente leur taux de cristallinité croît et leur résistivité diminue comme le montre la Figure I-5.

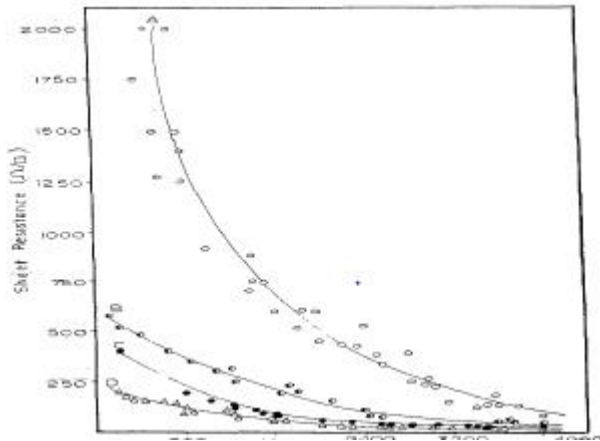


Figure I-5-Variation de Résistance carrée en fonction des épaisseurs de différents films de SnO₂ recuits à 400 °C : (a) SnO₂ non dopé (b) SnO₂ : Mo (6 at %); (c) SnO₂: Sb (1.5 at. %); SnO₂: F (4.5 at. %) [14].

I.5 Les techniques d'élaboration du SnO₂

Le dioxyde d'étain, peut être déposé en couche minces par plusieurs techniques. Une étude bibliographique a montré que le SnO₂ est majoritairement élaboré par deux méthodes différentes :

- Les techniques de dépôt en phase vapeur chimiques CVD qui consistent à la formation d'un film sur un substrat à partir de réactions chimiques. Nous présenterons aussi la technique d'évaporation thermique.
- Les techniques de dépôt en phase vapeur physiques qui portent l'abréviation PVD qui est obtenue par condensation d'atomes en phase vapeur à partir d'une cible métallique introduite sous forme solide et mise en phase vapeur dans l'enceinte de dépôt. Comme les méthodes sol gel et spray pyrolyse.

I.5.1 Evaporation thermique

Le matériau va chauffer sous une pression réduite jusqu'à sa température d'évaporation. L'évaporation est effectuée sous un vide poussé de l'ordre de 2×10^{-5} mb dans le but d'augmenter sa vitesse [4]. C'est la méthode la plus simple car il n'est pas nécessaire d'injecter un gaz pour créer un plasma. L'évaporation reste toutefois une méthode particulièrement appréciée car elle conduit à l'élaboration des matériaux très purs.

Dans la bibliographie, l'évaporation thermique est présentée comme étant une des meilleures techniques de dépôts de films minces de SnO₂.

Les vapeurs du matériau à déposer sont obtenues en chauffant celui-ci par différentes sources d'énergies :

- Chauffage résistif : évaporation par effet Joule ;
- Chauffage par faisceau d'électrons : bombardement électronique ;
- Chauffage par faisceau laser : évaporation par ablation Laser de puissance.

a) Evaporation par effet joule

Cette méthode d'évaporation est simple à mettre en œuvre. elle consiste à déposer le matériau à vaporiser sous forme de filaments dans une nacelle ou creuset, chauffé électriquement par un passage d'un fort courant dans le creuset d'évaporation, à travers la résistance chauffante jusqu'à obtenir la température d'évaporation ou de sublimation du matériau. Le métal fond, se vaporise, et se dépose sur le substrat. La distance entre le creuset et le substrat varie classiquement de 1 nanomètre par minute à 10 micromètres par minute [14]. L'unique exigence de cette technique est d'avoir un environnement sous vide dans lequel une température suffisante est donnée à l'évaporant pour atteindre la pression de vapeur nécessaire à l'évaporation.

C'est une technique très utilisée pour la préparation des films métallique alliages, et beaucoup de composants dans le domaine de la microélectronique tel que les cartes à puce ou encore dans le domaine biomédical. Le schéma de la figure I-6 représente un dispositif de dépôt des couches d'étain métallique.

Parmi les inconvénients de cette technique, on cite :

- La difficulté d'atteindre de très hautes températures d'évaporation pour le dépôt des métaux réfractaires.
- Les contaminations dues aux chauffages des nacelles et des creusets.

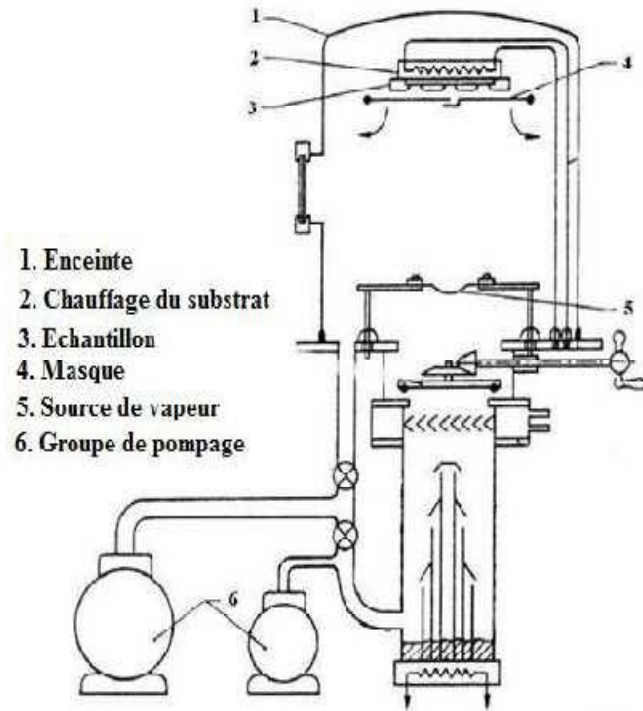


Figure I-5-Schéma d'une installation de dépôt par évaporation sous vide [16].

b) Evaporation par bombardement électronique:

On a la source qui est un faisceau d'électrons générés par un filament de tungstène réfléchi vers le creuset qui contient le métal (évaporant), les électrons sont accélérés et focalisés par voie électromagnétique où l'énergie cinétique des électrons est convertie en énergie thermique pour évaporer le matériau à haut point de fusion (figure I-6).

Cette technique est très utilisée pour évaporer des matériaux réfractaires parce qu'elle permet d'atteindre des puissances élevées de chauffage avec une très haute pureté des dépôts et un bon contrôle de leurs vitesses.

Cette méthode présente comme inconvénients : l'impossibilité de travailler à haute pression, ainsi que la difficulté d'évaporer des matériaux composés tels que les oxydes et les nitrures.

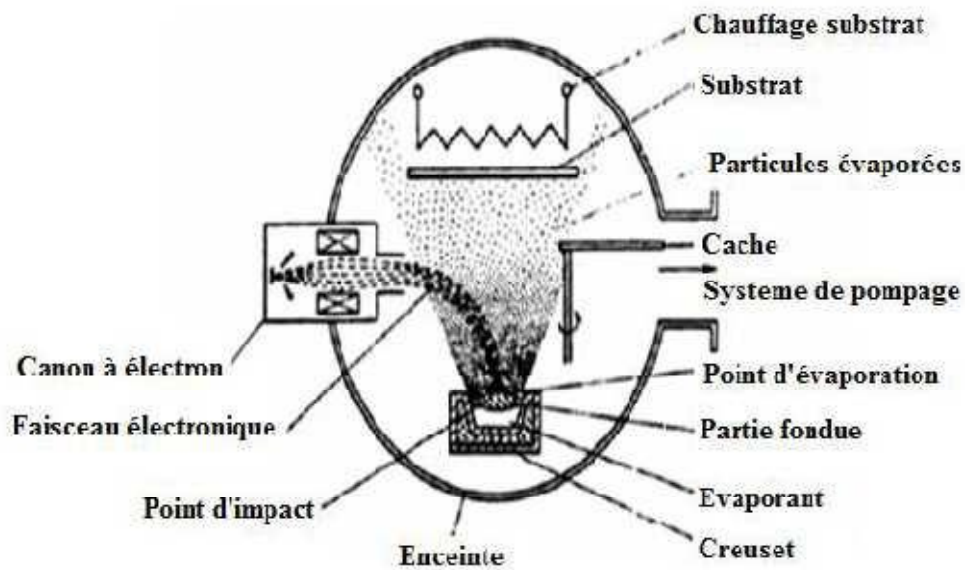


Figure I-6 : Principe de l'évaporation à canon à électron [4].

c) Evaporation par ablation Laser

L'ablation laser (PLD ou Pulsed Laser Deposition), est une technique qui consiste à focaliser un rayonnement laser intense sur la surface d'une cible massive, dans une enceinte à vide où le faisceau est partiellement absorbé ; une quantité de matière est arrachée de la cible sous la forme d'une vapeur qui se condense à la surface d'un substrat qui est situé à quelques centimètres en face de la cible (Figure I-7).

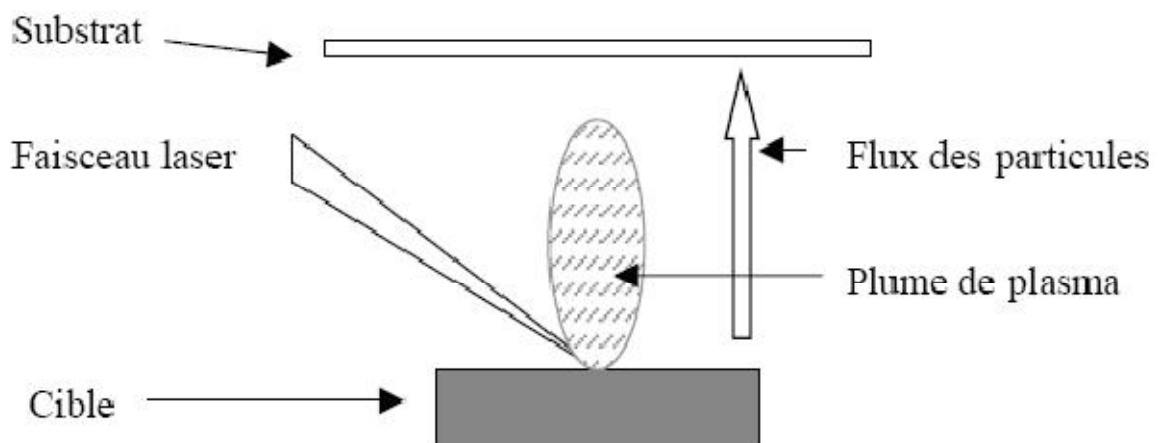


Figure I-7 : Schéma de principe de l'ablation laser [17].

I.5.2 La méthode Sol-Gel

La méthode sol-gel permet d'élaborer une large variété d'oxydes sous différentes configurations (films minces, poudres). Elle est utilisée dans plusieurs domaines technologiques, l'optique et l'électronique.

La solution de départ est constituée d'un solvant (en général un alcool), parfois un catalyseur (acide ou basique) et de l'eau. Chaque composé est dosé de façon très précise.

Ce système est alors à l'état Gel, il consiste en une étape de séchage (20 à 200°C) qui a pour but de faire évaporer les solvants piégés dans le gel (alcool, eau) [3]. Ce dépôt peut être réalisé par deux manières différentes :

a) la centrifugation ou " spin-coating "

Cette méthode consiste à déposer par centrifugation un excès de liquide sur un substrat (Figure I-8). Ensuite, le substrat subit une rotation à grande vitesse dans le but d'étaler le fluide à la surface. La rotation est maintenue pendant un certain temps jusqu'à atteindre l'épaisseur désirée de la couche avec la relation suivante [3] :

$$h = c. \left(\frac{3\eta e}{2\rho\omega^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Avec

- c : une constante.
- e : la vitesse d'évaporation.
- η : la viscosité de la solution.
- ω : la vitesse de rotation.
- ρ : la densité de la solution.

La dernière étape consiste en le séchage de la couche déposée qui est très important dans la réalisation de matériaux de qualité, elle correspond à l'évaporation des solvants volatilisés.

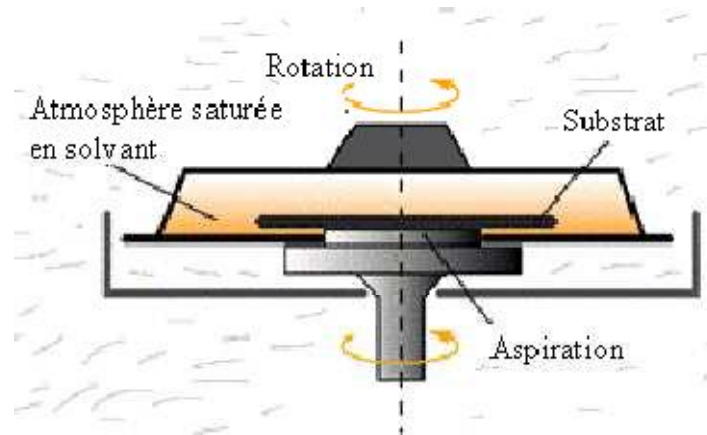


Figure I-8 : Technique de spin-coating [4].

b) Trempage – tirage ou Dip-Coating

Dans une enceinte où les conditions atmosphériques sont contrôlées, on immerge le substrat dans la solution à déposer avec une vitesse donnée et on la retire ensuite avec la même vitesse.

L'évaporation du solvant est suivie par un séchage des dépôts et finalement un recuit pour une bonne cristallisation [4].

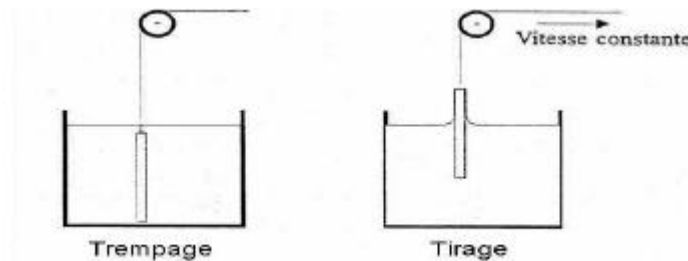


Figure I-9 : Dépôt de couches minces par trempage-tirage [14, 3].

• Les inconvénients de la technique sol- gel

- Un coût élevé pour certains précurseurs ;
- Des temps de l'élaboration assez longs si l'on désire une haute qualité du matériau final ;
- Nécessité de contrôler précisément l'état de surface du substrat.

I.6 Les domaines d'application du SnO₂

Grâce à l'importance de propriétés physiques, électriques et optiques de l'oxyde d'étain on peut l'utiliser comme :

a) Un matériau de base dans les batteries de lithium :

Un grand intérêt a été donné au SnO₂ dans le but d'augmenter la capacité des piles et de limiter l'utilisation du carbone. Les chercheurs ont associé au lithium l'oxyde d'étain, sous forme de composé mixte Li₂SnO₃ / LiMn₂O₄, ou bien sous forme de multicouches Sn/LiO₂ [4]. L'utilisation d'étain comme composé mixte dans les batteries permet d'augmenter considérablement le nombre de cycles de charge-décharge possibles des accumulateurs.

b) Une électrode conductrice dans les couches minces des cellules photovoltaïques :

Le SnO₂ est utilisé comme électrode transparente sur la face avant des cellules solaires. Il possède une conductivité et une mobilité électronique très élevés, il présente aussi une forte transmission (plus de 85 %) dans le visible.

Des couches de dioxyde d'étain non dopées déposées par différentes techniques sont utilisées comme couches antireflet, dans les cellules solaires, afin de réduire la réflexion du rayonnement incident à la surface des photopiles en réduisant la réflectivité moyenne à 3 % dans une gamme de longueurs d'onde de 600 à 1000 nm [18].

Dans une cellule de structure MIS (Métal-Isolant Semi-conducteur) on peut l'utiliser comme couche métallique (SnO₂/SiO₂/N-Si) avec un rendement de conversion énergétique intéressant [4].

Le tableau I-1 présente le choix des couches TCO répondant le mieux à ces propriétés.

Propriétés	Matériau
Meilleure transparence	ZnO:F, Cd ₂ SnO ₄
Meilleure conductivité	In ₂ O ₃ :Sn
Meilleur contact avec Si	SnO ₂ :F, ZnSnO ₃
Meilleure stabilité thermique	SnO ₂ :F, TiN, Cd ₂ SnO ₄
Meilleure résistance mécanique	TiN, SnO ₂ :F
Meilleure stabilité chimique	SnO ₂ :F
Plus faible toxicité	ZnO:F, SnO ₂ :F
Plus faible coût de fabrication	SnO ₂ :F

Tableau I. Principales propriétés des différentes couches TCO [14].

c) Vitrage à isolation thermique

Pour réduire l'échauffement dû au rayonnement solaire à l'intérieur des locaux, des bâtiments et aussi dans les moyens de transports, on utilise des verres revêtus d'une couche transparente d'oxyde métallique déposée sur l'une des faces intérieures.

Le dioxyde d'étain fait partie des oxydes transparents conducteurs OTC, utilisés pour la réalisation de l'isolation renforcée [4]. Son utilisation est confortée par son faible cout de revient vis-à-vis d'autres oxydes métalliques comme l'ITO (oxyde d'indium dopé à l'étain) et ses propriétés physiques intéressantes, telle que sa forte transmission optique dans le visible, ainsi que la grande réflexion dans l'infrarouge.

I.7 Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les différentes propriétés de l'oxyde d'étain (structurales, électroniques et optiques), en étudiant le rôle du dopage sur ces propriétés.

Ensuite, Nous avons détaillé les différentes techniques utilisées pour l'élaboration des couches minces du SnO₂ en précisant les avantages et les inconvénients de chaque technique.

Nous pouvons conclure que le SnO₂ présente une bonne transmission optique combinée à une bonne conductivité électrique, qui privilégie son utilisation dans de nombreuses applications notamment photovoltaïques.

REFERENCE DU CHAPITRE I

[1]: M. Batzill, U. Diebold, "The surface and materials science of tin oxide", Progress in Surface Science, Vol. 79, 2005.

[2]: A.A. Bolzan, C. Fong et al, "Structural studies of rutile-type metal dioxides", Acta Crystallogr. Sec. B-Struct. Sci. Vol. 53, p. 373, 1997.

[3]: Tawous KACEL, diplôme de Magister, Couches minces de SnO₂ nanocristallines obtenues par Sol-Gel et étude des conditions de leurs cristallisations, Université Ferhat Abbas SETIF, 2007.

[4]: SEFARDJELLA Hocine, thèse de doctorat, Propriétés opto-électriques des films minces du dioxyde d'étain, Université 20 aout 1955- Skikda, 2015.

[5]: *Taras DAUZHENKA*, thèse de doctorat, Couches minces d'oxyde d'étain : la localisation faible et les effets de l'interaction, Université Toulouse III, 2011.

[6]: C. Kilic, A. Zunger, "Origins of coexistence of conductivity and transparency in SnO₂", Phy. Rev. Lett. Vol. 88, 2002.

[7]: A.M.B. Van Mol, "Chemical Vapor Deposition of Tin Oxide Thin Films", Thèse de Doctorat, Eindhoven University, 2003.

[8]: D.S. Ginley, C. Bright, "Transparent conducting oxides", MRS Bull. Vol. 25, p. 15, 2000.

[9]: Y. Matsui, Y. Yamamoto et al, "Stability in Electrical Properties of Ultra-Thin Tin Oxide Films", Materials Research Society, Vol. 621, 2000.

[10]: G. Jain, R. Kumar, "Electrical and optical properties of tin oxide and antimony doped tin oxide films", Opt. Mater. Vol. 26, p. 27, 2004.

[11]: M.C. Esteves, D. Gouve, et al, "Effect of fluorine doping on the properties of tin oxide based powders", App. Surf. Sci. Vol. 229, p. 24, 2004.

[12]: K. Omura et al, "A pyrosol technique to deposit highly transparent, low resistance SnO₂ : F thin films from Dimethyltin Dichloride", Journal of the Electrochemical Society, Vol. 6, 1999.

[13]: D. Ju, J. Chung, "Preparation of Sb/SnO₂ particles and their films utilizing the dip coating method", Industrial & engineering chemistry research, Vol. 37, p. 1827, 1998.

[14]: LAGHRIB Souad, thèse de doctorat, Synthèse des films minces de : SnO₂, SnO₂:In par deux procédés physique et chimique et étude de leur caractérisation, Université Ferhat Abbas Setif.

[15]: D. Goyal, C. Agashe, et al, "Effect of dopant incorporation on structural and electrical properties of sprayed SnO₂:Sb films", Journal of Applied Physics, Vol. 73 (11), p. 7520, 1993.

[16]: W. Man, H. Yan et al, "Grain size and hillock growth of vacuum evaporated SnO₂ thin films", Journal of Vacuum Science and Technology, Vol. A 14 (3), p. 1593, 1996.

[17]: Pierre Aubreton, these de doctorat, U de Limoges, 2005.

[18]: R.Tala-Ighil M.Boumaour, K.Melhani, F.Ait Amar et A.Iratni,
Revue des énergies renouvelables vol11 n°2(2008)277-280

Chapitre II : Etat de l'art sur les cellules solaires au silicium

Introduction

Le silicium est l'un des éléments les plus utilisés dans la majorité des dispositifs ; c'est la base de l'industrie électronique moderne. Il existe dans la nature sous forme de composées : sous forme de dioxyde de silicium (SiO_2), ou sous forme de silice amorphe (dans le sable).

Dans ce chapitre nous allons présenter les notions fondamentales sur l'élément clé dans la conversion photovoltaïque (les cellules solaire au silicium).

II.1 L'effet photovoltaïque

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque (ou encore photoélectrique), est un phénomène physique qui 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. Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente.

Lorsqu'on expose ce matériau à la lumière du soleil les atomes sont bombardés par les photons constituant la lumière, sous l'action de ce bombardement, les électrons de couche de valence ont tendance à être arrachés et créent en suite une tension électrique continue faible.

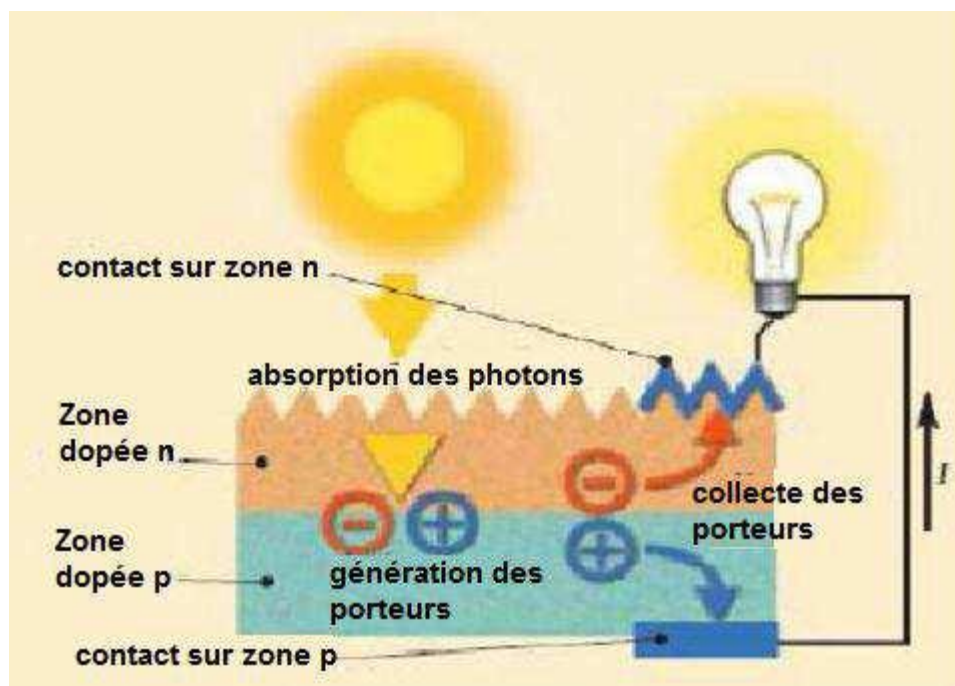


Figure II.1 L'effet photovoltaïque

II.2 Principe de fonctionnement de la cellule solaire

II.2.1 Définition d'une cellule solaire

La cellule solaire est un dispositif électronique capable de capter et convertir directement l'énergie des rayons lumineux en électricité. Cette conversion est appelée la conversion photovoltaïque. La figure II-2 montre un schéma simplifié d'une cellule solaire qui est une plaquette du matériau semi-conducteur; où la jonction $P-N$ représente le cœur de la cellule photovoltaïque

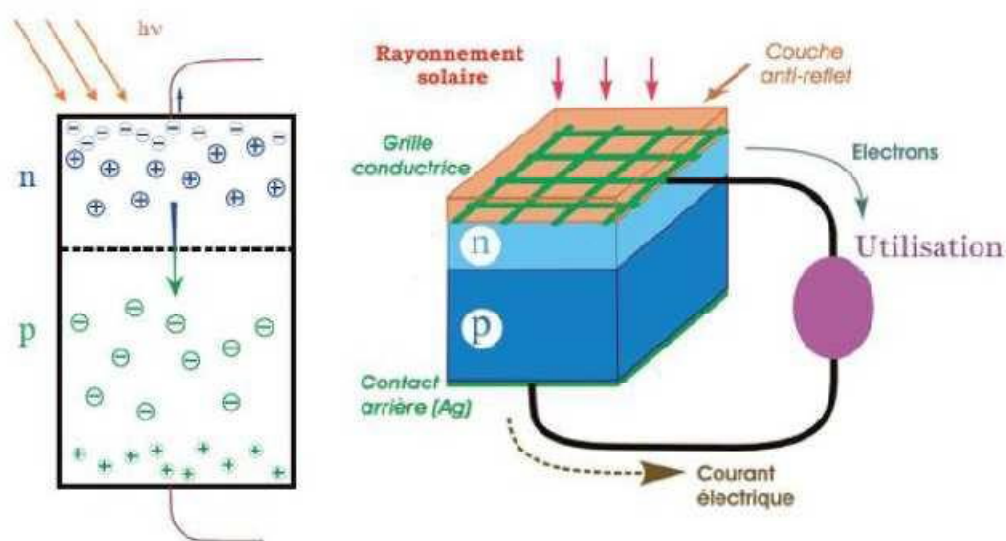


Figure II.2 Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire.

II.2.2 Structure d'une cellule solaire:

Il existe différentes structures de cellules photovoltaïques, pour améliorer la passivation du matériau et des surfaces, et pour diminuer la résistance série et le coût de la cellule.

On présente ici les différentes compositions d'une cellule photovoltaïque (figure II-3) :

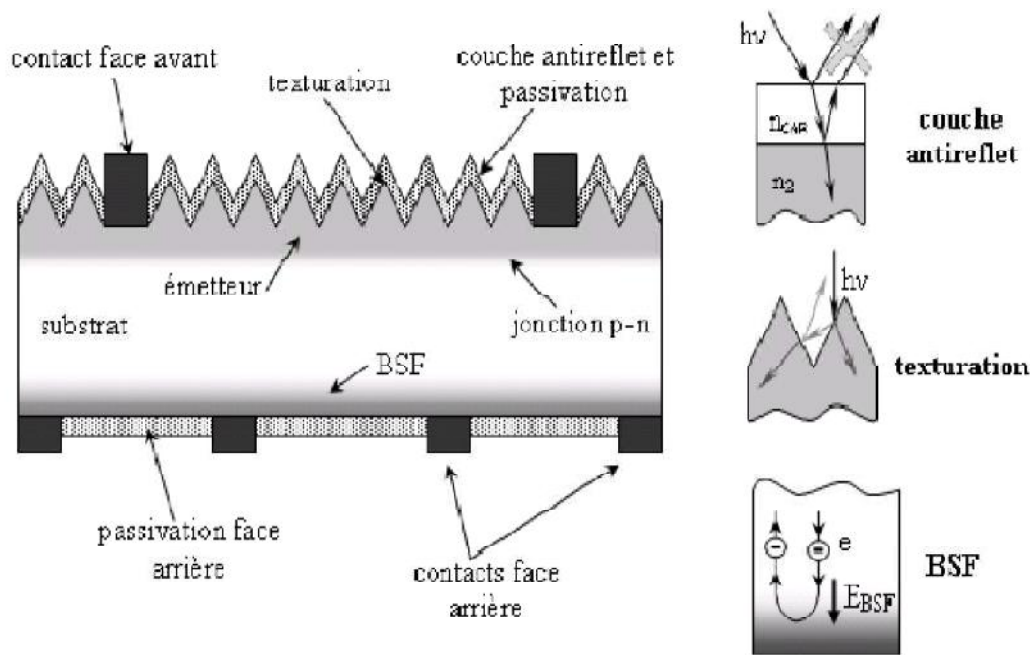


Figure II-3 : Composition d'une cellule photovoltaïque.

a. Couches de passivation des faces avant et arrière

Les contacts métalliques en face avant et en face arrière, permettant de récupérer les porteurs photogénérés. Pour ça; deux électrodes sont élaborées sur la plaquette du semi-conducteur, l'une qui recouvre la totalité de la face arrière pour assurer le contact avec la zone p, et l'autre en forme de grille sur la face avant. La géométrie de cette grille étant un compromis entre une faible occultation du rayonnement et un bon contact électrique avec la zone n.

Plusieurs couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitrure de silicium (SiN_x : H).

b. Couche antireflet

La quantité de photons pénétrant la cellule photovoltaïque dépendant fortement de la réflectivité de sa surface. Afin de minimiser la réflexion de la lumière en surface, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Elle est obtenue par le dépôt d'une couche d'oxyde sur le semi-conducteur. Son épaisseur égale à [1].

$$d_{car} = \frac{(2N+1)\lambda}{4n} \quad (5)$$

Avec

N : entier : $N= 0, 1, 2, 4\dots$

λ : longueur d'onde

n : indice de réfraction.

Déférentes CAR sont utilisées en photovoltaïque : TiO_2 , SiO_2 , ZnS , $\text{SiN}_x\dots$

c. Texturation de la surface

Pour optimiser les pertes dues à la réflexion, il existe une autre préparation de la surface réceptrice du semi-conducteur c'est la texturation qui consiste à créer des pyramides de quelques microns de hauteur modifiant la planéité de la surface en introduisant un relief. Ce dernier, tout en augmentant la surface, induit des réflexions multiples sur les facettes le constituant et limiter la réflectivité de la surface.

La texturation de surface peut se faire avec l'attaque chimique (KOH, NaOH ou bien l'acide). Texturation mécanique, gravure plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflective de 39% à moins de 10%.

d. Création de la jonction p/p+ à l'arrière (BSF)

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction p^+/p) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée. Le BSF fait l'objet de nombreuses recherches car l'épaisseur des plaques est réduite afin de réaliser une économie de matière première. Elle représente désormais des longueurs de diffusion des porteurs minoritaires élevées (environ 200 μm pour le polix) [2].

II.2.3 Principe de fonctionnement

Les cellules PV sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs. Le principe de fonctionnement d'une cellule PV est basé sur trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau : quand $(h.v \geq E_g)$;
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques ;
- La collection des charges dans un circuit électrique.

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est illustré sur la figure II-4:

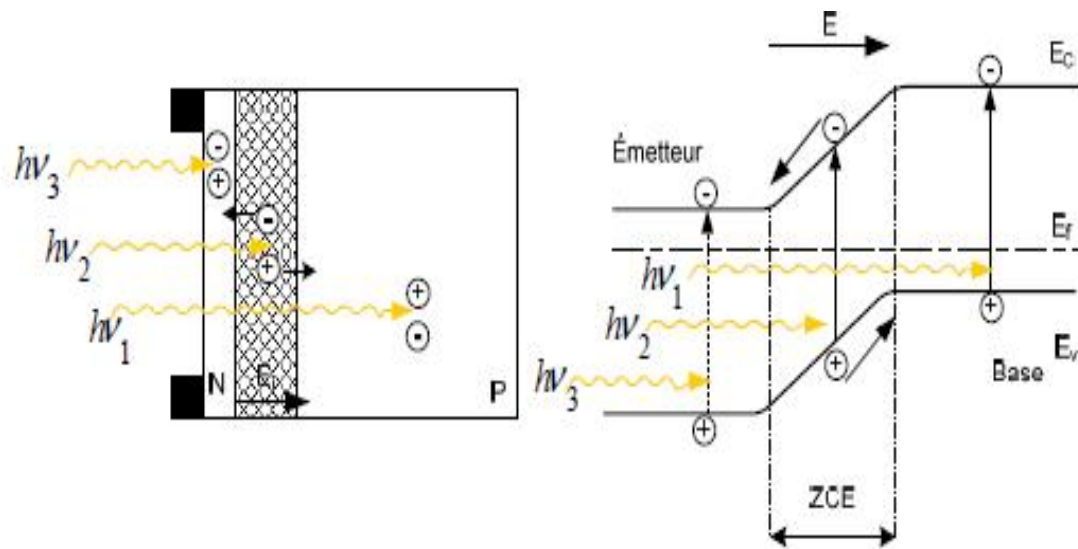


Figure II.4 Structure d'une cellule solaire au silicium et son diagramme de bande.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones *n* et *p* et dans la zone de charge d'espace, le comportement des porteurs créés diffère suivant le lieu de leur création :

- a)** Si la paire (e^+ , e^-) est créée dans la région P, les électrons qui y sont des porteurs minoritaires traversent la jonction et vont du côté N.
- b)** Si la paire (e^+ , e^-) est créée dans la région N, les trous qui y sont minoritaires traversent la jonction et vont du côté P.
- c)** Si la paire (e^+ , e^-) est créée dans la ZCE, elle va être dissociée sous l'influence du champ électrique interne qui règne dans cette zone où l'électron est propulsé vers la zone N et le trou vers la zone P.

Sous éclairage il apparaît un excès d'électrons dans la zone N et un autre du côté P ; l'apparition de cet excès donnera naissance à une différence de potentiel entre les deux régions, la diffusion des porteurs minoritaires donne naissance à un photo-courant de génération et le courant total est donné par la relation suivante :

$$I_{ph} = I_{ph} \text{diffusion} + I_{ph} \text{génération} \quad (6)$$

II.3 Schéma électrique équivalent

Pour décrire le comportement électrique d'une cellule on utilise le circuit électrique équivalent. Nous allons décrire ici une cellule photovoltaïque dans l'obscurité et sous illumination.

Dans l'obscurité, une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s . Le courant I_d dans la diode est donné par:

$$I_d = I_s [e^{x p (qV/nKT)} - 1] \quad (7)$$

Où :

I_s : le courant de saturation en Ampère (A).

n : le facteur d'idéalité

K : la constante de Boltzmann ($1.38066 \times 10^{-23} \text{J/K} = 8.61400 \times 10^{-5} \text{eV/K}$).

T : la température absolue en Kelvin (K).

q : la charge absolue d'un électron en coulomb ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$).

Sous éclairage, un terme I_{ph} , tenant compte du photo-courant généré est rajouté, la figure II.5 présente le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairage.

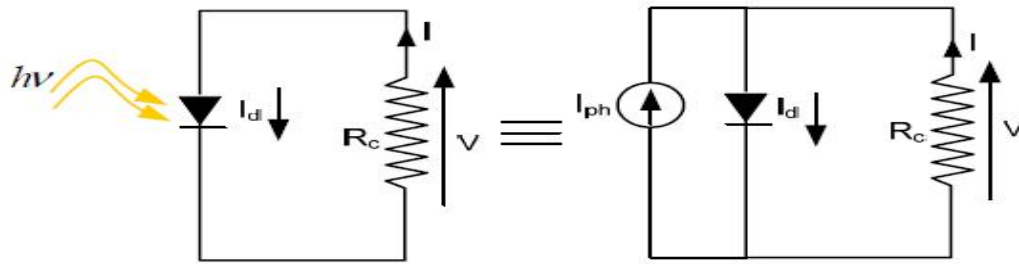


Figure II.5 Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque idéale sous éclairement.

Le courant est représenté par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_s [e x p (qV/nKT) - 1] \quad (8)$$

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, l'équation déterminant le courant est alors:

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{q(V + I.R_s)}{nkT} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \right) \quad (9)$$

Où

I_{ph} : Courant photogénéré par le générateur solaire sous éclairement ;

V : Tension aux bornes de la cellule ;

I_s : Courant de saturation de la diode ;

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

n : Facteur d'idéalité de la diode ;

T : Température.

R_s : Résistance série ;

R_{sh} : Résistance shunt.

Et par conséquent le schéma équivalent est le suivant :

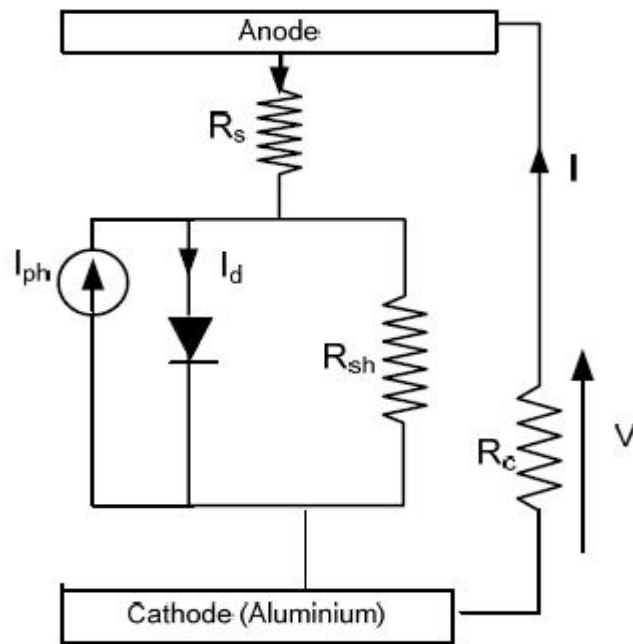


Figure II.6 Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque réelle sous éclairement

- ❖ Le générateur du courant (I_{ph}) : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photogénéré.
- ❖ La diode (D) : modélise la jonction $P-N$.
- ❖ La résistance série R_s : modélise les pertes résistives au sein de la photopile, elle doit être le plus faible possible pour limiter son influence sur la caractéristique I-V de la cellule.

La figure II.7 montre l'influence de la résistance série. La tension de circuit ouvert n'est pas modifiée, mais la caractéristique se déforme très rapidement.

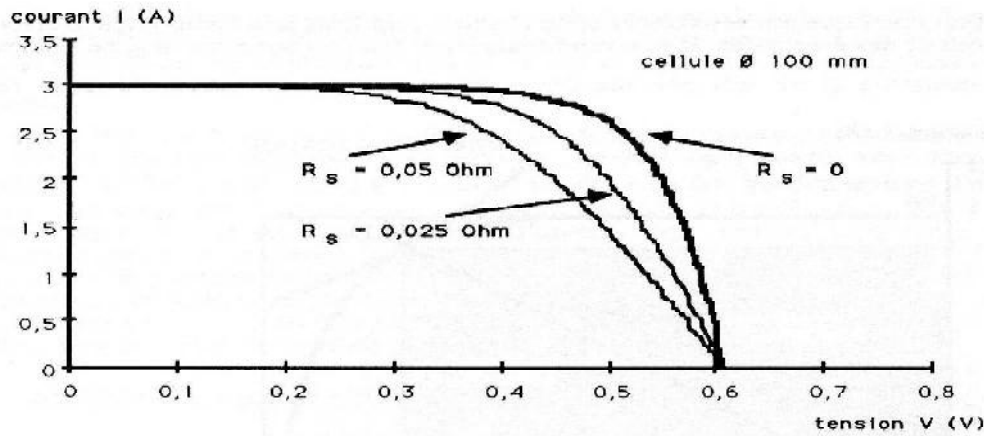


Figure II.7 : Influence de résistance série sur la caractéristique I(V) [3].

La résistance parallèle R_{sh} correspond à une résistance de fuite entre les deux zones n et p de la jonction; en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge.

Cette résistance devra être la plus élevée possible car sa valeur typique influence sur la tension de circuit ouvert comme il montre la figure II.8

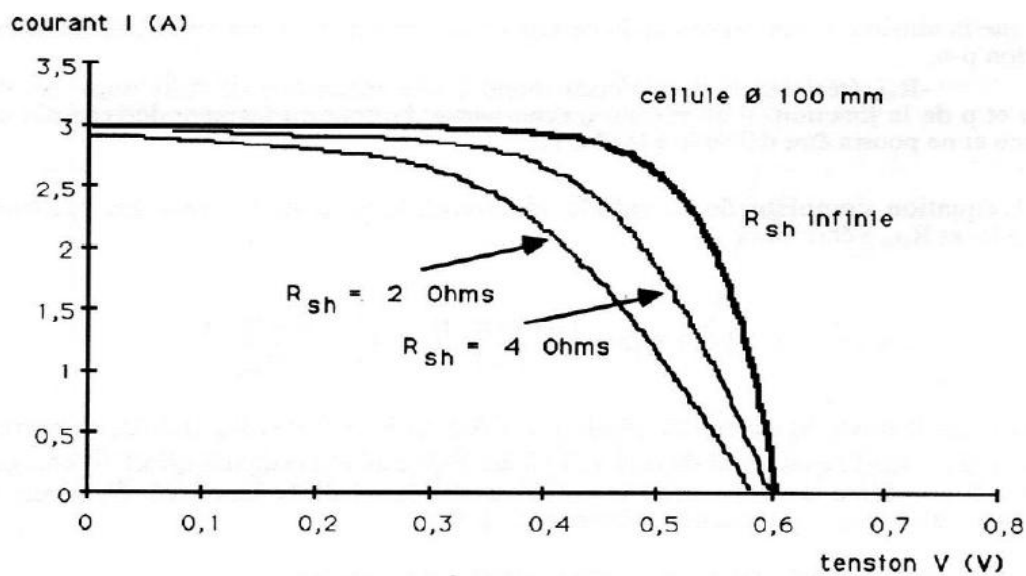


Figure II.8 : Influence de résistance shunt sur la caractéristique I(V) [4].

II.4 La Caractéristique courant/tension :

La variation du courant en fonction de la tension à l'obscurité et en particulier sous éclairage, permet d'évaluer les performances de la cellule solaire. La figure II-9 montre un exemple de caractéristiques $I(V)$ de cellule solaire sans et avec éclairage.

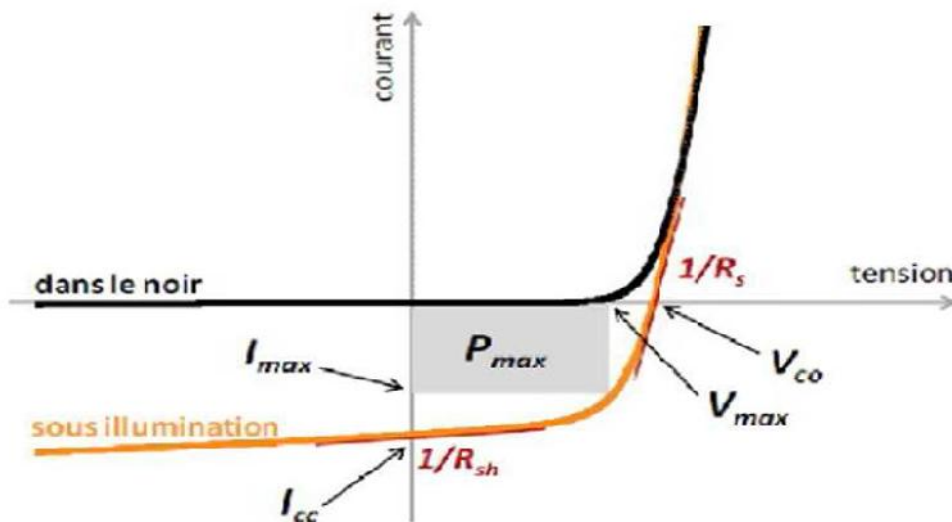


Figure II.9 Caractéristique I-V d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclairage.

On remarque que la courbe sous illumination est simplement décalée par rapport à la première d'une valeur I_{cc} (courant de court-circuit) qui traduit la génération constante du courant par la lumière.

I_{max} et V_{max} désignent les coordonnées du courant et de la tension qui maximisent la puissance délivrée par la cellule.

II.5 Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire

A partir de la caractéristique $I(V)$ sous éclairage illustrée au-dessus on peut accéder aux nombreux paramètres qui sont :

- Courant de court-circuit (I_{cc}) ;
- la tension à circuit ouvert (V_{co}) ;
- Puissance maximale P_m ;

- le facteur de forme (FF) du composant ;
- le rendement de conversion (η).

a) Le courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit I_{cc} est la valeur du courant lorsque la tension aux bornes de cellule est nulle ($V=0$). On le mesure en branchant les bornes de la cellule directement à un ampèremètre.

b) Tension de circuit ouvert V_{co}

La tension de circuit ouvert est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert c'est-à-dire $I = 0$.

Cette tension est de l'ordre de 0.5 à 0.7V pour une cellule élémentaire et elle dépend des matériaux, des structures et des technologies d'élaboration de la cellule et varie avec l'éclairement et la température.

c) Puissance maximale P_m

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance ; c'est le produit du courant de sortie délivré par cette dernière et la tension à ses bornes. La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit $V.I$ est maximum.

d) Facteur de forme FF

Le facteur de forme (FF) « en anglais : *Fill Factor* » indique la qualité de cellule. Compris entre 0 et 1, on l'exprime en %. Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale et le produit ($I_{cc} \times V_{co}$); il est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (10)$$

e) **Rendement de conversion η**

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_i} = \frac{J_{sc} \cdot V_{co} \cdot FF}{P_i} \quad (11)$$

Où P_i est la puissance lumineuse incidente (W/cm^2). Le rendement, souvent exprimé en pourcentage.

II.6 Les filières technologiques des cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité il existe trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques comme le montre la figure suivante :

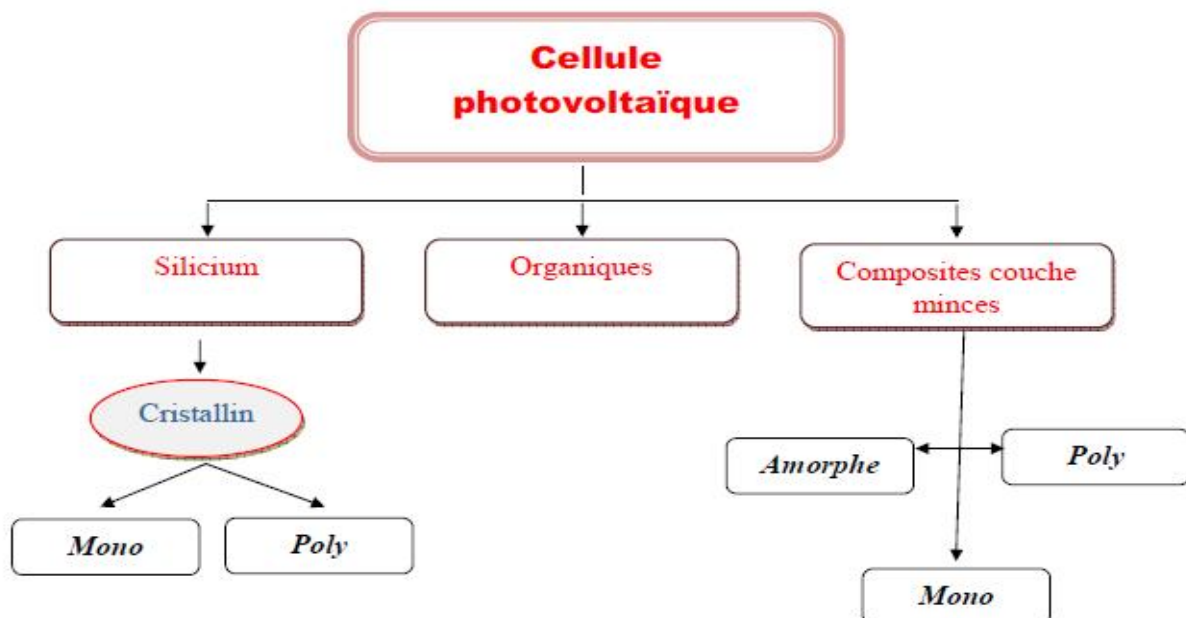


Figure II.10 Organigramme des différentes technologies.

Dans notre étude, on s'intéressera aux cellules solaires à base de silicium.

❖ le silicium

Le silicium est un semi-conducteur ayant une structure de bandes à gap indirect d'une valeur de 1,12 eV. Aujourd'hui, plus de 99% des équipements photovoltaïques utilisent le silicium comme matériaux de base, car il est extrêmement abondant, stable et non toxique. Il comporte deux technologies :

II.6.1 Le silicium monocristallin

Tous les atomes de silicium monocristallin font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes.

On obtient le silicium monocristallin à partir de silicium qu'on extrait de silice. On le place dans un creuset et on le chauffe à 1500°C. Le creuset est refroidi par un germe correctement orienté pour obtenir un lingot de silicium monocristallin. C'est la méthode de Czochralski (voir la figure II-11). Ce cylindre est ensuite coupé en plaquettes de 200-500 µm d'épaisseur.

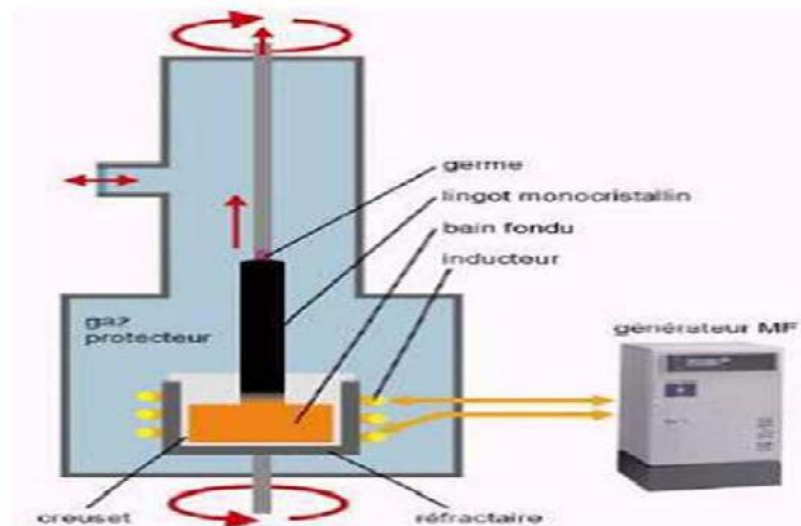


Figure II.11 : Méthode de Czochralski [5]

Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 14 et 20%. Son coût de fabrication est élevé et la durée de vie est presque 30 ans. Sa couleur est bleue uniforme comme le montre la Figure II.12.



Figure II.12 Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin.

II.6.2 Le silicium poly cristallin

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules sont bleues mais non uniforme ; on distingue des motifs créés par les différents cristaux (Figure II-13).

Les techniques d'élaboration sont moins onéreuses, on peut réaliser un lingot de grandes dimensions par refroidissement directionnel d'une masse de silicium en fusion. Le lingot obtenu est composé de plusieurs gros cristaux, séparés par des joints de grain. Le rendement de ces cellules est compris entre 11 à 15% (19,8% en laboratoire).



Figure II.13 Cellule photovoltaïque à base de silicium poly cristallin.

II.6.3 Silicium amorphe

Le silicium amorphe (a-Si) est déposé sous forme de couche mince sur une plaque de verre ou un support souple. Il possède une structure atomique désordonnée, non cristallisée (structure tétraédrale).

Le silicium amorphe est obtenu de façon simple par le dépôt en phase vapeur sur des substrats économiques tel que le verre et le quartz. Il se caractérise par un fort coefficient d'absorption. On l'utilise surtout lorsqu'il est nécessaire de réduire au maximum le poids du panneau. Son Rendement est faible 5 à 9 %.

II.7 Regroupement des cellules

Un panneau photovoltaïque est un assemblage en série de cellules permettant d'obtenir une tension de 12 volts.

Il faut associer les cellules soit en série soit en parallèle car la caractéristique d'une seule cellule est insuffisante pour alimenter les équipements électriques.

II.7.1 Regroupement en série

Une association de (N_s) cellules en série figure (II.14) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et une tension plus importante qui est l'addition de toutes les tensions élémentaires.

Donc :

$$I_{ccg} = I_{cc} \quad (12)$$

$$V_{cog} = V_{co} \cdot N_s \quad (13)$$

Tels que :

I_{ccg} : Le courant de court-circuit du générateur (de N_s en série).

I_{cc} : Le courant de court-circuit d'une cellule.

V_{cog} : tension du circuit ouvert du générateur (de N_s cellules en série)

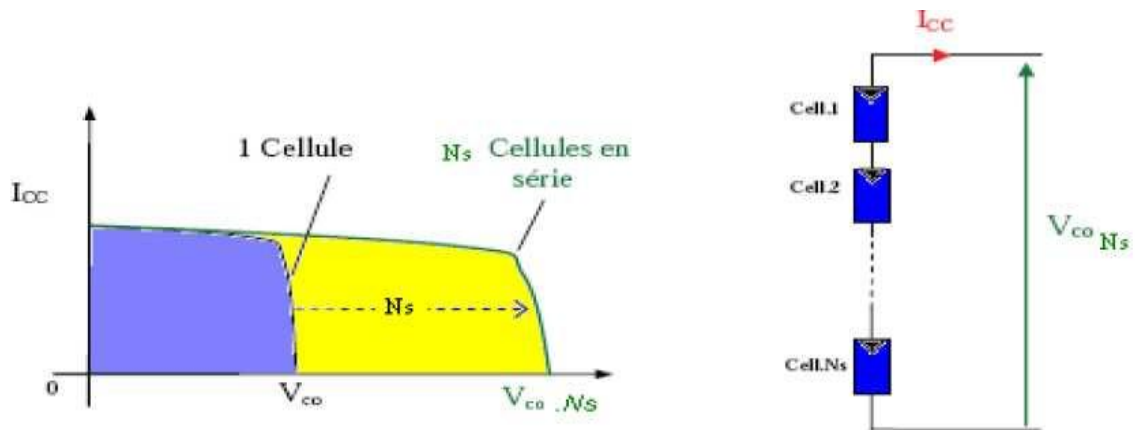


Figure (II.14) Schéma d'un regroupement en série et sa caractéristique I(V)

II.7.2 Regroupement en parallèle

Dans Une association parallèle de (N_p) cellules (figure II-15), les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.

$$I_{ccg} = I_{cc} \cdot N_p \quad (14)$$

$$V_{cog} = V_{co} \quad (15)$$

Tels que :

I_{ccg} : la somme des courants de (N_p) cellules en parallèle

V_{cog} : tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle

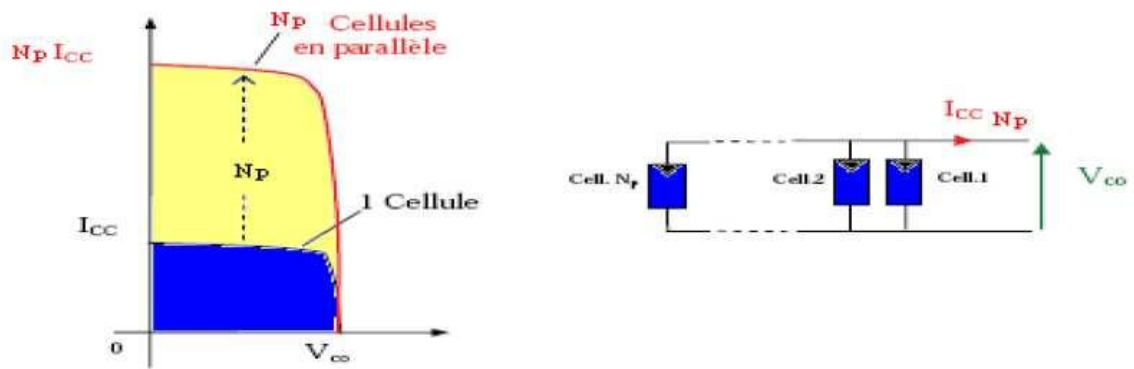


Figure II.15 Schéma d'un regroupement en parallèle et sa caractéristique I(V)

II.7.3 Regroupement en série/parallèle (Association en hybride)

Une association de (N_p) cellules en parallèles et (N_s) cellules en séries permet d'augmenter la tension et le courant total de la cellule (figure II-16).

Les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I_{cc}^t = n_p \times I_{cc} \tag{16}$$

$$V_{oc}^t = n_s \times V_{oc} \tag{17}$$

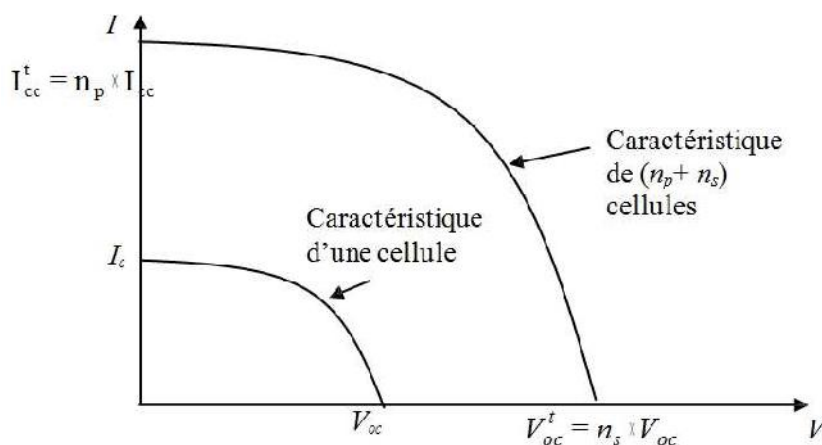


Figure II.16 Caractéristique I(V) d'une Association en hybride.

II.8 Influence de la température et de l'éclairement

La caractéristique d'une cellule PV est directement dépendante de la température et de l'éclairement.

II.8.1 Influence de la température

L'équation de Boltzmann donne :

$$I_{sc} = I_0 \cdot \exp(q \cdot V_0 / KT) \quad (18)$$

L'expérience montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule.

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V (figure II.17 et II.18) d'un module photovoltaïque **SP75** pour un niveau d'ensoleillement G constant (1000 W/m^2) et pour différentes températures :

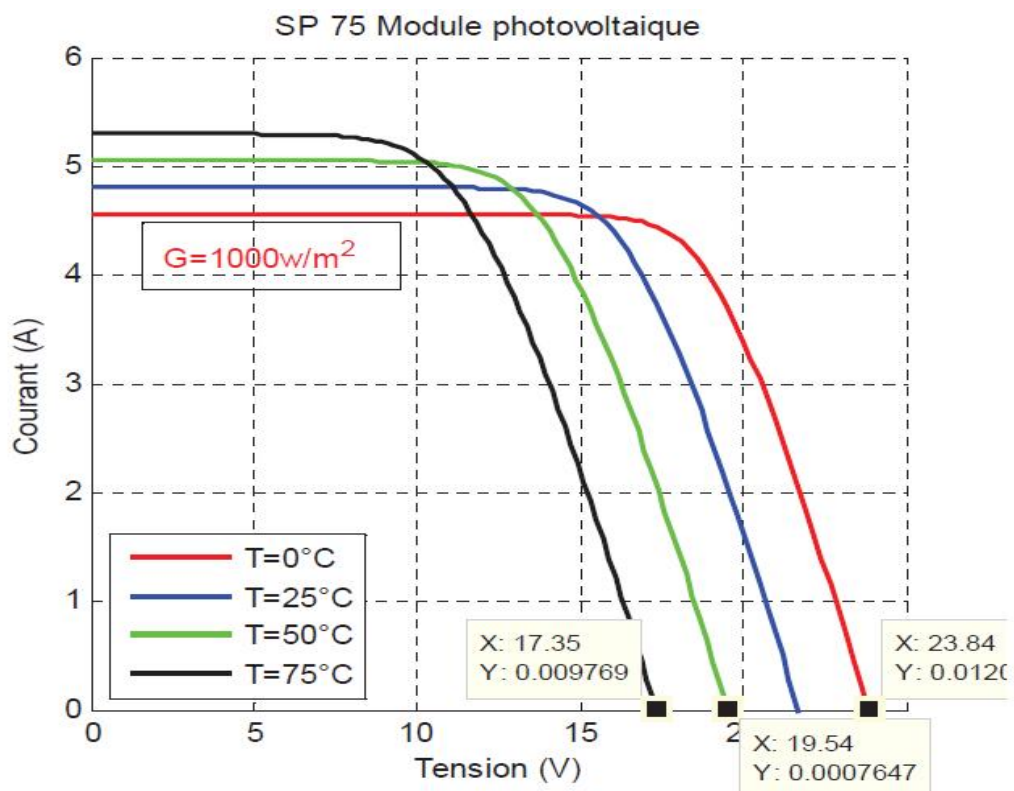


Figure II.16 La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température [6].

Nous remarquons que le courant dépend de la température car le courant augmente légèrement avec l'augmentation de la température ; mais la tension de circuit ouvert diminue.

La puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente.

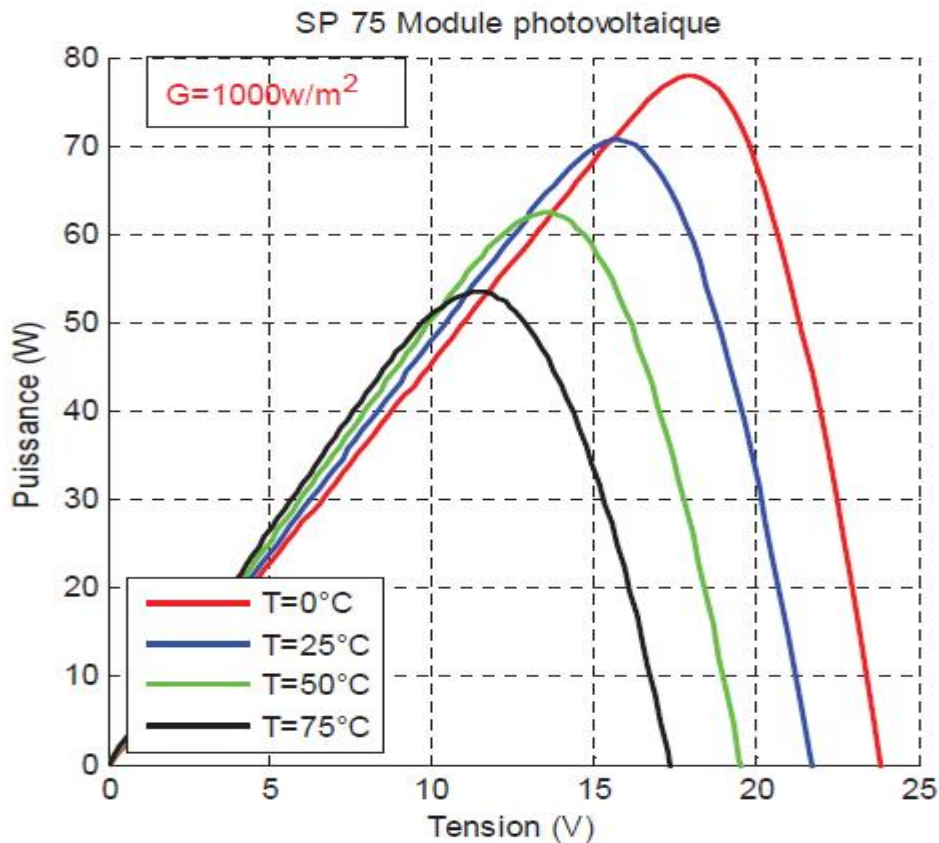


Figure II.18 La caractéristique $P=f(V)$ en fonction de la température [7].

II.8.2 Influence de l'éclairement

La température est fixée à 25°C pour différents éclairements (Figure II.19 et II.20).

Pour la figure (II.19), on remarque que pour l'éclairement $G=1000\text{ W/m}^2$, le courant $I_{cc}=4.8\text{A}$. Et pour $G=800\text{ W/m}^2$, le courant $I_{cc}=3.84\text{A}$. On peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit augmente en conséquence, mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance, lorsque l'éclairement augmente (figure II.20).

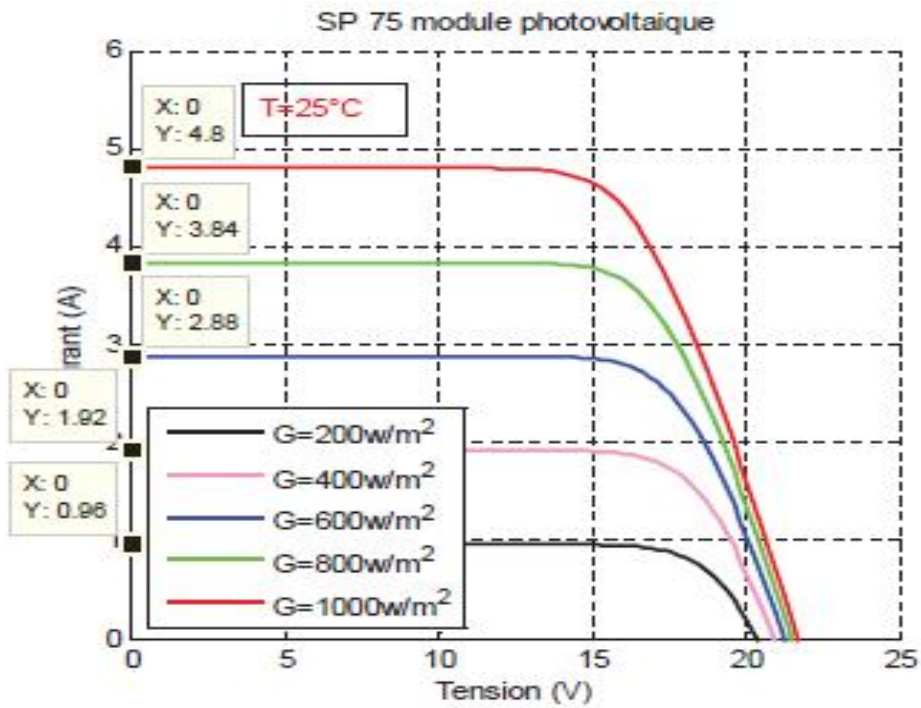


Figure II.19 La caractéristique $I=f(v)$ en fonction de l'éclairement [6].

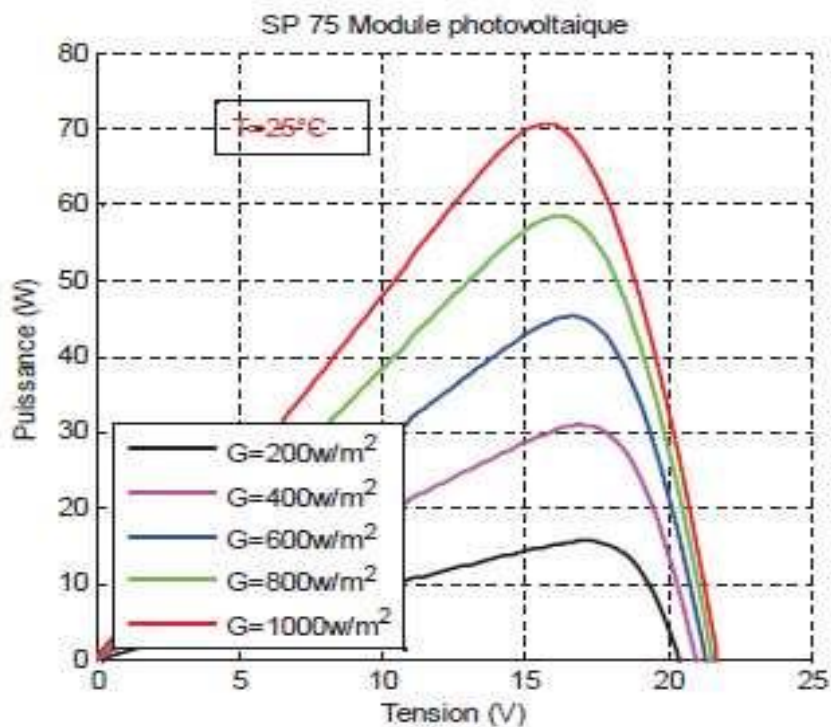


Figure II.20 : La caractéristique $P=f(V)$ en fonction de l'éclairement [6].

II.9 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

II.9.1 Les avantages

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages :

- Une haute fiabilité ; les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs;
- La production de l'électricité avec l'énergie photovoltaïque est propre. Elle n'est pas toxique ;
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montage dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.

II.9.2 Les inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %) ;
- L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions ;
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons expliqué, en premier lieu, le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales, puis les paramètres photovoltaïques des cellules solaires.

En second lieu, nous avons présenté les différentes filières technologiques, le regroupement des cellules. Nous avons présenté également l'influence de température et de l'éclairement sur les panneaux PV. On a terminé par les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque. Dans les chapitres suivants nous focaliserons notre étude sur les cellules solaires à hétérojonction "silicium cristallin/silicium amorphe".



REFERENCE DU CHAPITRE II

[1] : LAKAL Chahira et ARRIS Nasrine, mémoire de master, étude et comparative des effets des revêtements antireflets à base de l'ITO et $Z_{\text{N}}\text{O}$ sur les performances photovoltaïque des cellules solaire de type a-Si :H/ c-Si, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2016.

[2] : Samira OUSSIDHOUM, diplôme de Magister, Etude comparative des performances des cellules solaire à jonction simple et multiple, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2015.

[3] : KAHOUL Fouad, diplôme de master, Caractéristique électrique d'une cellule solaire à hétérojonction a-Si: H/ $\mu\text{c-Si}$, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.

[4] : Bernard Equer : "Energie solaire photovoltaïque" ; volume 1 de physique et technologie de la conversion photovoltaïque.

[5] : w .Favre, thèse de doctorat. Silicium de type n pour les cellules à hétérojonction : caractérisations et modélisations, Université paris sud (2011).

[6] : Othmane BENSEDDIK et Fathi DJALOU, Mémoire de Master, etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque, UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA, 2012.

[7] : Z. Bendjellouli ' Contribution a la modélisation d'une cellule solaire', diplôme de magister université de bachar, 2009.

Chapitre III : Etude des cellules solaires à hétérojonction de type a-Si:H/c-Si

Introduction

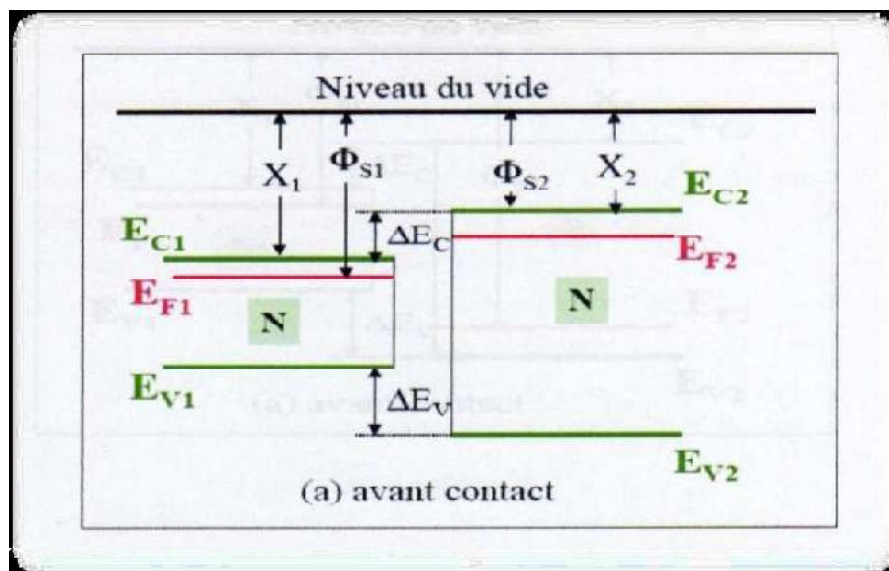
Dans ce chapitre, nous allons introduire en premier lieu les notions importantes relatives aux cellules solaires à hétérojonctions. Nous allons ensuite étudier les cellules solaires à hétérojonctions a-Si:H/c-Si et sa mise en œuvre dans le domaine photovoltaïque. On termine par les Critères pour l'optimisation des cellules à hétérojonction silicium.

III.1 Définition de l'hétérojonction

Le terme hétérojonction désigne la jonction entre deux semi-conducteurs de gaps différents, sa réalisation s'effectue par croissance cristalline d'un matériau sur l'autre et nécessite l'utilisation de semi-conducteurs ayant des propriétés cristallines voisines (la taille des atomes doit notamment être assez proche).

Selon le type de dopage utilisé pour les semi-conducteurs, deux hétérojonctions se distinguent :

- a) **les hétérojonctions isotypes** : les deux semi-conducteurs sont de même type (figure III.1).



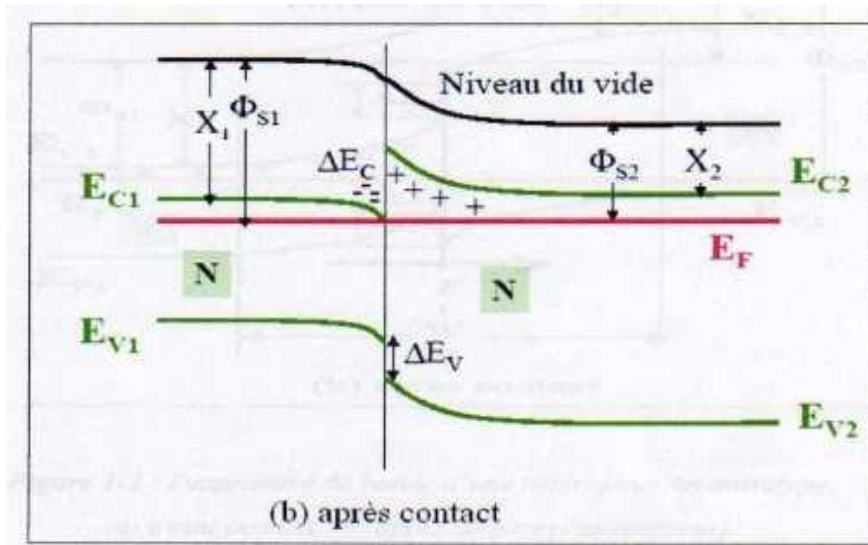
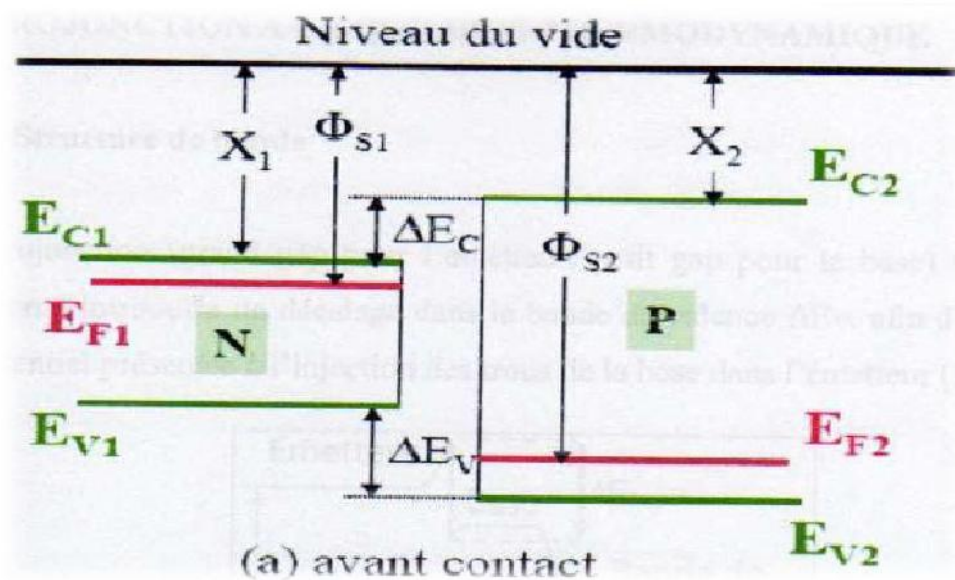


Figure III.1: Diagramme de bandes d'énergie d'une hétérojonction isotype

(a) avant contact, (b) après contact.

b) les hétérojonctions anisotypes : les deux semi-conducteurs sont dopés différemment (figure III.2).



Type III : une des discontinuités est supérieure à E_g^A .

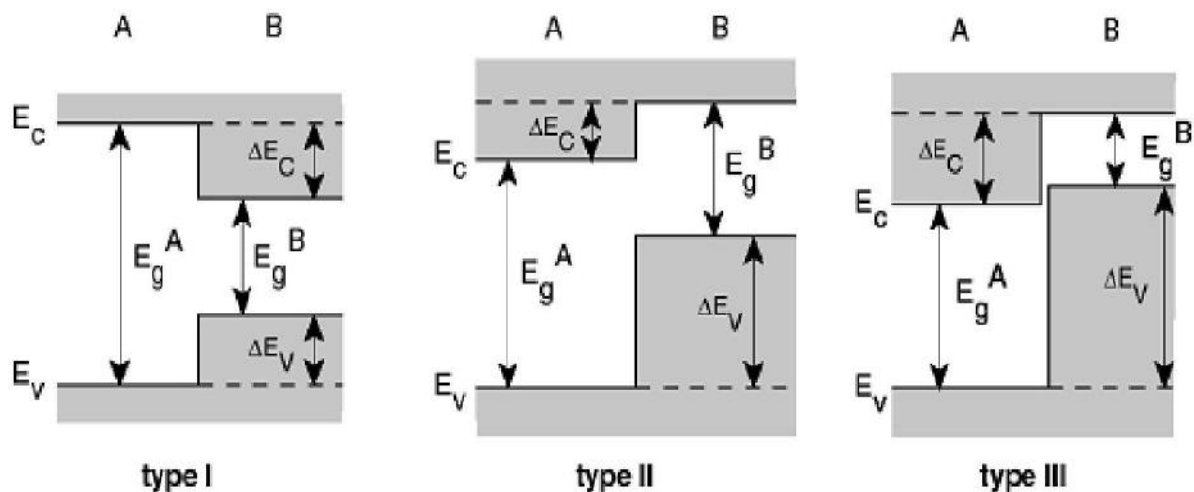


Figure III-3 : Diagrammes schématiques montrant les différents types d'hétérojonctions [1].

III.3 Fonctionnement physique d'une hétérojonction

III.3.1 Hétérojonction à l'équilibre thermodynamique

Les cellules PV à hétérojonctions (HJ) sont obtenues par la mise en contact de matériaux d'énergie de gap (E_G) différente. Les concentrations d'accepteurs et de donneurs N_a et N_d sont respectivement dans les semi-conducteurs de type **p** et **n**.

Lors de la mise en contact des deux semi-conducteurs les électrons du semi-conducteur de type **n** vont diffuser vers celui de type **p** et des trous diffusent dans le sens inverse. Cette diffusion de porteurs de charge est une conséquence des concentrations très différentes de porteurs de charge dans les deux semi-conducteurs. Il en résulte un courant électrique de porteurs majoritaires, appelé courant de diffusion.

Les électrons qui arrivent du côté **p** se recombinent avec des trous justes après la jonction. Ainsi, dans une région proche de la jonction, les trous libres disparaissent et il reste des accepteurs ionisés (charges négatives). De la même manière, les électrons libres disparaissent du côté **n** près de la jonction, et il reste des donneurs ionisés (charges positives).

On obtient finalement une zone qui s'appelle la zone de déplétion qui est électriquement neutre.

Un champ électrique apparaît dans la jonction, dirigé du semi-conducteur **n** (les charge fixe de signe +) vers le semi-conducteur **p** (les charges fixe de signe -), et va contribuer à séparer

les charges positives et négatives ; les électrons sont repoussés vers la couche N et les trous vers la couche P, il en résulte un courant appelé courant de dérive qui circule dans le sens opposé au courant de diffusion.

À l'équilibre, le champ électrique s'établit à une valeur telle que le courant de diffusion est égal et opposé au courant de dérive.

III.3.2 Calcul du champ, potentiel et W (largeur de la ZCE)

Le calcul de la distribution de potentiel au voisinage de l'interface se fait par l'intégration de l'équation de Poisson.

Pour que la zone de charge d'espace soit de déplétion dans chacun des semi-conducteurs il faut que ces dernières soient de types différents.

Nous supposons les semi-conducteurs dopés de manière homogène. Nous appellerons N_{a1} dopage en donneurs du semi-conducteur 1 et N_{a2} dopage en accepteurs du semi-conducteur 2.

L'équation de Poisson s'écrit :

$$\frac{d^2v(x)}{dx^2} = - \frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad (19)$$

Telle que :

$\rho(x)$: Densité de charges électriques et ϵ la Permittivité.

Dans le semi-conducteur 1 :

$$\rho(x) = q N_{d1} \quad (20)$$

$$\frac{d^2v(x)}{dx^2} = - \frac{qN_{d1}}{\epsilon_1} \quad (21)$$

En intégrant une fois avec la condition $E=0$ en $x= x_1$, on obtient :

$$\frac{dV(x)}{dx} = - \frac{qN_{d1}}{\varepsilon_1} (x-x_1) = E(x) \quad (22)$$

Quand $x=0$ on a :

$$E_{SC1} = \frac{qN_{d1}}{\varepsilon_1} x_1 \quad (23)$$

En intégrant une deuxième fois et en appelant V_1 le potentiel de la région neutre du semi-conducteur 1, on obtient [2]

$$V(x) = - \frac{qN_{d1}}{2\varepsilon_1} (x - x_1)^2 + V_1 \quad (24)$$

Dans le semi-conducteur 2 :

$$\rho(x) = -q N_{a2} \quad (25)$$

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = \frac{qN_{a2}}{\varepsilon_2} \quad (26)$$

Donc :

En intégrant une fois avec la condition $E=0$ en $x=x_2$ on obtient [3]:

$$\frac{dV(x)}{dx} = \frac{qN_{a2}}{\varepsilon_2} (x - x_2) = E(x) \quad (27)$$

En $x=0$:

$$E_{SC2} = \frac{qN_{a2}}{\varepsilon_2} x_2 \quad (28)$$

En intégrant une deuxième fois et en appelant V_2 le potentiel de la région neutre du semi-conducteur 2, on obtient [4]

$$V(X) = \frac{qN_{a2}}{2\varepsilon_2} (x - x_2)^2 + V_2 \quad (29)$$

Le champ et le potentiel électriques sont représentés sur la figure suivante :

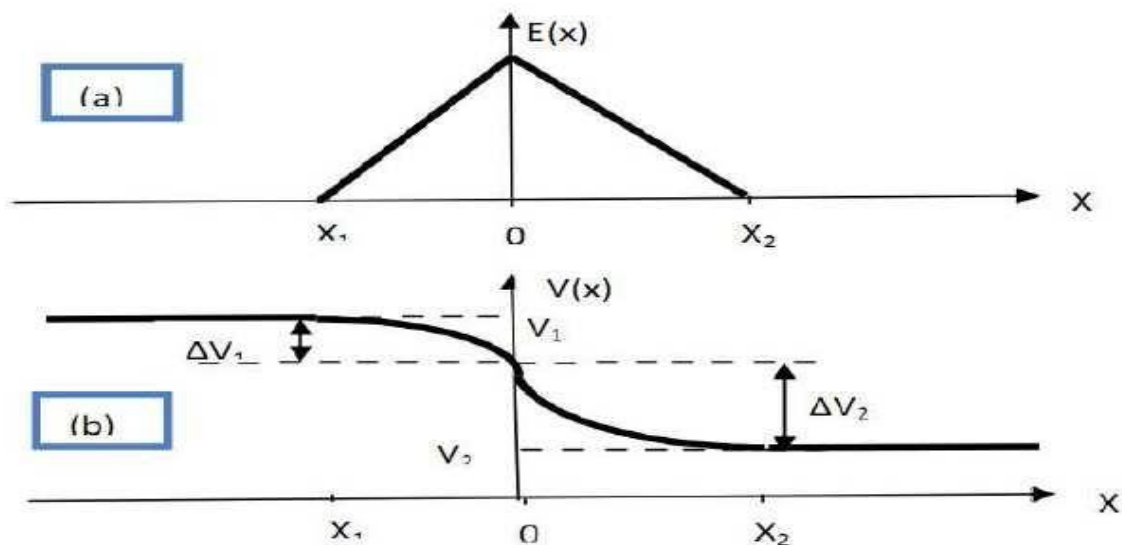


Figure III.4 : champ et potentiel électriques à l'interface d'une hétérojonction a-Si:H/c-Si [3,4].

A : $x=0$, on a : $E_{sc1} = E_{sc2}$ donc :

$$\frac{qN_{d1}}{\epsilon} x_1 = \frac{qN_{a2}}{\epsilon} x_2 \quad (30)$$

Donc l'équation de continuité de champ électrique est :

$$N_d x_1 = N_a x_2 \quad (I) \quad (31)$$

D'après le schéma de la figure III.4 on a :

$$V_1(0) = V_2(0) \quad (32)$$

On remplace chacun par son équation :

$$-\frac{qN_{d1}}{2\epsilon_1} x_1^2 + V_1 = \frac{qN_{a2}}{2\epsilon_2} x_2^2 + V_2 \quad (33)$$

$$\text{Et} \quad V_d = V_1 - V_2 \quad (34)$$

Donc :

$$V_1 - V_2 = \frac{qN_{d1}}{2\epsilon_1} x_1^2 + \frac{qN_{a2}}{2\epsilon_2} x_2^2 \quad (35)$$

ϵ_1 et ϵ_2 sont les constantes diélectriques dans les semiconducteurs 1 et 2.

Pour la largeur de la zone de charge d'espace W on a :

$$W = x_1 + x_2 = x_1 + x_1 \cdot \frac{x_2}{x_1} \quad (II) \quad (36)$$

Et d'après l'équation (I) on a

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{N_d}{N_a} \quad (37)$$

On remplace dans l'équation (II) :

$$W = x_1 \left(1 + \frac{N_d}{N_a} \right) = x_1 \left(\frac{N_a + N_d}{N_a} \right) \quad (38)$$

Donc:

$$x_1 = \frac{W \cdot N_a}{N_a + N_d} \quad (III) \quad (39)$$

Et

$$V_d = \frac{q}{2\varepsilon} (N_a x_2^2 + N_d x_1^2) \quad (40)$$

$$V_d = \frac{q}{2\varepsilon} N_d x_1 W \quad (IV) \quad (41)$$

On remplace (III) dans (IV) :

$$V_d = \frac{q}{2\varepsilon} \frac{N_a \cdot N_d}{N_a + N_d} W^2 \quad (42)$$

Donc :

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right) V_d} \quad (43)$$

III.4 Les cellules solaires à hétérojonction (a-Si : H(n) /c-Si(p))

III.4.1 Historique des cellules à hétérojonction a-Si:H/c-Si

Les premières photo-génération de courant grâce à une hétéro structure d'a-Si:H sur du silicium cristallin (c-Si) ont été présentées par Fuhs *et al.* en 1974 [5]. Il faudra attendre plusieurs années pour obtenir des rendements de conversion supérieurs à 10% avec une structure tandem utilisant des couches de a-Si:H dopé sur du c-Si. En 1991, Sanyo Electric [6] (maintenant Panasonic) introduit le concept de la cellule HIT (*Heterojunction Intrinsic Thin-layer*) en ajoutant une couche d'a-Si:H intrinsèque ((i) a-Si:H) à la surface du c-Si (Figure III.5) et jette ainsi les bases de la technologie de cellules solaires à hétérojonction silicium (SHJ). Un rendement de conversion de 18.1% a été obtenu prouvant le potentiel de cette structure. Une deuxième couche intrinsèque a été, par la suite, ajoutée en face arrière pour limiter au maximum les recombinaisons aux interfaces.

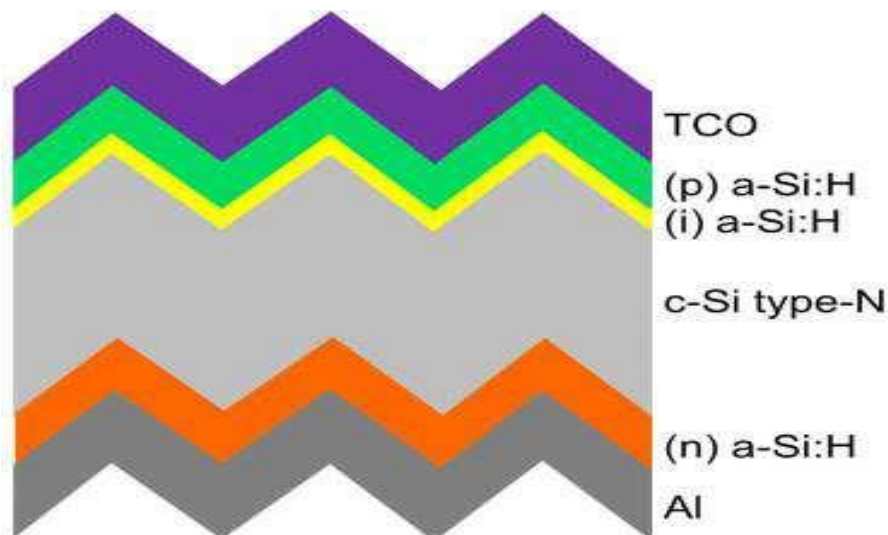


Figure III.5 : structure de cellule solaire SHJ proposée par Tanaka et al [6]

Panasonic a optimisé sa technologie de cellules pour obtenir, des rendements de conversion record de 24.7% à l'échelle du laboratoire [6]. De nombreux instituts de recherche et industriels ont également pris l'initiative de développer cette architecture de cellule, suite à la

fin des droits des brevets détenus par Panasonic, concernant l'utilisation de silicium amorphe hydrogéné pour la formation des jonctions p-n.

III.4.2 Les composants de la cellule PV à hétérojonction

La cellule à hétérojonction comporte :

a) L'oxyde transparent conducteur

L'oxyde transparent conducteur est placé sur la face avant (face éclairée) de la cellule. Ce sont des matériaux à grand gap. Le TCO doit avoir certaines propriétés :

- ❖ Il doit avoir une excellente transparence optique. Cette condition est nécessaire pour avoir le maximum de lumière qui pénètre dans la cellule pour générer des paires électron-trou.
- ❖ Il doit avoir une bonne conductivité pour assurer la collection des porteurs.

L'oxyde d'indium dopé à l'étain nommé ITO (Indium Tin Oxide) est l'oxyde transparent conducteur le plus connu et aussi le plus utilisé. L'ITO possède en effet d'excellentes propriétés :

- ❖ transparence supérieure à 80 % sur le spectre visible,
- ❖ résistivité faible de $10^{-3}\Omega.cm$ à $5 \times 10^{-3}\Omega.cm$ pour les meilleurs TCO [7],
- ❖ une très bonne adhérence sur une multitude de substrats.

b) L'émetteur

L'émetteur est constitué par une fine couche de silicium amorphe hydrogéné de dopage opposé au substrat. Il doit être très mince pour minimiser l'absorption dans cette couche. L'émetteur permet d'avoir une jonction (p-n) afin de séparer les paires électron-trou photogénérés.

c) Le Back Surface Field (BSF)

Le BSF est une couche fortement dopée (p+ ou n+) avec le même type de dopage que le substrat. C'est une couche qui crée un champ électrique arrière et qui permet également de passiver la face arrière de la cellule.

La structure BSF permet de réduire les recombinaisons sur la face arrière et d'assurer une meilleure collecte des porteurs majoritaires.

d) Les contacts

Les contacts métalliques sont placés sur les deux faces de la cellule. Ils permettent de collecter le courant photogénéré.

Pour réaliser les contacts métalliques, nous avons principalement les techniques suivantes [4]:

- L'électrolyse : faible coût, bonne résistivité mais nécessite de nombreuses étapes ;
- L'évaporation : excellente résistivité et résistance de contact mais plus chère et avec un faible rendement d'utilisation du métal ;
- La sérigraphie : faible coût, simple, adaptée à de gros volumes mais technologie développée à haute température.

La sérigraphie constitue la solution la plus compatible avec les standards industriels et est de plus en plus utilisée. Elle permet en une seule étape de réaliser les doigts et les bus des métallisations pour un coût raisonnable et selon un procédé facilement automatisable.

III.4.3 Structure de la cellule a-Si:H/c-Si

La figure (III.6) représente la structure conventionnelle d'une cellule silicium à hétérojonction. Sur la face du substrat de silicium cristallin on dépose la couche de silicium amorphe hydrogéné de type (n) qui va créer l'hétérojonction entre le silicium cristallin et le silicium amorphe. La couche de a-Si:H déposée sur la face avant (face éclairée) a un dopage différent du substrat c-Si et est appelée émetteur.

Ensuite une couche de TCO (oxyde transparent conducteur) est déposée au-dessus de l'émetteur pour améliorer l'absorption des photons dans la structure et enfin les contacts métalliques qui sont placés sur les deux faces de la cellule.

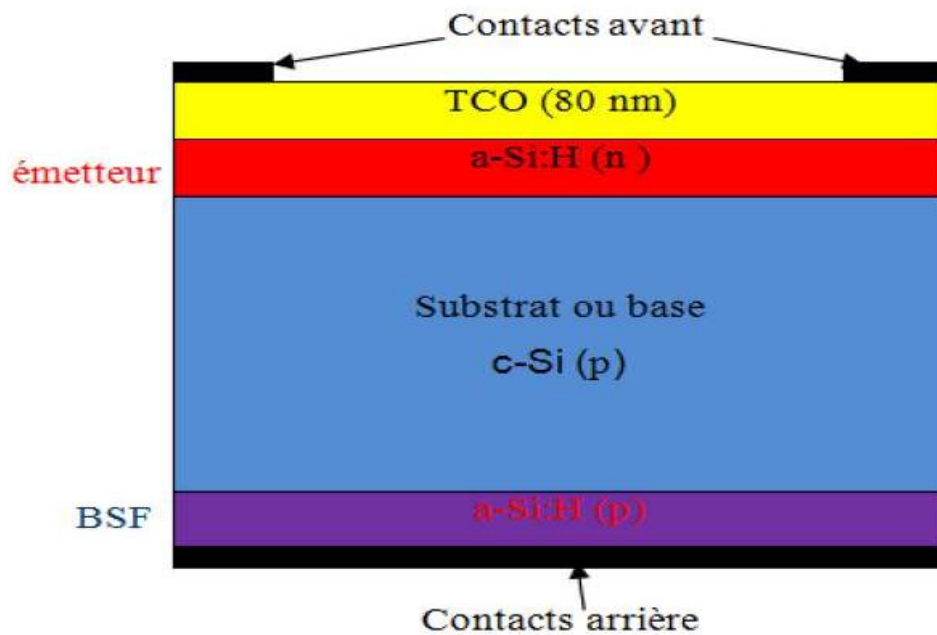


Figure III.6 : Structure d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si:H / c-Si.

III.4.4 Principe de fonctionnement de l'hétérojonction a-Si:H/c-Si

Le modèle de base est le modèle d'Anderson qui est sans états d'interface. Ce modèle de base est incomplet car le transport de charge dans les dispositifs à hétérojonction peut être dominé par les phénomènes de piégeage au niveau des états d'interface. Il existe des modèles introduisant des états d'interface chargés et des dipôles qui influent sur le diagramme de bande en engendrant des recombinaisons.

D'autres modèles prennent aussi en compte l'influence de ces états d'interface et le transport par effet tunnel.

A. Le modèle d'Anderson :

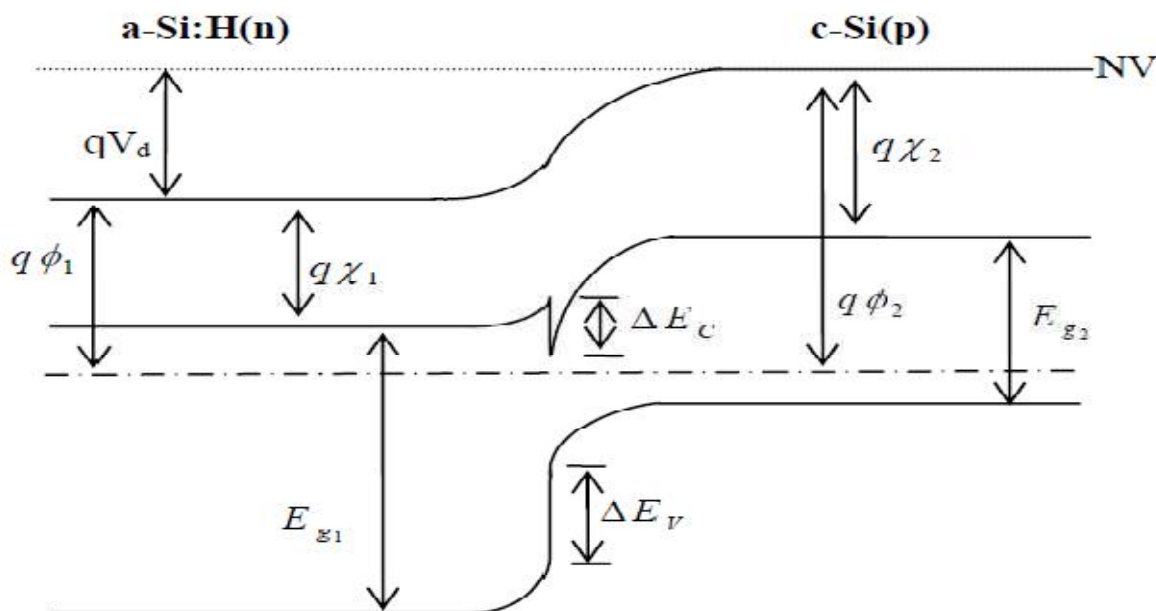
C'est le modèle de base pour décrire les conditions de mise en contact de deux matériaux semi-conducteurs. Ce modèle est basé sur les propriétés électroniques des matériaux que sont le gap E_g , la permittivité électrique ϵ , l'affinité électronique χ et le niveau de dopage δ .

La différence d'énergie de gap entre les matériaux implique la présence de désaccords des bandes de conduction et de valence à la jonction. La présence de discontinuités à l'interface va jouer un rôle important dans les phénomènes de transport des charges. Les figures (III.7.a) et (3.7.b) représentent les diagrammes de bande d'une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p) et a-Si:H(p)/c-Si(n) respectivement. Dans ce modèle, on considère que le transport de charges se fait par injection dans les régions quasi-neutres et aussi par les phénomènes de génération/recombinaison dans la zone de charge d'espace. On considère aussi que les quasi-niveaux de Fermi ne varient pas dans la zone de charge d'espace. Le raccordement des bandes de conduction et de valence se fait en respectant les relations suivantes [8]:

$$\text{Le désaccord de la bande de conduction} \quad \Delta E_c = q(\chi_2 - \chi_1) \quad (44)$$

$$\text{Le désaccord de la bande de valence} \quad \Delta E_v = q(\chi_2 - \chi_1) + E_{g1} - E_{g2} \quad (45)$$

$$\text{La tension de diffusion} \quad qV_d = q(\phi_2 - \phi_1) \quad (46)$$



Figures (III.7.a) : Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p) à l'équilibre thermodynamique [9].

L'influence des états d'interface dépend du niveau d'injection et de la polarisation.

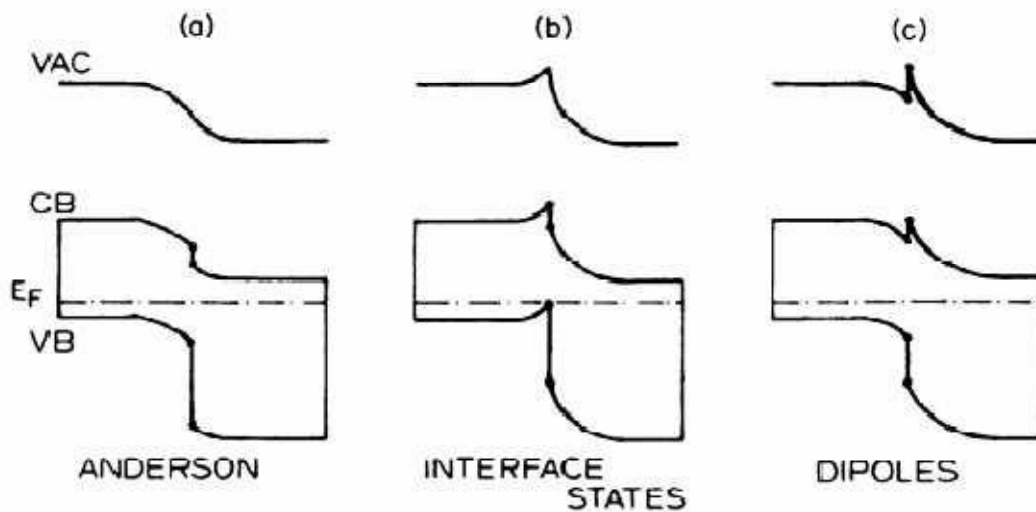


Figure III.8 : Diagramme de bandes d'énergie selon trois modèles : (a) modèle d'Anderson (b) en incluant les états d'interface et (c) en incluant les dipôles [10].

La recombinaison directe à travers les états d'interface et le contrôle du transport de charges avec les vitesses de recombinaison de surface permettent de compléter le modèle d'Anderson.

III.5 Les deux semi-conducteurs de base

Il est possible de combiner la bonne performance du silicium cristallin et le bas coût de production du silicium amorphe. Ceci se fait en déposant sur la face avant d'un substrat en silicium cristallin, dopé n ou p, une couche de a-Si:H pour former une hétérojonction (HJ) en face avant. On peut aussi déposer une couche de a-Si:H à la fois sur la face avant et la face arrière pour obtenir une double hétérojonction.

La mise en contact de deux matériaux de gaps différents, conduit à l'apparition de discontinuités de bande qui ont une grande influence sur les performances de la cellule.

III.5.1 Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si: H)

III.5.1.1 Définition :

Le silicium amorphe hydrogéné est un matériau issu de la famille des semi-conducteurs, cette forme a été découverte vers le début des années soixante, dans un premier temps elle n'était pas utilisable car elle avait beaucoup de défauts, mais vers la fin des années soixante, Chittick et al [11] a observé qu'en déposant le silicium amorphe par un plasma de silane (SiH_4), plus de 99.9% des défauts étaient saturés par l'hydrogène, ce qui rendait ce matériau utilisable comme semi-conducteur. Dès cette découverte, il était devenu l'objet de recherches intensifiées.

III.5.1.2 Propriétés structurales du silicium amorphe hydrogéné

La figure suivante représente la structure du silicium amorphe hydrogéné. Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, vitreuse, mais il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieur à celui du silicium cristallin [12].

Pour absorber l'essentiel du spectre visible, une fine couche de $0,3 \mu\text{m}$ est suffisante. Il est obtenu par le dépôt en phase vapeur sur des substrats économiques comme le verre, le quartz ou l'aluminium. La décomposition en phase vapeur du silane SiH_4 à basse température (200° à 400°C) permet de déposer du silicium amorphe hydrogéné avec une vitesse avoisinant la dizaine de nanomètres par minute [13].

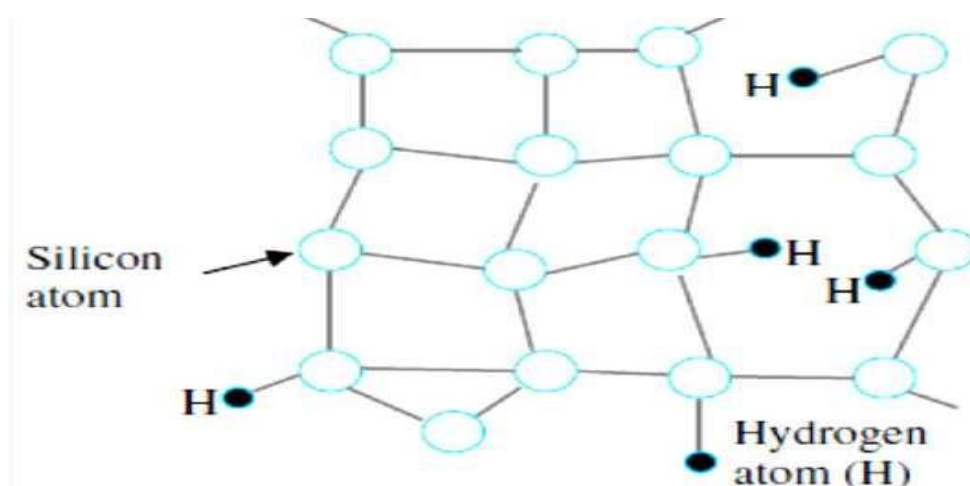


Figure III.9 : Réseau d'a-Si: H montrant des liaisons brisées d'atome de silicium, qui sont passivées par les atomes d'hydrogène.

III.5.1.3 Propriétés optique du silicium amorphe hydrogéné

Puisque dans l'a-Si:H la conservation de la quantité de mouvement k n'est plus conférée lors des transitions électroniques, le matériau se comporte comme un semi-conducteur « quasi-direct ». Il présente une probabilité d'absorption lumineuse beaucoup plus importante dans le visible (énergie des photons supérieure à 1.8 eV) que le c-Si (Figure III.10).

L'absorption dans l'a-Si:H est déterminée par la densité des états localisés (états superficiels) et des liaisons pendantes (défauts profonds) du matériau.

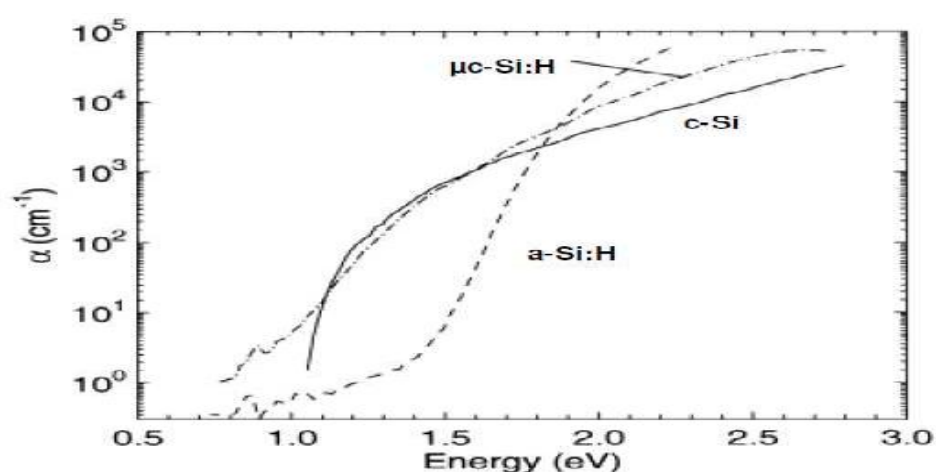


Figure III.10 : Coefficient d'absorption α du silicium cristallin (c-Si), du silicium amorphe hydrogéné mesuré par spectroscopie de déviation photo thermique (PDS). Les données proviennent du travail réalisé par Carius et al. [14].

III.5.1.4 Le rôle de l'hydrogène

Sans hydrogène, la densité des liaisons pendantes serait de l'ordre de $10^{19}/\text{cm}^3$, le gap optique est de 1.2 eV environ et le niveau de Fermi reste inchangé lors du dopage et les atomes dopants sont inactifs.

Le rôle de l'hydrogène est de saturer les liaisons pendantes et les réduire à 99.99 %, ce qui rend le silicium amorphe utilisable. La concentration d'hydrogène doit varier entre 6 % et 35 %, ce qui dépasse largement la densité nécessaire à la passivation des liaisons pendantes.

Des travaux récents [15] ont montré que l'hydrogène atomique introduit d'autres effets que la passivation des liaisons pendantes. Le plus important concerne les hétérojonctions a-Si:H/c-Si.

III.5.1.5 Technique de dépôt du a-Si :H

La méthode la plus courante de dépôt du silicium amorphe est la décomposition du silane en phase vapeur par une décharge électrique (un champ radiofréquence), encore appelée PECVD (plasma enhanced chemical vapour deposition). Cette technique ne nécessite qu'une faible consommation d'énergie dans un processus industriel, comparée à une technique de dépôt de silicium cristallin, pour laquelle des températures supérieures à 1000 °C sont requises (Figure III.11).

Les précurseurs gazeux utilisés pour former l'a-Si:H sont l'hydrogène (H_2) et le silane (SiH_4). Les couches peuvent être dopées n avec l'ajout de PH_3 ou p avec l'ajout de B_2H_6 .

Les températures modérées communément utilisées en PECVD offrent la possibilité d'utiliser une large gamme de substrats comme le verre, l'acier inoxydable et le plastique.

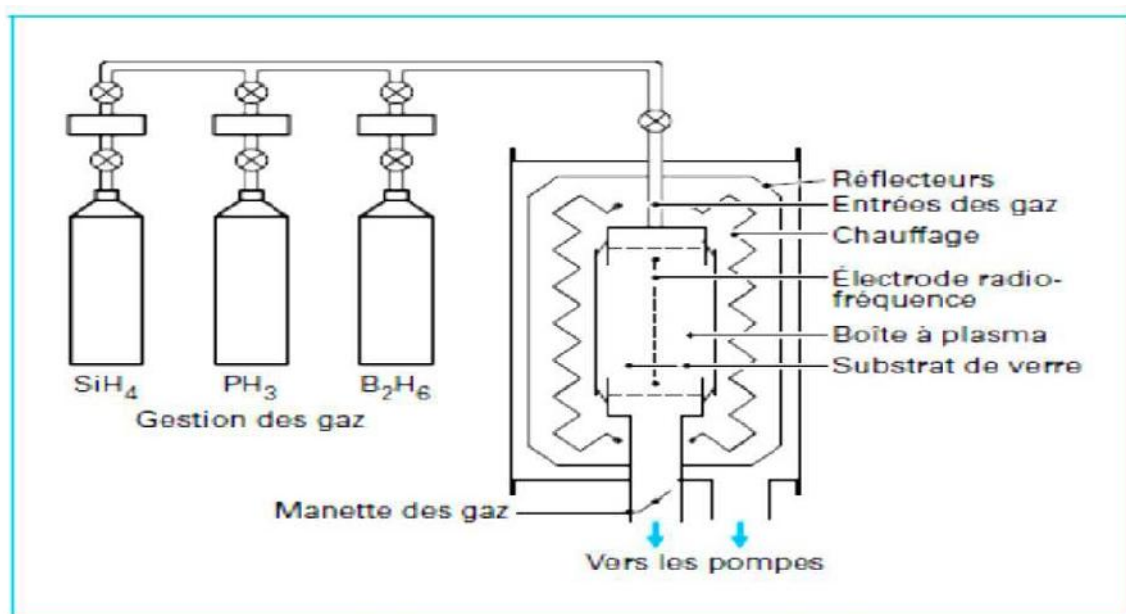


Figure III.11 : Schéma de dépôt PECVD dans une boîte à plasma d'un module à a-Si:H [14].

Le gaz 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 libres : Si-H^+ , Si-H_2^+ , Si-H_3^+ , SiH , SiH_2 , SiH_3 , ...etc.

Le plasma contient aussi des électrons et des ions négatifs qui assurent la neutralité électrique globale.

III.5.2 Le silicium cristallin c-Si

III.5.2.1 Définition

Le silicium reste cependant le matériau le plus utilisé dans l'industrie photovoltaïque, selon la technologie employée, on distingue deux catégories :

a. *Le silicium monocristallin:*

C'est le matériau qui présente un bon rendement à fort et moyen éclairage. Il est constitué d'un seul cristal ordonné, il est donc très "pur" mais plus cher à la production.

En 2008, les cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin occupaient 67 % du marché de la production mondiale des modules photovoltaïques.

b. *Le silicium multicristallin*

Il est constitué de cristaux assemblés appelé grains. Il est un peu moins performant.

III .5.2.2 Propriétés fondamentales du silicium cristallin

Le silicium est cristallin avec une énergie de bande interdite $E_g = E_c - E_v = 1,12$ eV à 300 K. Chaque atome de silicium est lié à 4 autres atomes de silicium dans la configuration cubique face centrée comme le montre la figure III.12.

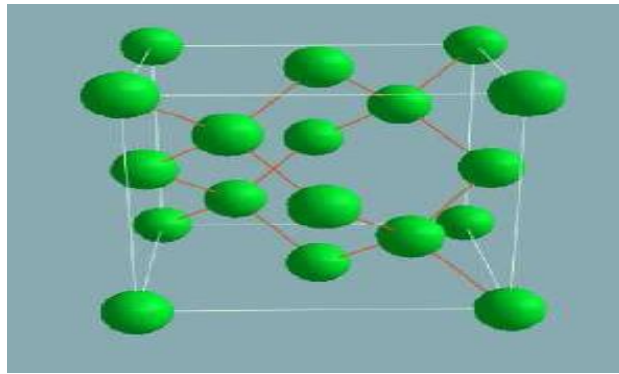


Figure III.12 : Représentation tridimensionnelle de la maille élémentaire du silicium cristallin

III.5.2.3 Propriété structurelle du silicium cristallin

Le silicium cristallin présente le même réseau cristallographique que le diamant. Chaque atome de silicium tétraédrique a quatre voisins. Cette structure s'étend sur une distance importante, formant ainsi un réseau cristallin ordonné (cristal). C'est une répétition d'une maille élémentaire périodique (figure III.13).

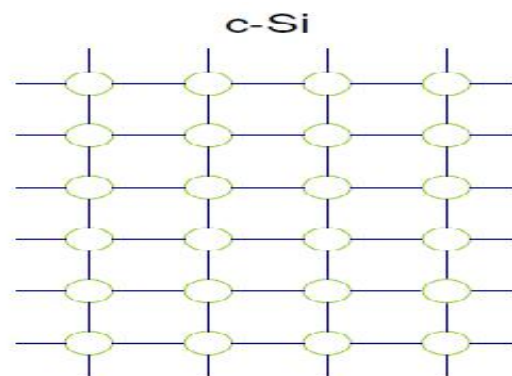


Figure III.13 : Structure du silicium cristallin

III.5.2.4. Propriété optique de silicium cristallin

A température ambiante (300 K) et pression atmosphérique, le c-Si possède un gap de 1.12 eV c'est un semi-conducteur à gap indirect ce qui limite l'absorption du rayonnement lumineux comparé à un matériau à bande interdite directe comme le GaAs.

Les énergies des photons doivent être beaucoup plus grandes que celles de la bande interdite E_g pour passer de la bande de valence vers la bande de conduction.

III.5.2.5 Paramètre de gap

On remarque immédiatement que le gap du silicium est indirect : le maximum de la bande de valence la plus haute n'est pas aligné avec le minimum de la bande de conduction la plus basse, et il existe une dégénérescence d'ordre 2 du plus haut niveau de la bande de valence. Sur cette figure, sont aussi représentés plusieurs types de transitions électroniques pouvant avoir lieu : le chemin (1) pour les transitions bande à bande directes, le chemin (2) pour les transitions indirectes, le chemin (3) lors de la thermalisation des électrons.

Les transitions directes sont plus rares que les transitions indirectes, et pour ces dernières, la conservation du moment implique la présence d'une autre particule : le phonon. Cela implique que les recombinaisons radiatives sont moins nombreuses dans le silicium que dans les semi-conducteurs à gap direct, se traduisant par un coefficient de recombinaison radiative faible : $B = 1,8 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ d'après calcul encore évalué à $B = 9,5 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à partir de mesures expérimentales [16]. Pour les matériaux à gap direct, on trouve des valeurs pour B de l'ordre de $10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

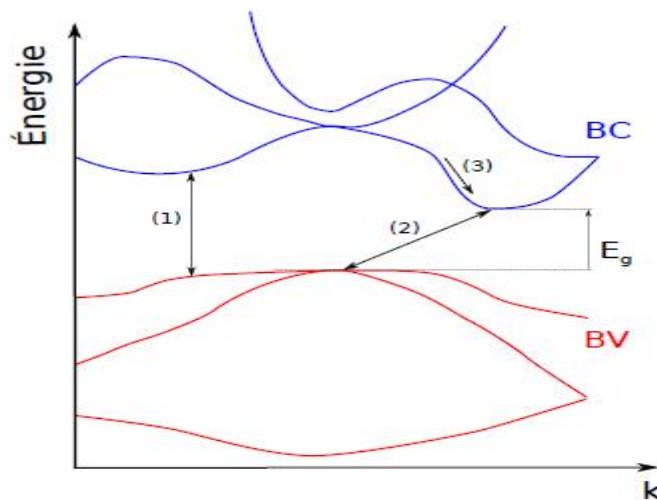


Figure III.14 : Structure de bandes du silicium cristallin et transitions possibles dans l'espace des k . Le chemin (1) indique une transition bande à bande directe, tandis que le chemin (2) correspond à une transition indirecte, associée à une troisième particule, le phonon. Le chemin (3) est suivi par les électrons se thermalisant, là encore accompagné de l'émission de phonons [16].

III.6 Les avantages de la technologie silicium à hétérojonction

Les cellules solaires à hétérojonction présente de nombreux avantages par rapport aux cellules à homojonction, on peut distinguer :

- le procédé d'élaboration à basse températures.
- Possibilité de dépôt de grandes surfaces.
- Meilleur coefficient de température.
- Possibilité d'utiliser des wafers de silicium plus mince.

III.7 Critères pour l'optimisation des cellules à hétérojonction silicium

La définition des critères permettent la fabrication des cellules solaire hétérojonctions à haut rendement. Ces dispositifs doivent être optimisés en fonction de plusieurs exigences :

1/ Une densité d'états d'interface minimale est nécessaire. Pour cela, le nettoyage de la surface est une étape cruciale afin d'éviter toute contamination avant le dépôt des couches a-Si:H.

2/ Le dopage des couches a-Si:H (n) doit être suffisant pour assurer un champ électrique élevé ainsi qu'un bon contact.

3/ Dans la mesure où les couches dopées sont très défectueuses, il est nécessaire d'insérer une couche de passivation à l'interface. Cette couche tampon ou « buffer » doit permettre la diminution des recombinaisons de surface, tout en ne gênant pas la conduction des charges.

4/ Les valeurs des discontinuités de bandes doivent être contrôlées dans la mesure du possible pour trouver un compromis entre propriétés de passivation (forte discontinuité) et de conduction (faible discontinuité).

5/ Les couches d'OTC ainsi que les électrodes métalliques sont soumises à un compromis entre propriétés optiques (réflectivité, absorption, ombrage) et propriétés électriques (conductivité).

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué le fonctionnement des cellules solaires à hétérojonctions en général et celui de la cellule a-Si:H / c-Si en particulier. Nous avons aussi décrit les deux matériaux utilisés (c-Si et a-Si:H) comme composants de base de ces cellules.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser à l'optimisation des cellules solaires à hétérojonction a-Si :H/c-Si à l'aide d'un logiciel de simulation.

REFERENCE DU CHAPITRE III

- [1] : wilfrid. j. h. m. van sark, «Physics and technology of amorphous-crystalline heterostructure silicon solar cells», springer, Germany, 2012.
- [2] : DJERIOUAT Khadidja, diplôme de magister, Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions : GaInP/GaAs, université Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen, 2011.
- [3] : MECHERI Abdeslem et SANDALI Abd elaziz, mémoire de master, Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p), université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.
- [4] : ABADIA Abdelghafour et Dahmane Abderahmane , mémoire de master, Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p) , 2015
- [5] : Thibaut DESRUES, thèse de doctorat, Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière, Ecole Doctorale Matériaux de Lyon, 2009.
- [6] : Frédéric JAY, thèse de doctorat, Nouveaux substrats de silicium cristallin destinés aux cellules photovoltaïques à haut rendement – Cas du silicium mono-like et du dopage aux donneurs thermiques liés à l'oxygène pour les cellules à hétérojonction de silicium, Université Grenoble Alpes, 2016.
- [7] : P.W. Anderson, Phys. Rev. **109**, 1492 (1958).
- [8] : Henry Mathieu, *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques*, Masson, 2ième édition, 1990.
- [9] : LAKAL Chahira et ARRIS Nasrine, diplôme MASTER, étude et comparative des effets des revêtements antireflets à base de l'ITO et Z_NO sur les performances photovoltaïque des cellules solaire de type a-Si :H/ c-Si, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2016.
- [10] : Djicknoum DIOUF, thèse de doctorat, Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure inter digitée en face arrière, Ecole Doctorale «Sciences et Technologies de l'Informatique des Télécommunications et des Systèmes», Université PARIS-SUD11, 2010.
- [11] : w. jianqiang. G. Hua, « Investingation of an a-Si/c-Si interface on a c-Si(P) substrate by simulation», Journal of Semiconductors, N°3, 2012.

[12] : K. Amira, mémoire de magister, Elaboration de nouvelles phases du silicium en couche mince, Université Mantouri de Constantine, 2008.

[13] : A. Bencherat, mémoire de master, Etude de transfert des films minces de silicium monocristallin dans la réalisation de cellules solaires à faible budget thermique, Universités Abdou de Tlemcen, 2012.

[14] : KAHOUL Fouad, mémoire de master, Caractéristique électrique d'une cellule solaire à hétérojonction a-Si: H/ μ c-Si, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.

[15] : Samira OUSSIDHOUM, diplôme de Magister, Etude comparative des performances des cellules solaire à jonction simple et multiple, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2015.

[16] : Wilfried FAVRE, thèse de doctorat, Silicium de type n pour cellules à hétérojonctions : caractérisations et modélisations, PARIS-SUD 11, 2011.

Chapitre IV :
Influence de l'oxyde
d'étain sur les
performances des
cellules a-Si:H/c-Si

Introduction

A cause des coûts élevés de l'expérimentation (techniques de fabrication des cellules), les chercheurs se sont orientés ces dernières années vers la simulation.

Dans cette partie on s'intéresse à la simulation des cellules solaires à hétérojonctions de type a-Si:H/c-Si en étudiant l'influence de la couche antireflet à base de SnO₂ sur les paramètres photovoltaïques de ces cellules solaires dans le but d'optimiser les paramètres physique et géométrique en vue d'obtenir un rendement maximal. Pour cela nous avons utilisé le logiciel de simulation AFORS-HET (Automate **FOR** simulation of **HET**erostructure).

Nous décrivons, dans un premier lieu, le logiciel de simulation employé AFORS-HET ainsi que les structures simulées et nous présentons, dans un second lieu, une interprétation des résultats de simulation.

IV.1 Présentation du logiciel de simulation AFORS-HET

Le logiciel de simulation AFORS-HET est un outil de simulation numérique à une dimension (1D) dédié à l'étude des dispositifs semi-conducteurs à hétérojonctions. Cet outil a été conçu plus particulièrement pour étudier l'hétérojonction a-Si:H/c-Si. Il permet de définir et de simuler le fonctionnement d'une structure composée éventuellement d'un empilement de couches de matériaux semi-conducteurs différents.

AFORS-HET présente une interface accueillante qui permet une prise en main assez facile pour définir une structure donnée et simuler son fonctionnement à l'obscurité ou sous éclairage. Les propriétés électroniques de chaque matériau semi-conducteur peuvent être définies ainsi que la distribution d'états dans la bande interdite d'un matériau donné.

Cette interface est divisée principalement en trois zones, figure (IV.1) :

- 1) **Zone de contrôle (program control)** : sert à définir la structure à simuler ainsi que les paramètres de chaque matériau utilisé. Dans une structure on peut trouver : un contact avant, contact arrière et un certain nombre de couches entre lesquelles existent des interfaces.

- 2) **Zone des paramètres externes (externalparameters)** on y trouve la température externe, le spectre d'illumination et les conditions aux limites.
- 3) **Zone de mesure (measurement)**: où les mesures de courant-tension $I(V)$, capacité-tension $C(V)$, capacité-température $C(T)$, rendement quantique interne et externe, photoluminescence et électroluminescence (PEL), de durées de vie « *Quasi-Steady State Photo-Conductance* »(QSSPC) sont effectuées.

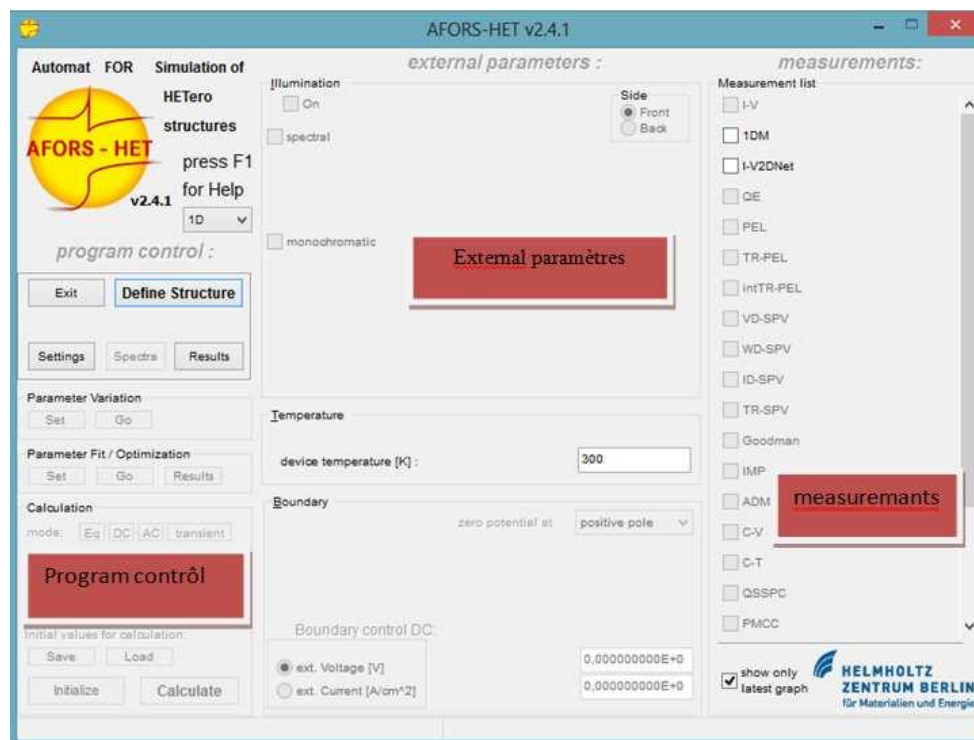


Figure IV.1 : Fenêtre principale de l'interface graphique du logiciel de simulation.

IV.2 Les étapes de simulation

La première étape de simulation avec AFORS-HET est la définition de la structure que nous allons simuler. La structure à simuler, elle est composée toujours d'un contact avant et d'un contact arrière et un nombre variable de couches entre lesquelles existent des interfaces (classées de l'avant à l'arrière de la cellule).

On peut les définir en cliquant sur le bouton correspondant dans la fenêtre principale AFORS-HET qui est « Define structure » (figure IV. 2).

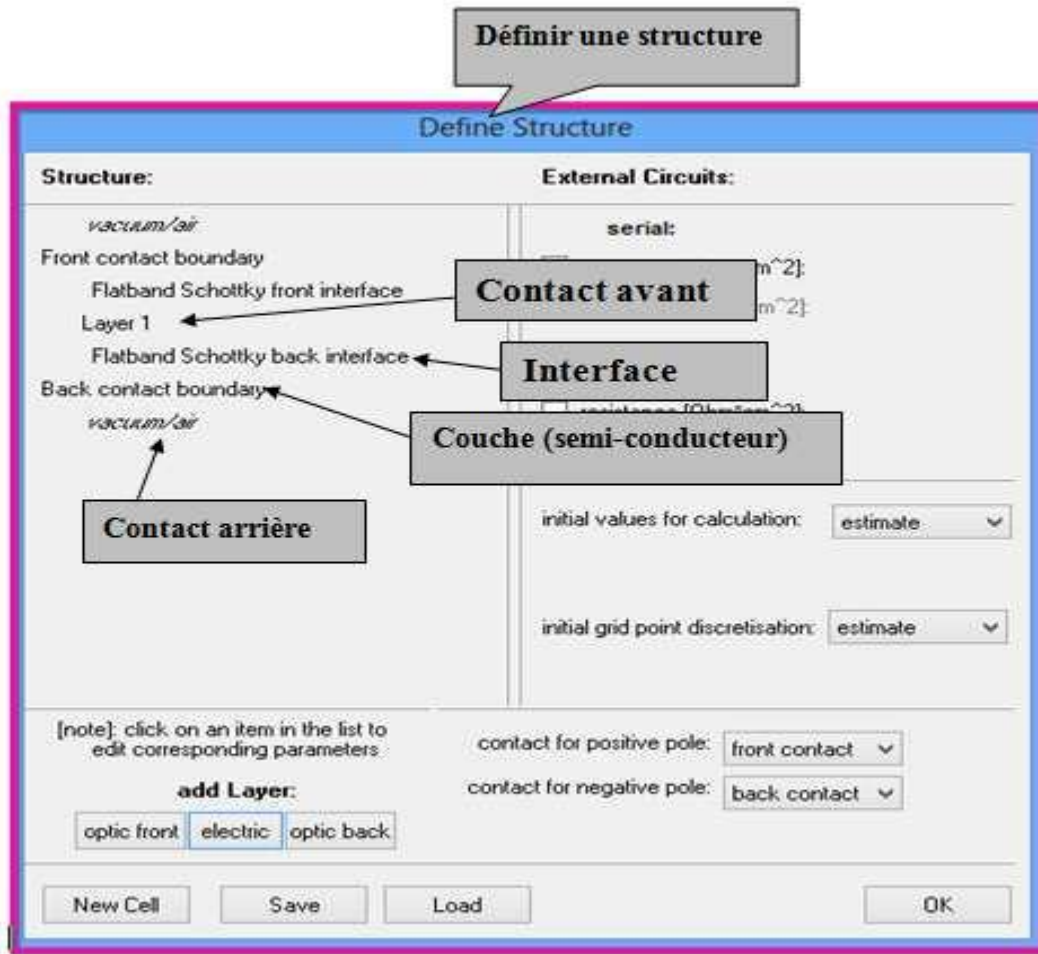


Figure IV.2 : Fenêtre correspondant à la définition de la structure.

Après la définition de la structure, nous introduisons les paramètres nécessaires tels que l'épaisseur et les propriétés électriques (le gap, les mobilités des électrons et des trous, le dopage.....), voir la figure IV.3.

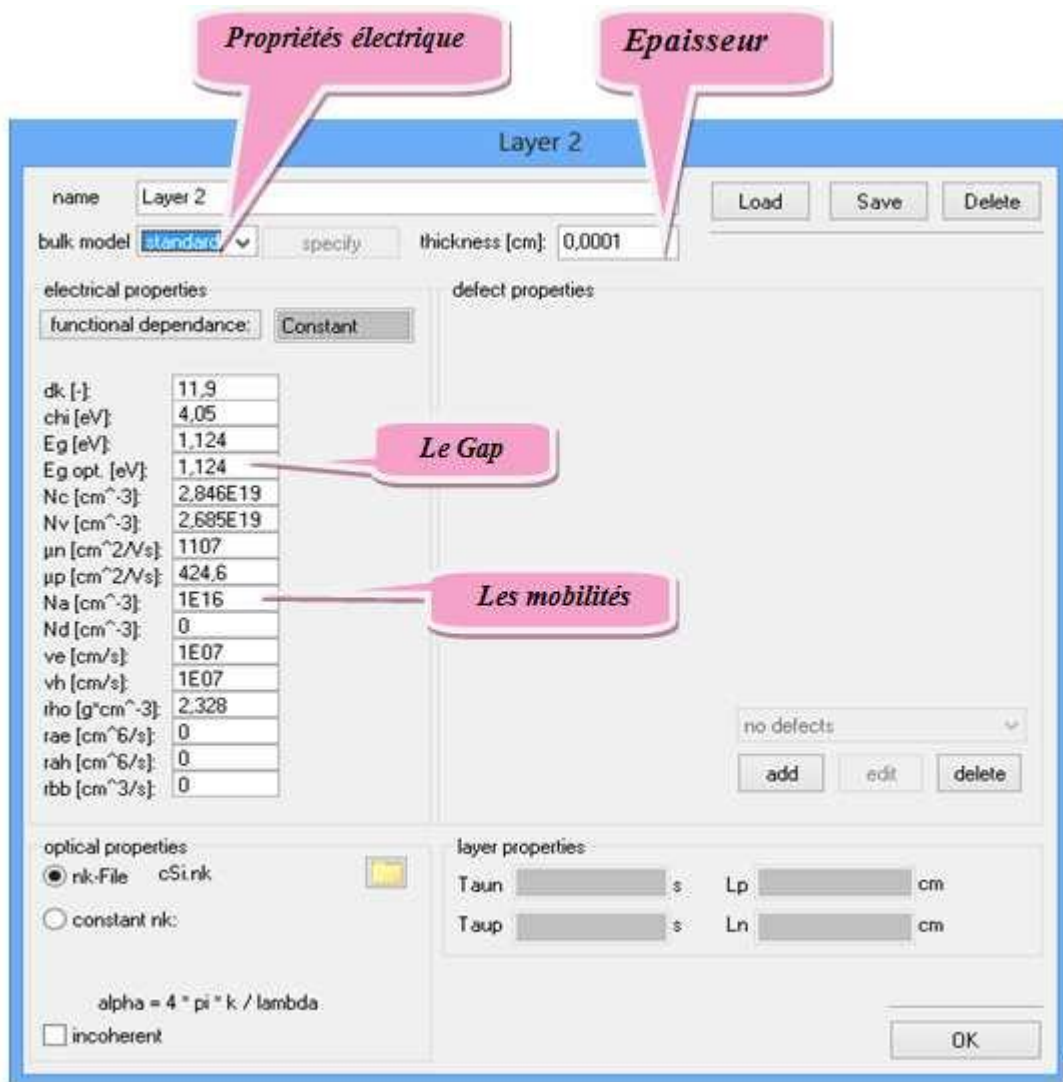


Figure IV.3 : les différents paramètres de la cellule.

Une fois la cellule est créée et enregistrée, le calcul des conditions à l'équilibre thermodynamique est effectué automatiquement.

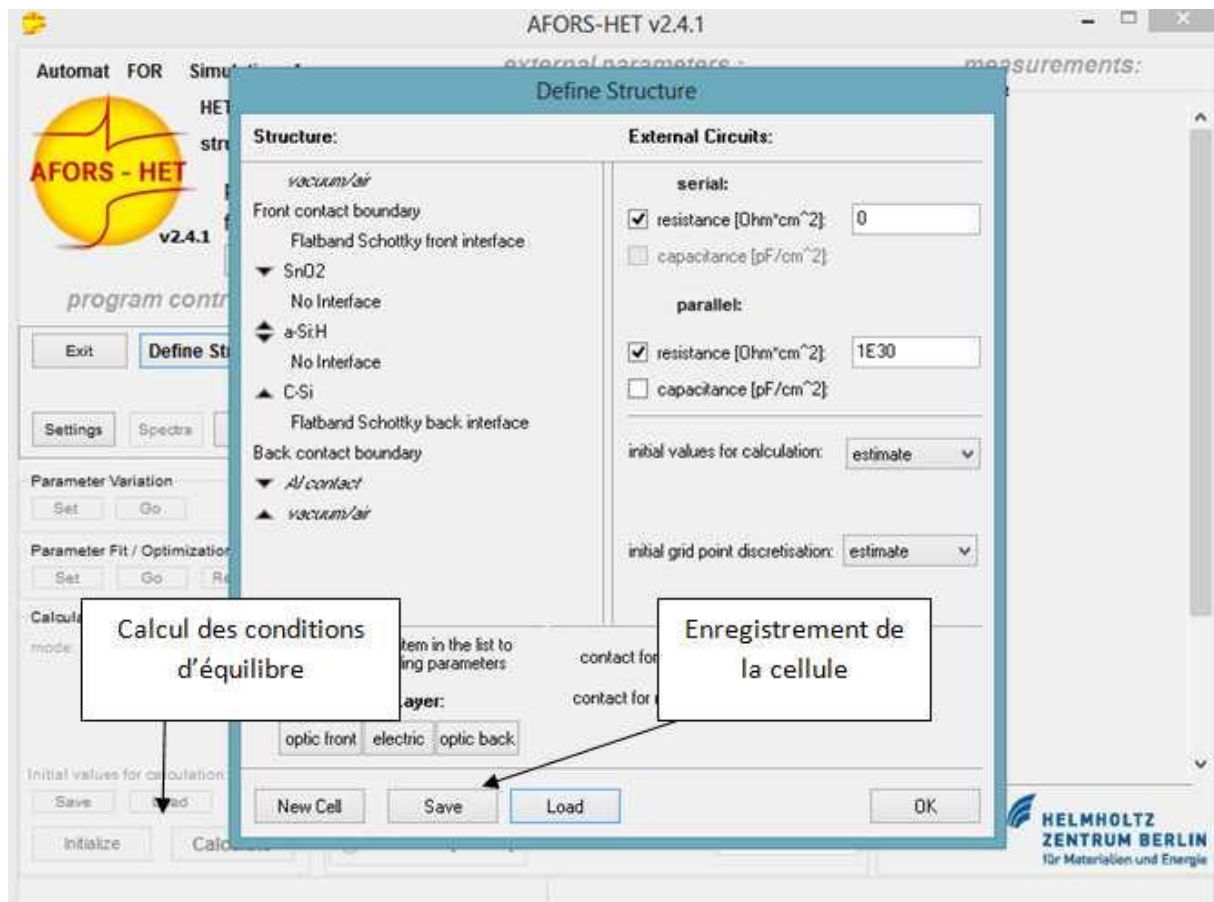


Figure IV.4 : calcul des conditions thermodynamique de la cellule.

Et pour l'illumination de la cellule, nous suivons ces étapes (figure IV.5) :

- (1) —> le choix du mode de calcul (DC au bien AC) ;
- (2) —> mettre l'illumination on « on » ;
- (3) —> cliqué sur le spectre d'illumination « spectral » ;
- (4) —> mettre les conditions aux limites ;
- (5) —> faire des mesure dans la liste des mesures.

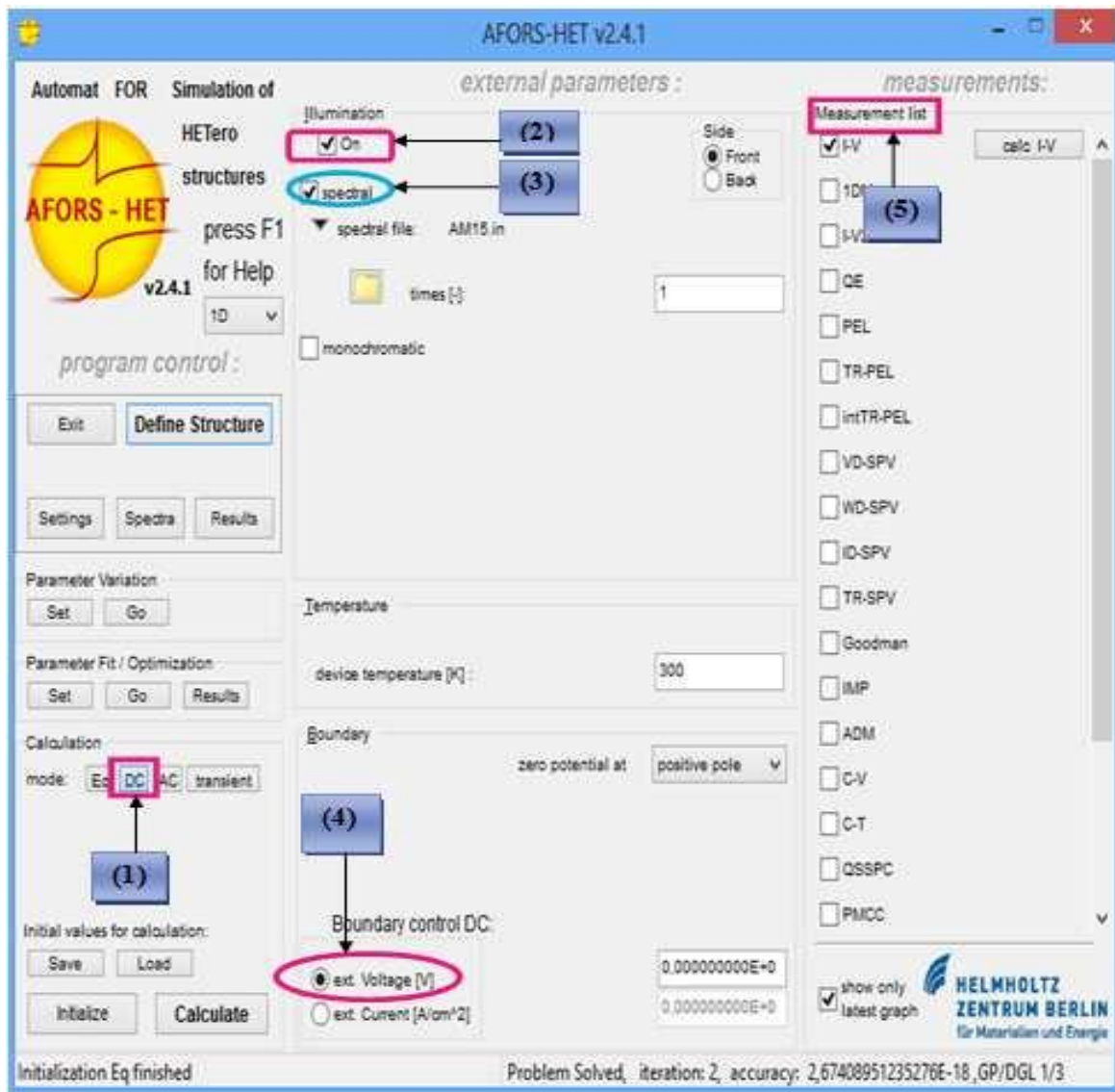


Figure IV.5 : mode de calcul pour l'illumination de la cellule.

IV.3 Structure de la cellule photovoltaïque à simuler

Nous avons étudié, en premier lieu, les cellules solaires à hétérojonction de type a-Si:H/c-Si sans couche antireflet. Ensuite nous avons étudié l'effet de l'introduction d'une couche antireflet de SnO₂ sur la face avant de ces cellules solaires sur leurs performances photovoltaïques. La figure IV.6 présente les structures des cellules solaires simulées :

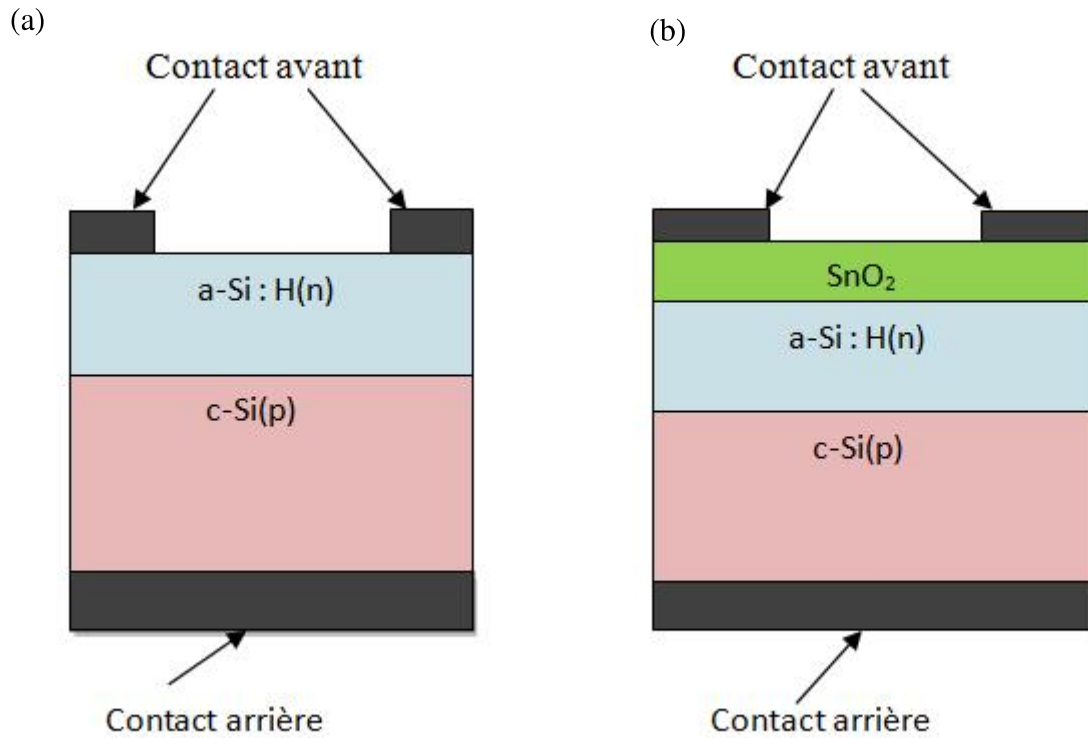


Figure IV.6 : les deux structures des cellules solaires simulées :

- (a) Cellule : a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al.
- (b) Cellule : SnO₂ / a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al.

IV.4 Les paramètres de simulation

Les paramètres utilisés dans la simulation sont introduits sous forme de fichiers data externes. Les simulations ont été effectuées sous un spectre solaire AM 1.5 avec $P = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 300 \text{ K}$.

Paramètres	SnO ₂	a-Si: H(n)	c-Si(p)	Contact arrière
Epaisseur de la couche, w (nm)	50-100	250 - 300	$3 \cdot 10^5$	80
Energie du gap, E_g (eV)	3,6	1,72	1,124	
Concentration des atomes accepteurs, N_a (cm ⁻³)	0	0	$6 \cdot 10^{16}$	
Concentration des atomes donneurs, N_d (cm ⁻³)	$7,8 \cdot 10^{19}$	$7 \cdot 10^{19}$	0	
Densité effective des états dans la bande de conduction, N_c (cm ⁻³)	$2,2 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{20}$	$2,84 \cdot 10^{19}$	
Densité effective des états dans la bande de valence, N_v (cm ⁻³)	$1,8 \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^{20}$	$2,68 \cdot 10^{19}$	

Tableau IV.1 : Les paramètres de simulation [1], [2], [3].

IV.5 Les résultats de simulation

IV.5.1 Diagrammes des bandes d'énergie

La figure IV.7 représente le diagramme énergétique de la cellule solaire à hétérojonction a-Si : H(n) /c-Si(p) avec la couche antireflet de SnO₂.

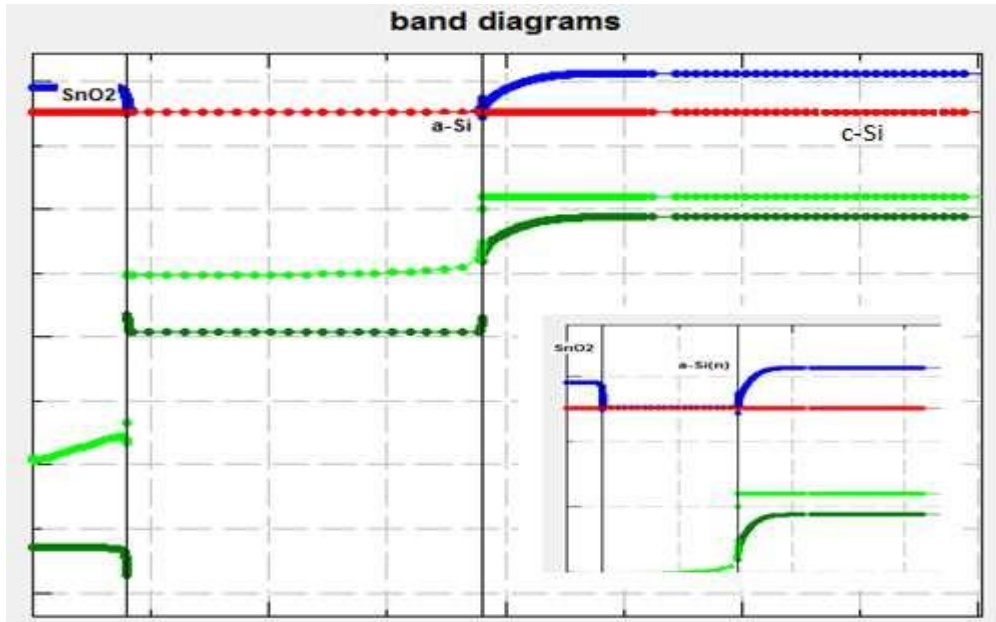


Figure IV.7 : Diagramme de bandes de la cellule a-Si : H(n) /c-Si(p) avec CAR de SnO₂

IV.5.2 Caractéristiques courant/tension des cellules solaires simulées

La figure IV.8 illustre les caractéristiques courant/tension des cellules solaires à hétérojonctions sans couche antireflet (a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al) et avec couche antireflet de SnO₂ (SnO₂ / a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al) obtenues. Les paramètres électriques correspondants sont donnés dans le tableau IV.2. Ces résultats de simulation montrent que l'insertion de la couche antireflet de SnO₂ augmente le courant de court-circuit de la cellule solaire induisant ainsi une amélioration de son rendement de conversion. Cette amélioration est due principalement à la réduction des pertes optiques par réflexion, permettant une meilleure transmission du rayonnement solaire à travers la couche antireflet du SnO₂. Ce qui engendre une amélioration de la caractéristique électrique de la cellule solaire (figure IV.8).

	V _{co} (mV)	J _{cc} (mA /cm ²)	FF %	η %
Sans CAR	655,5	26,44	83,63	14,49
Avec CAR SnO₂	657	27,68	83,65	15,21

Tableau IV.2 : Paramètres électriques des cellules solaires a-Si : H(n) /c-Si(p) sans et avec couche antireflet de SnO₂.

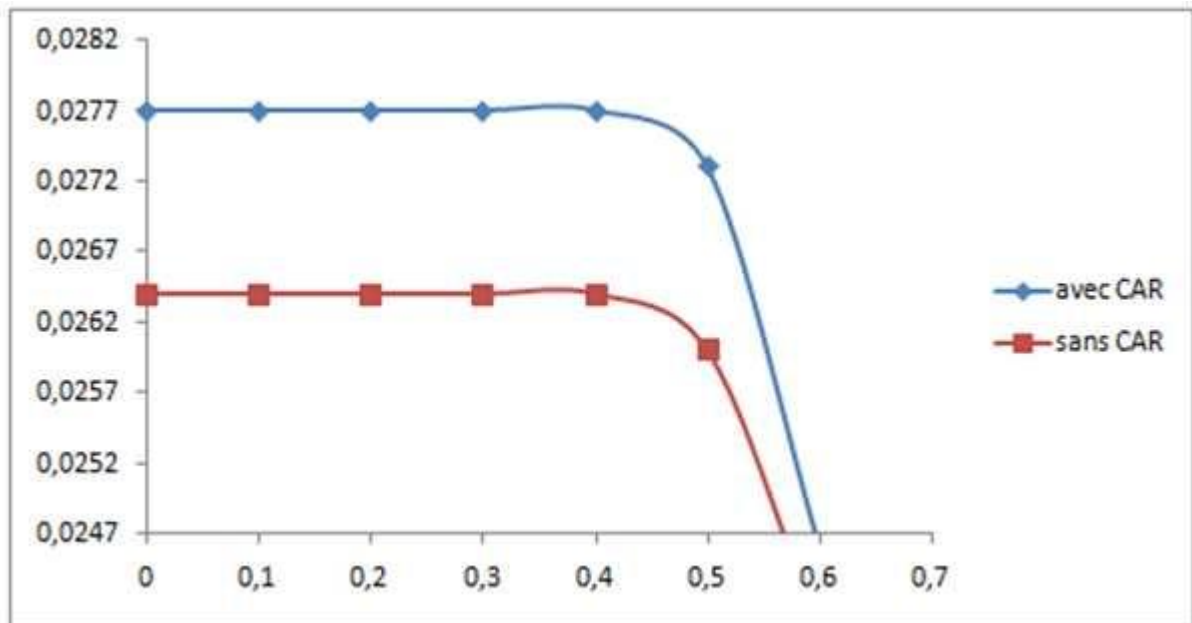


Figure IV.8 : Caractéristiques I(V) de la cellule a-Si : H(n) /c-Si(p) avec et sans la CAR de SnO_2 .

IV.5.3 L'effet de l'épaisseur de l'émetteur (a-Si :H) sur les performances des cellules solaires SnO_2 / a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al

La figure IV.9 illustre l'effet de la variation de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement de conversion des cellules solaires SnO_2 / a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al. Les valeurs numériques des paramètres photovoltaïques de ces cellules sont groupées dans le tableau IV.3.

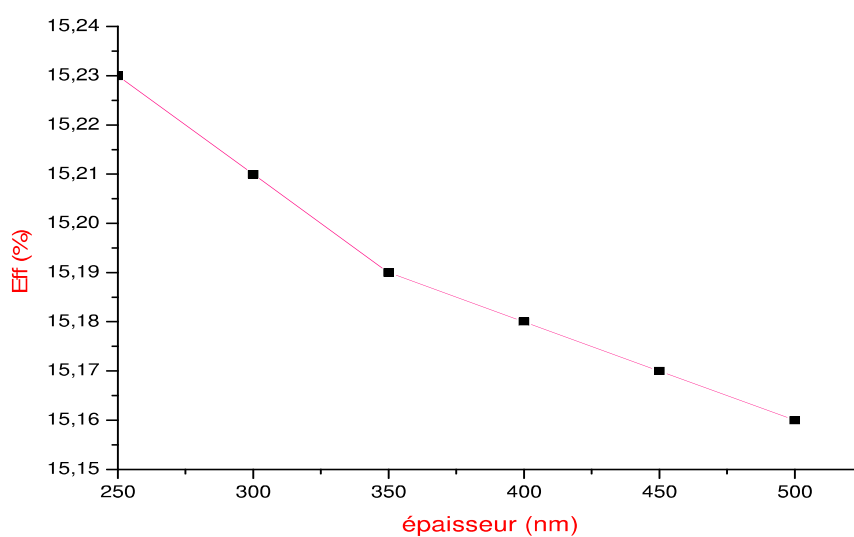


Figure IV.9 : Variation du rendement des cellules $\text{SnO}_2/\text{a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al}$ en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.

Epaisseur a-Si:H (nm)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
250	657	27,71	83,66	15,23
300	657	27,68	83,65	15,21
350	657	27,65	83,65	15,19
400	657	27,62	83,64	15,18
450	657	27,6	83,64	15,17
500	657	27,58	83,63	15,16

Tableau IV.3 : Paramètres photovoltaïques des cellules solaires $\text{SnO}_2/\text{a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al}$ pour différentes valeurs d'épaisseurs de l'émetteur.

Ces résultats montrent que l'épaisseur optimale d'émetteur permettant un meilleur rendement est de 250 nm. L'augmentation de son épaisseur, au-delà de cette valeur, provoque une diminution légère du rendement des cellules solaires.

IV.5.4 L'effet de l'épaisseur de la base (c-Si) sur les performances des cellules solaires $\text{SnO}_2/\text{a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al}$

L'influence de la variation de l'épaisseur de l'absorbeur (c-Si) sur le rendement des cellules solaires $\text{SnO}_2/\text{a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al}$ est illustrée sur la figure IV.10. Nous observons une amélioration remarquable du rendement de conversion de ces cellules (Tableau IV.4) lorsque l'épaisseur de la base augmente, ce qui s'explique par l'augmentation du nombre de photons absorbés dans la base. En effet, lorsque la base est très mince, le rayonnement peut traverser la base sans être absorbé.

Epaisseur c-Si (μm)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
250	650,8	27,21	83,39	14,77
300	657	27,68	83,65	15,21
350	660,2	28,06	83,99	15,55
400	664,8	28,37	83,52	15,75
450	668	28,64	83,8	16,03
500	671,1	28,87	83,94	16,26

Tableau IV.4 : Paramètres photovoltaïques des cellules solaires $\text{SnO}_2/\text{a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al}$ pour différentes valeurs d'épaisseurs de la base.

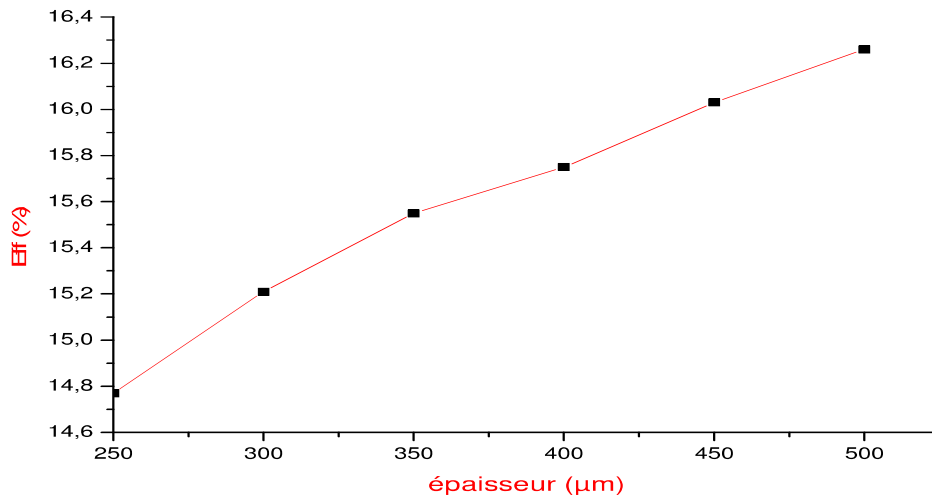


Figure IV.10: Variation du rendement des cellules $\text{SnO}_2/\text{a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al}$ en fonction de l'épaisseur de la base (c-Si).

IV.5.3 L'effet de l'épaisseur de la couche antireflet du SnO_2

A partir des résultats résumés dans le tableau IV.5, le meilleur rendement de conversion s'obtient pour une épaisseur de la couche antireflet de SnO_2 de 50 nm. Au-delà de cette valeur, le courant de court-circuit diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du SnO_2 , ce qui provoque une chute du rendement des cellules (figure IV.11).

Épaisseur SnO_2 (nm)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF	η (%)
50	658,6	29,55	83,76	16,3
60	657	28,83	83,84	15,88
70	657	28,21	83,74	15,52
80	657	27,68	83,65	15,21
90	655,5	27,21	83,77	14,94
100	655,5	26,79	83,69	14,7
110	655,5	26,42	83,62	14,48

Tableau IV.5 : Paramètres photovoltaïques des cellules solaires $\text{SnO}_2/\text{a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al}$ pour différentes valeurs d'épaisseurs de la couche antireflet du SnO_2 .

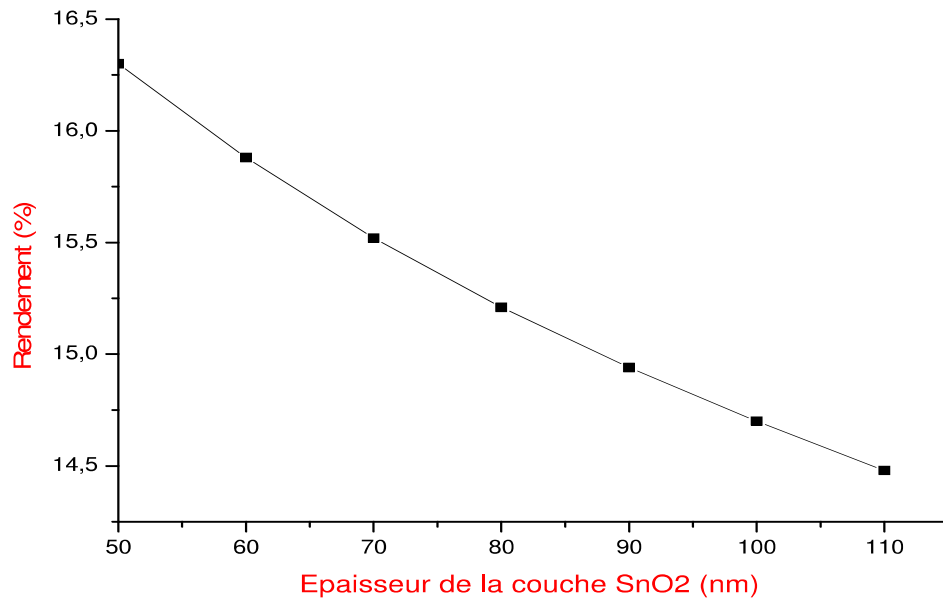


Figure IV.11 : Variation du rendement des cellules SnO₂/a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al en fonction de l'épaisseur de la couche antireflet du SnO₂.

IV. 5. 4 Effet du dopage du silicium cristallin sur le rendement des cellules SnO₂ /a-Si : H(n) /c-Si(p) /Al

L'augmentation du dopage de 10^{13} cm^{-3} à 10^{16} améliore la conductivité des couches du Si cristallin permettant de réduire les pertes résistives dans la cellule et par conséquent une augmentation du rendement de conversion photovoltaïque (figure IV.12).

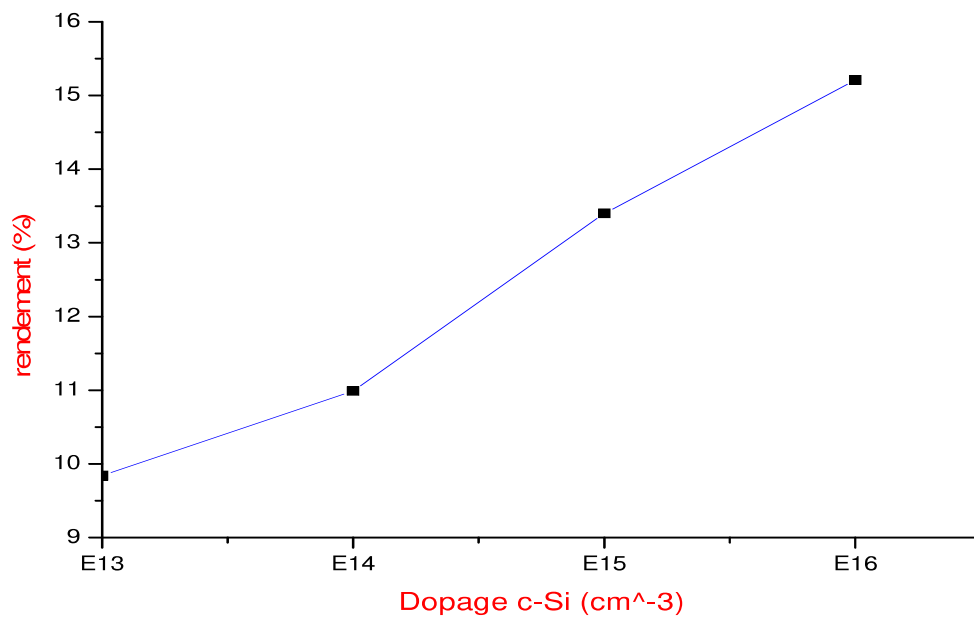


Figure IV.12 : Variation du rendement des cellules $\text{SnO}_2/\text{a-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}/\text{Al}$ en fonction du dopage de c-Si.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation concernant les cellules solaires à hétérojonctions de structures a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al et $\text{SnO}_2/\text{a-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}/\text{Al}$.

Ces résultats confirment l'importance de l'insertion d'une couche antireflet de SnO_2 sur la face avant des cellules solaires a-Si:H/c-Si. En effet, la couche antireflet du SnO_2 améliore les performances photovoltaïques de ces cellules solaires conduisant à un rendement optimal de 16%.



REFERENCE DU CHAPITRE II

[1]: MECHERI Abdeslem et SANDALI Abd elaziz, mémoire e de master, Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p), université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.

[2] : Nichiporuk Oleksiy, thèse de doctorat, Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.

[3] : Samira OUSSIDHOUM, diplôme de Magister, Etude comparative des performances des cellules solaire à jonction simple et multiple, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2015.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la couche antireflet du dioxyde d'étain (SnO_2) sur les paramètres photovoltaïques des cellules solaires de type a-Si:H/c-Si en utilisant la simulation numérique à l'aide du logiciel AFORS-HET. Les résultats obtenus confirment l'importance de l'insertion de la couche antireflet du SnO_2 sur la face avant de ces cellules.

En effet, les caractéristiques I-V des cellules solaires à hétérojonction a-Si:H/c-Si sont considérablement améliorées et le rendement de conversion étant augmenté de 14.49 % à 15.21 %, après insertion de la couche antireflet du SnO_2 . Cette amélioration est due à la réduction des pertes optiques et résistives dans ces cellules solaires.

Afin d'optimiser ces structures : $\text{SnO}_2/\text{a-Si:H/c-Si/Al}$ et d'augmenter encore leur rendement de conversion, nous avons réalisé d'autres simulations en variant d'autres paramètres structuraux : dopage, épaisseurs de la base, de l'émetteur et de la couche antireflet du SnO_2 qui ont démontré leur influence remarquable sur les performances de ces cellules.

Les résultats obtenus montrent que :

- La largeur optimale d'émetteur permettant un meilleur rendement est de 250 nm.
- Les rendements de conversion sont plus élevés sur des substrats de c-Si plus épais (une valeur de 250 μm est utilisée comme référence).
- L'augmentation du dopage du substrat c-Si à 10^{16} cm^{-3} améliore les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire suite à la réduction des pertes résistives par une augmentation de la conductivité de la base.
- Un rendement maximal peut être obtenu en utilisant une couche antireflet mince de SnO_2 d'épaisseur 50 nm.

L'optimisation des paramètres structuraux des cellules solaires silicium à hétérojonction permet l'amélioration de leur rendement de conversion à 16%, ce qui démontre le fort potentiel de ces cellules solaires à hétérojonction et ouvre des perspectives de leur développement du point expérimental.

Résumé

Les cellules solaires à hétérojonctions qui consistent à déposer des couches de silicium amorphe sur du silicium cristallin suscitent un intérêt croissant dans la recherche et l'industrie du fait qu'elles permettent d'augmenter significativement le rendement et offrent la possibilité de production avec une faible consommation d'énergie.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude de l'influence de la couche antireflet du dioxyde d'étain (SnO_2) sur les paramètres photovoltaïques des cellules solaires de type a-Si:H/c-Si en utilisant la simulation numérique à l'aide du logiciel AFORS-HET. Les résultats obtenus confirment l'importance de l'insertion de la couche antireflet du SnO_2 sur la face avant de ces cellules.

En effet, les caractéristiques I-V des cellules solaires à hétérojonction a-Si:H/c-Si sont considérablement améliorées et le rendement de conversion étant augmenté de 14.49 % à 15.21 %, après insertion de la couche antireflet du SnO_2 . Cette amélioration est due à la réduction des pertes optiques et résistives dans ces cellules solaires.

L'optimisation des paramètres structuraux des cellules solaires à hétérojonction (dopage, épaisseurs de la base, de l'émetteur et de la couche antireflet) permet l'amélioration de leur rendement de conversion à 16 %, ce qui démontre le fort potentiel de ces cellules solaires à hétérojonction et ouvre des perspectives de leur développement du point de vue expérimental.

Mots clés : cellule solaire, hétérojonction, silicium amorphe, simulation, optimisation, rendement.