

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



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté de Génie Electrique et Informatique
Département d'Electronique



Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Matériaux et Dispositifs Electroniques et Photovoltaïques

Présenté par

Chahira LEKHAL

Nasrine ARRIS

Thème

Etude comparative des effets des revêtements antireflets à base de l'ITO et ZnO sur les performances photovoltaïques des cellules solaires de type a-Si:H/c-Si.

Mémoire soutenu publiquement le 21 /07/2016 devant le jury composé de :

TAZIBT Slimane	MCA	Président	UMMTO
HOCINE Dalila	MCB	Promoteur	UMMTO
ATTAF Youcef	MAA	Examineur	UMMTO
SIDI SAID Amel	MAA	Examineur	UMMTO

Remerciements

Louange à DIEU qui nous a comblé de faveurs, et apporté son aide afin de réaliser le travail exposé tout le long de ce mémoire.

On tient à exprimé notre profonde gratitude et notre reconnaissance envers notre promotrice M^{lle} Dalila HOCINE, Maître de Conférences B à l'UMMTO aussi bien pour son encadrement efficace, son aide, et sa disponibilité précieuse que pour ses qualités humaines.

On remercie M^{lle} Samira OUSIDHOUM pour toute son aide précieuse.

Nos vifs remerciements s'adressent également aux membres du jury, qui ont accepté d'examiner et de corriger ce modeste travail, on leur fait honneur de respect.

Nous remercions également tous nos enseignants ainsi que le personnel administratif de la faculté de génie électrique et de l'informatique de l'UMMTO.

Finalement on remercie chaleureusement tout nos proches qui ont toujours été là pour nous soutenir et nous encourager durant nos études, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce mémoire.

Dédicaces

A ma très chère maman,

A toute ma famille,

A tous ceux qui me sont chers.

Chahira

A ma chère maman et mon cher père,

A ma sœur et mes frères,

A toute ma famille,

A tous ceux qui me son chers.

Nasrine

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Le silicium et ses propriétés pour applications photovoltaïques	
Introduction.....	3
1. Le silicium monocristallin.....	3
1.1. Caractéristiques.....	3
1.2. Méthodes de fabrication	5
a. La méthode Czochralski.....	5
b. Méthode de la zone flottante (FZ).....	7
2. Le silicium multi-cristallin.....	8
2.1. Caractéristiques.....	8
2.2. Méthode d'élaboration par solidification unidirectionnelle	9
3. Le silicium amorphe en couches minces.....	10
3.1. Caractéristiques.....	10
a. Silicium amorphe hydrogéné.....	12
b. Structure du silicium amorphe hydrogéné.....	13
3.2. Les méthodes d'élaboration.....	15
a. Implantation ionique.....	15
b. Pulvérisation cathodique.....	16
c. L'évaporation sous vide	17
d. Les techniques basées sur la décomposition chimique en phase vapeur (C.V.D).....	18
4. Etudes comparatives entre les trois catégories de silicium.....	21
5. Le silicium et le photovoltaïque	23
Conclusion.....	25

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les cellules solaires

Introduction	26
1. Structure d'une cellule solaire	26
1.1. Définition d'une cellule solaire.....	26
1.2. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque	27
1.3. Structure des cellules solaires industrielles.....	29
2. Principe de fonctionnement de la cellule solaire	31
2.1. l'effet photovoltaïque	31
2.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	31
3. Paramètres électriques d'une cellule solaire.....	33
3.1. Schéma électrique équivalent de la cellule solaire.....	33
3.2. Caractéristique courant/tension et les paramètres électrique d'une cellule solaire.....	34
3.3. Paramètres influençant le comportement électrique d'une cellule solaire.....	37
4. Technologies des cellules solaires.....	39
4.1. Cellules PV de première génération.....	39
4.2. Cellules PV de deuxième génération.....	39
4.3. Cellules PV de troisième génération.....	40
Conclusion.....	41

Chapitre 3 : Etude des cellules solaires à hétérojonctios de type a –Si : H/c-Si

Introduction.....	42
1. Les cellules solaires à hétérojonctions.....	42
1.1. Diagramme des bandes d'énergie d'une hétérojonction.....	42
1.2. Les composant de la cellule silicium à hétérojonction.....	43
2. Les cellules solaires du type MétalSemiconduct(Schottky).....	45
2.1. Contact Métal-Semiconducteur.....	45
a) Contact ohmique.....	45
b) Contact redresseur (Schottky).....	46

2.2. Principe de fonctionnement de la cellule (Schottky).....	47
3. Cellules à hétérojonctions de type a-Si :H/c-Si.....	48
3.1. Présentation de la cellule à hétérojonctions de type a-Si :H/c-Si.....	48
3.2. Le modèle d'Anderson.....	49
4. Les oxydes transparents conducteurs (TCO)	
4.1. Définition oxydes transparent conducteurs (TCO).....	51
4.2. L'oxyde de zinc ZnO.....	51
4.2.1. Structure cristalline.....	51
4.2.2. Propriétés électriques.....	51
4.2.3. Propriétés optiques.....	52
4.3. Présentation de l'ITO.....	53
4.3.1 Propriétés structurales.....	53
4.3.2. Propriétés électriques.....	54
4.3.3. Propriétés optiques.....	54
4.4. Application photovoltaïque	
4.4.1. Electrode transparente.....	55
4.4.2. Couche antireflet.....	55
Conclusion.....	56

Chapitre 4 : Simulation des cellules solaires de type a-Si :H/c-Si

Introduction	57
1. Présentation du logiciel de simulation AFORS-HET.....	57
2. Les étapes de la simulation.....	58
3. Les structures des cellules solaires simulées.....	61
4. Les paramètres de simulation.....	62
4.1. Paramètres de la couche ITO et de la couche ZnO.....	62
4.2. Paramètres des couches a-Si :H(n),c-Si(p) utilisées.....	62
5. Résultats de simulation.....	63
5.1. Diagramme des bandes d'énergie.....	63
5.2. Caractéristique courant-tension des cellules solaires simulées.....	64

5.3. Influence du dopage de l'ITO sur les performances de la cellule solaire ITO/a-Si :H(n)/c-Si(p)/Al.....	65
5.4. Influence du dopage de ZnO sur les performances de la cellule solaire ZnO/a-Si :H(n)/c-Si(p)Al.....	65
Conclusion	67
Conclusion générale	68

Liste des figures

Figure 1.1	Structure cristallographique du silicium monocristallin (type diamant)	04
Figure 1.2	Structure de bandes du silicium monocristallin	04
Figure 1.3	Coefficient de réflexion R et d'absorption α du silicium monocristallin en fonction de la longueur d'onde	05
Figure 1.4	Technique de tirage Czochralski	06
Figure 1.5	Lingots de Si monocristallin	07
Figure 1.6	Méthode de la zone flottante	08
Figure 1.7	Image d'un substrat de silicium multicristallin	09
Figure 1.8	Procédé Polix pour la solidification unidirectionnelle du silicium multicristallin	10
Figure 1.9	Vue schématique de l'arrangement atomique dans la structure: (a) cristalline, (b) amorphe	11
Figure 1.10	Distribution de densité d'états dans la structure cristalline (a), et la structure amorphe (b)	11
Figure 1.11	Représentation schématique de la structure atomique : a- une paire de liaisons pendantes. b- une liaison pendante isolée	12
Figure 1.12	Structure du Si amorphe	12
Figure 1.13	(a) Structure du silicium cristallin et (b) Structure du silicium amorphe hydrogéné	13
Figure 1.14	Passivation des défauts par l'hydrogène	14
Figure 1.15	Phénomènes de surface dû à l'implantation ionique	16
Figure 1.16	Pulvérisation cathodique	17
Figure 1.17	Phénomènes physico-chimiques se produisant dans un réacteur CVD	18
Figure 1.18	Schéma descriptif du réacteur PECVD	19
Figure 1.19	Dispositif expérimental de la technique APCVD	20
Figure 1.20	Le procédé LPCVD	21
Figure 1.21	Part des différentes technologies dans le marché photovoltaïque en 2010	23
Figure 2.1	Jonction PN éclairée, cellule photovoltaïque	27
Figure 2.2	Composition d'une cellule photovoltaïque	27

Figure 2.3	Structure d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium cristallin	30
Figure 2.4	Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque	32
Figure 2.5	Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire	34
Figure 2.6	Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.	34
Figure 2.7	Influence de la température sur la caractéristique courant/tension d'une cellule photovoltaïque	38
Figure 2.8	Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant/tension d'une cellule photovoltaïque	39
Figure 2.9	Evolution du rendement des différentes technologies photovoltaïques	41
Figure 3.1	Diagramme des bandes d'énergie d'une hétérojonction sous éclairement	43
Figure 3.2	Diagramme de bandes d'un contact ohmique en équilibre thermodynamique entre (a) un métal et un semi-conducteur de type p avec $q\phi_m > q\phi_s$, et (b) un métal et un semiconducteur de type n avec $q\phi_m < q\phi_s$. NV est le niveau du vide, V_d est la tension de diffusion.	46
Figure 3.3	Diagramme de bandes d'un contact Schottky en équilibre thermodynamique entre (a) un métal et un semi-conducteur de type p avec $q\phi_m < q\phi_s$, et (b) un métal et un semiconducteur de type n avec $q\phi_m > q\phi_s$. NV est le niveau du vide, V_d est la tension de diffusion.	47
Figure 3.4	Structure schématique de cellules à hétérojonctions a-Si:H / c-Si.	48
Figure 3.5.a	Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p) à l'équilibre thermodynamique.	50
Figure 3.5.b	Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si:H(p)/c-Si(n) à l'équilibre thermodynamique	50
Figure 3.6	Structure Wurtzite de l'oxyde de zinc	51
Figure 3.7	Présentation du gap de l'oxyde de zinc.	52
Figure 3.8	Transmission d'un film d'oxyde de zinc recuit pour différentes températures	53

Figure 3.9	Maille élémentaire de Bixbyite d' In_2O_3	54
Figure 3.10	Effet de la couche antireflet sur la cellule photovoltaïque	56
Figure 4.1.a	Fenêtre principale de l'interface graphique du logiciel de simulation	58
Figure 4.1.b	Fenêtre correspondante à la définition de la structure	59
Figure 4.1.c	Introduction des paramètres de la cellule solaire	60
Figure 4.1.d	Mode de calcul et illumination de cellule	60
Figure 4.2.a	La cellule solaire $\text{ZnO}/\text{a-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}/\text{Al}$ simulée	61
Figure 4.2.b	La cellule solaire $\text{ITO}/\text{a-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}/\text{Al}$ simulée	61
Figure 4.3.a	Diagramme des bandes d'énergie de la cellule solaire $\text{ITO}/\text{a-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}/\text{Al}$	63
Figure 4.3.b	Diagramme des bandes d'énergie de la cellule solaire $\text{ZnO}/\text{a-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}/\text{Al}$	63
Figure 4.4	Caractéristiques courant-tension des cellules solaires à hétérojonction $\text{a-Si:H}/\text{c-Si}$ simulées	64
Figure 4.5	Variation du rendement des cellules solaires $\text{a-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ en fonction de dopage de l'ITO et de ZnO	66

Liste des tableaux

Tableau 4.1.a	Paramètres de simulation des couches ITO et ZnO utilisées	62
Tableau 4.1.b	Paramètres de simulation des couches a-Si :H(n) et c-Si(p) utilisées	62
Tableau 4.2.a	Les paramètres électriques des cellules solaires ITO/a-Si :H(n)/c-Si(p)/Al en fonction de la variation de la concentration du dopage de l'ITO	65
Tableau 4.2.b	Variation des paramètres électroniques des cellules solaires ZnO/ a-Si :H(n)/Al en fonction de la variation de la concentration du dopage du ZnO	66

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance, de nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution.

Souvent la révolution des énergies renouvelable est avancée comme un dénouement à tous problèmes de production d'énergie électrique. Parmi ces énergies, l'énergie issue du soleil répond actuellement à ces critères à la fois d'abondance à la surface terrestre et de régénération infinie à notre échelle, elle peut ainsi être utilisée directement sous forme thermique, et depuis la découverte de l'effet photovoltaïque, convertie en énergie électrique. L'énergie photovoltaïque est une transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, elle est assurée fondamentalement par des cellules solaires au silicium dont la fabrication est de plus en plus maîtrisée.

L'élément le plus utilisé pour la fabrication des cellules solaires est le silicium (plus de 95% du marché mondial). En effet c'est un élément très abondant sur terre bénéficiant d'une technologie de la microélectronique qui permet la fabrication des cellules avec un haut rendement (24%) mais avec un cout de production très élevé [1].

Les nouvelles connaissances acquises dans le domaine des matériaux et des nouvelles structures permettent d'exploiter l'apport de chacun de ces deux paramètres, l'augmentation du rendement photovoltaïque tout en diminuant le prix de revient des nouvelles cellules solaires. Dans cette thématique, plusieurs attentions se sont portées sur l'utilisation des oxydes transparents conducteurs pour réaliser des cellules solaires à hétérojonction à partir d'un substrat de silicium.

Les cellules solaires à hétérojonction a-Si:H/c-Si sont très intéressantes en raison de multiples avantages potentiels en termes de faible coût de production combiné à un fort potentiel d'amélioration du rendement de conversion. Afin de parvenir à des rendements élevés, ces cellules solaires doivent présenter une forte transmission de la lumière.

L'utilisation de couches antireflet à base de l'ITO et du ZnO en face avant réduit considérablement les pertes optiques dues à la réflexion élevée du silicium.

Dans ce travail, nous effectuons une étude comparative des effets des revêtements antireflets à base de l'ITO et ZnO sur les performances photovoltaïques des cellules solaires de type a-Si:H/c-Si à l'aide de la simulation numérique. L'objectif est de déterminer le revêtement antireflet permettant d'obtenir les meilleures performances photovoltaïques.

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

Le premier chapitre présente les différentes catégories du silicium et leurs caractéristiques ainsi qu'une description détaillée de leurs techniques d'élaboration.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons un état de l'art sur les cellules solaires incluant leurs structures et principe de fonctionnement. Nous avons également présenté les différentes technologies solaires avec les rendements obtenus pour chaque filière.

Le troisième chapitre comporte l'étude des cellules solaires à hétérojonction de type a-Si:H/c-Si et les propriétés optiques et électriques des matériaux ZnO et ITO comme constituants de ces cellules.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation des cellules solaires à hétérojonction de type a-Si:H/c-Si sans et avec les deux couches antireflets (ITO, ZnO) à l'aide de logiciel de simulation AFORS-HET. Cela concerne notamment la comparaison des caractéristiques courant-tension (I-V) des cellules solaires sans et avec les deux couches antireflets (ITO, ZnO) ainsi que la détermination de leurs rendements de conversion. L'analyse et l'interprétation des résultats de simulation nous permettront d'identifier le revêtement antireflet permettant d'obtenir les meilleures performances photovoltaïques.

CHAPITRE 1

Le silicium et ses propriétés pour applications photovoltaïques

Introduction

Le silicium est l'un des éléments les plus utilisés par l'homme, et le plus abondant dans l'écorce terrestre (25%) après l'oxygène, il existe dans la nature sous forme de composés : sous forme de dioxyde de silicium (SiO_2), on le trouve sous forme de silice amorphe (dans le sable, ou d'origine lithogénique lorsqu'il est sous la forme de silice minérale, le quartz, la cristobalite, etc.), ou d'autres silicates.

Ce matériau est à la base de l'industrie électronique moderne dans la majorité des dispositifs tels que les diodes, les transistors, les circuits intégrés, et les cellules photovoltaïques.

Dans ce chapitre nous allons présenter les caractéristiques du silicium monocristallin, silicium multicristallin, et le silicium amorphe. Nous donnerons successivement quelques généralités, puis nous terminerons par une étude comparative entre les trois catégories de silicium.

1. Le silicium monocristallin

1.1. Caractéristiques

Le silicium monocristallin est un matériau de très haute pureté, qui comporte des grains parfaitement ordonnés de taille supérieure à 10cm [1], il est obtenu par des procédés industriels tels que le tirage en creuset (méthode de Czochralski) ou la purification par fusion de zone (FZ).

La structure cristallographique du silicium monocristallin (Figure 1.1) est une structure cubique diamant dans laquelle deux réseaux cubiques à faces centrées s'interpénètrent. Chaque atome d'un des réseaux est entouré par 4 atomes voisins équidistants de l'autre réseau formant un tétraèdre [2]. Les liaisons entre les atomes sont de type covalentes avec une distance interatomique de 2.35 \AA et un paramètre de maille $a=5.43 \text{ \AA}$ [3]. La bande interdite (gap), séparant la bande de valence de la bande de conduction est égale à $E_g = 1.12 \text{ eV}$ à température ambiante. Il correspond à un gap indirect puisque le minimum de la bande de conduction est repéré en un point autre que le maximum de la bande de valence dans la zone de Brillouin. La figure 1.2 représente la répartition des niveaux d'énergie du silicium monocristallin et illustre le gap indirect.

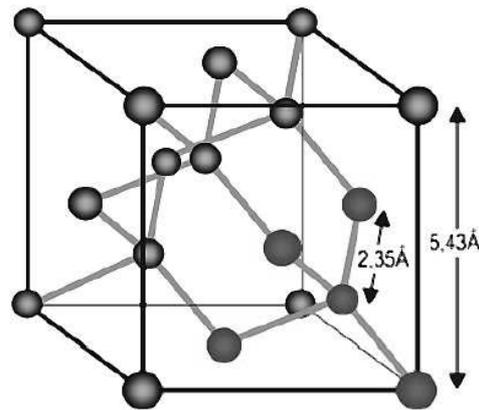


Figure 1.1: Structure cristallographique du silicium monocristallin (type diamant) [3].

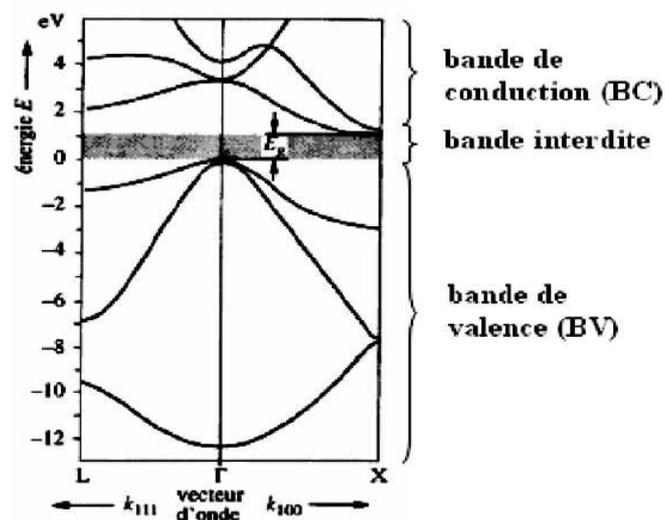


Figure 1.2: Structure de bandes du silicium monocristallin [4].

La figure 1.3 montre la variation des propriétés optiques du silicium monocristallin, à savoir le coefficient de réflexion R et le coefficient d'absorption α en fonction de la longueur d'onde, mesurés à température ambiante [5]. Le spectre du coefficient de réflexion révèle 2 pics localisés autour de $\lambda=275$ nm et $\lambda=365$ nm, caractéristiques du silicium monocristallin. Ces pics sont associés respectivement à l'ordre à longue distance et à courte distance dans la structure cristalline [6]. Le coefficient d'absorption est faible dans l'infrarouge à cause des faibles énergies d'excitation. La longueur d'absorption pour laquelle 63 % du faisceau lumineux est absorbé dans le matériau, est de 100 μm pour des photons de longueur d'onde $\lambda=2$ μm . Elle prend cependant des valeurs très faibles aux faibles longueurs d'onde, jusqu'à 10 nm dans l'ultraviolet.

En particulier, on peut noter qu'à la longueur d'onde 808 nm, le coefficient de réflexion du Si monocristallin est de 0.35 et le coefficient d'absorption est environ égal à 7×10^3 [6].

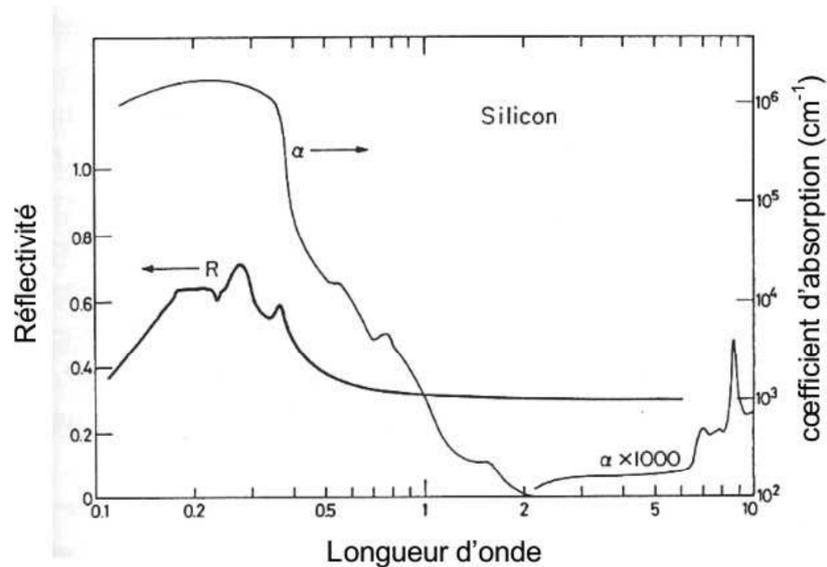


Figure 1.3: Coefficient de réflexion R et d'absorption α du silicium monocristallin en fonction de la longueur d'onde [5].

1.2. Méthodes de fabrication

Le cristal de silicium employé dans l'industrie des semi-conducteurs est principalement élaboré. Pour produire du silicium monocristallin, on utilise les techniques d'élaboration telles que la méthode Czochralski, et la méthode de Fusion de zone Fz.

a. La méthode Czochralski

La méthode Czochralski (Figure 1.4) permet d'obtenir de gros monocristaux de qualité optique suffisante.

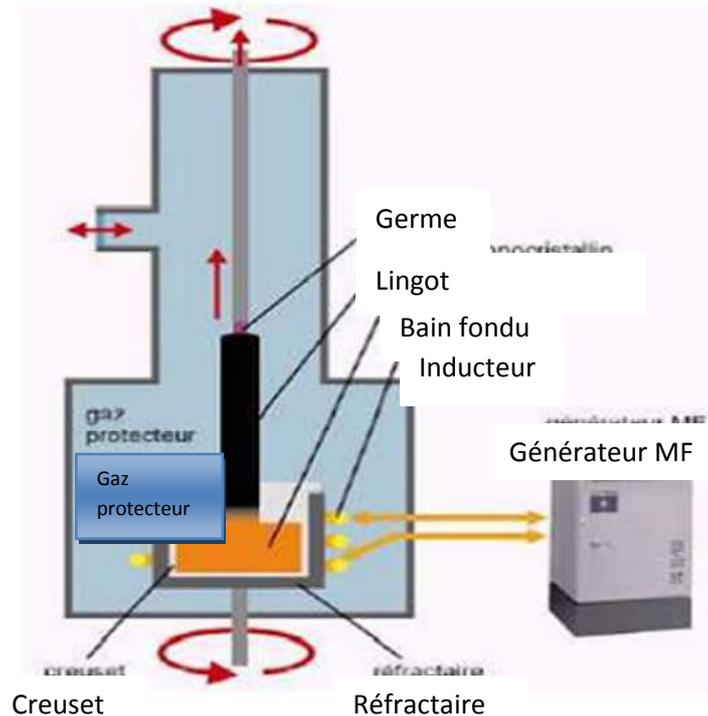


Figure 1.4: Technique de tirage Czochralski[7].

Un germe monocristallin chauffé à une température proche de celle de fusion ($T_{\text{fusion}} = 1414^{\circ}\text{C}$) [8] est positionné à la surface du bain de silicium fondu par capillarité, le liquide de silicium monte de quelques millimètres et reste accroché, créant ainsi une interface triple : solide-liquide-vapeur. Le germe en rotation est alors tiré lentement vers le haut pour permettre la cristallisation du silicium selon l'axe du germe. La vitesse de tirage est continue, elle dépend du diamètre du lingot et varie entre 12 et 13 ms^{-1} [9]. L'interface triple est maintenue à proximité de la surface du bain, de sorte que le liquide extrait se solidifie et cristallise sur le germe. L'ensemble de la croissance est effectué en maintenant le cristal en rotation, de manière à homogénéiser le bain. On obtient alors un lingot de silicium monocristallin (Figure 1.5) de grand diamètre ($> 10\text{cm}$) et d'une longueur considérable ($> 1\text{m}$). La contamination par l'oxygène à cause du creuset en silice, est l'un des points faibles de la méthode Cz.



Figure 1.5: lingots de Si monocristallin [10].

b. Méthode de la zone flottante (FZ) :

Cette méthode a été mise au point par KECK et GOLAY [11], par cette méthode nous pensons obtenir des diamètres jusqu'à 100mm.

Dans la méthode de la zone flottante, il n'y a pas de creuset, ce qui permet de résoudre, en même temps, que les problèmes de contraintes, ceux qui résultent d'une haute réactivité de matériaux ou de contamination par les impuretés contenues dans le creuset. Un barreau polycristallin du matériau semi-conducteur, silicium, disposé verticalement est chauffé localement par induction jusqu'à ce que soit formée une étroite zone fondue.

Celle-ci reste stable entre les deux parties solides du barreau par effet de capillarité. Le déplacement lent de l'enroulement chauffant s'accompagne de celui de la zone flottante, par fusion du silicium poly-cristallin d'un côté, par cristallisation de l'autre. Comme dans les méthodes précédentes, un germe convenablement taille, placé à l'extrémité du barreau permet d'amorcer et d'orienter la croissance du cristal selon la direction cristallographique voulue, suivant le schéma porté sur la (Figure 1.6).

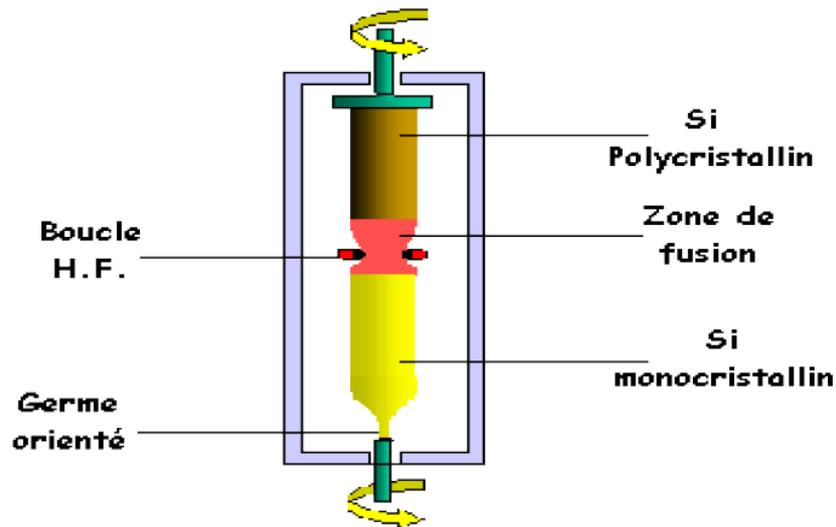


Figure 1.6: méthode de la zone flottante [12]

2. Le silicium multicristallin :

2.1. Caractéristiques :

Le silicium multicristallin est un semi-conducteur représentant une structure de bande d'énergie de type indirect, il est composé de monocristaux qui ont une taille de l'ordre du millimètre et qui sont séparés les uns des autres par des zones perturbées appelées joints de grains. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes de grains d'orientations cristallographiques différentes et contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ceci a pour effet de réduire la durée de vie des porteurs minoritaires, et ils sont à l'origine des courants de fuite dans la cellule solaire.

Les techniques d'élaboration sont moins onéreuses, mais sa qualité est moins bonne, à cause de la présence des joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes. La figure ci-dessous représente une image du silicium multicristallin.



Figure 1.7: image d'un substrat de silicium multicristallin [13].

2.2. Méthode d'élaboration par solidification unidirectionnelle

Le principe d'élaboration est basé sur une méthode de cristallisation orientée dans un creuset fixe soumis à un écoulement de chaleur unidirectionnel (Figure 1.8).

La fusion de la charge de silicium est réalisée dans un creuset en graphite calorifugé sur toute sa surface.

L'ajout d'un agent encapsulant à la charge permet d'éviter la contamination du silicium par le creuset et facilite la récupération du lingot. La température du bain est stabilisée à une température légèrement supérieure à la température de fusion du silicium (1 420 °C)[14]. En maintenant constante la puissance délivrée par le générateur à la valeur déterminée lors de la phase de stabilisation, la cristallisation est obtenue en supprimant une partie du calorifuge de la paroi inférieure du creuset. Ceci permet l'évacuation de la chaleur latente de solidification et conduit à une solidification dirigée.

La phase suivante consiste à récupérer le lingot par retournement du creuset en utilisant les propriétés de l'agent encapsulant. Le lingot est ensuite refroidi dans un réceptacle calorifugé. Cette technique de cristallisation avec creuset fixe simplifie la technologie et favorise la planéité du front de solidification [14].

La méthode de récupération du lingot permet d'une part de réutiliser le creuset et d'autre part de le refroidir à l'extérieur, et de s'affranchir des difficultés liées à la différence des coefficients de dilatation du graphite et du silicium au cours du refroidissement.

L'encapsulation des lingots est aussi utilisée pour éviter la diffusion des impuretés du creuset vers le silicium.

Cette méthode donne un lingot multicristallin avec des grains relativement gros (1 cm^2 de section) qui permettent d'obtenir des cellules avec un bon rendement ($> 16 \%$) [15].

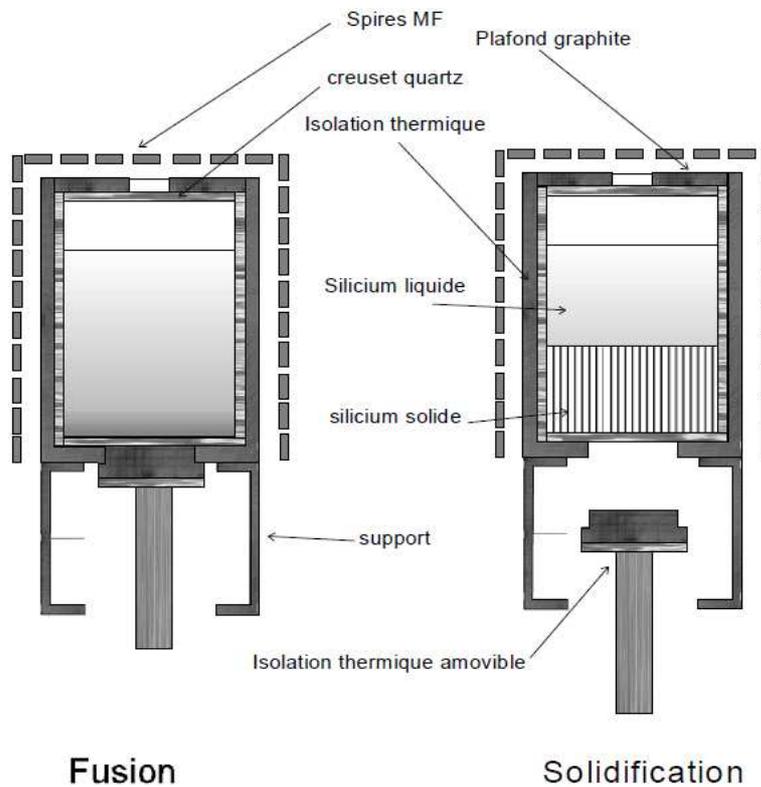


Figure 1.8: Procédé Polix pour la solidification unidirectionnelle du silicium multicristallin [15].

Le procédé Polix, de la société Photowatt (France), est un exemple industriel de la solidification unidirectionnelle appliquée au silicium multicristallin. C'est un procédé moins sophistiqué dans son contrôle et moins coûteux en énergie que les procédés Cz et FZ.

3. Le silicium amorphe en couches minces

3.1. Caractéristiques

Une autre forme structurale du silicium peut exister, le silicium amorphe noté a-Si qui présente de faible variation de longueur et d'angle de liaison qui a pour conséquence d'éliminer l'ordre après quelques distances atomiques (Figure 1.9). A cause de ce désordre, des distorsions apparaissent dans le réseau, induisant une distribution des états électroniques,

ce qui se traduit par l'apparition d'états localisés dans la bande interdite en haut de la bande de valence et en bas de la bande de conduction. Ils forment ce qu'on appelle les queues de bande (Figure 1.10).

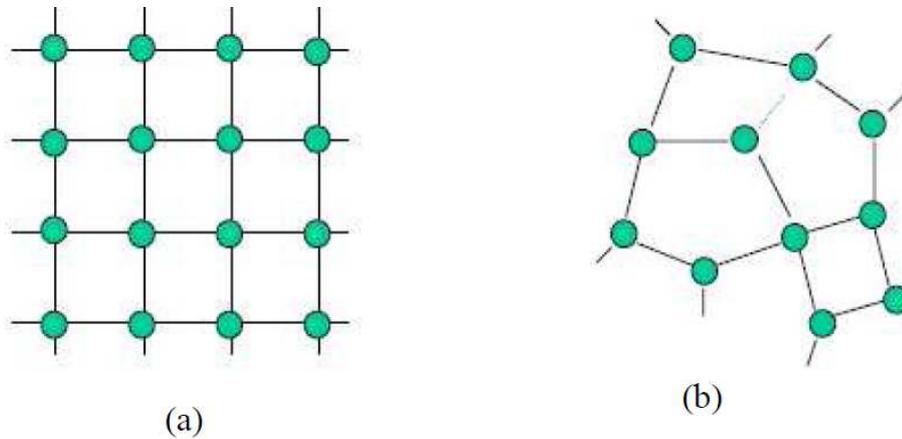


Figure 1.9: Vue schématique de l'arrangement atomique dans la structure: (a) cristalline, (b) amorphe. [16]

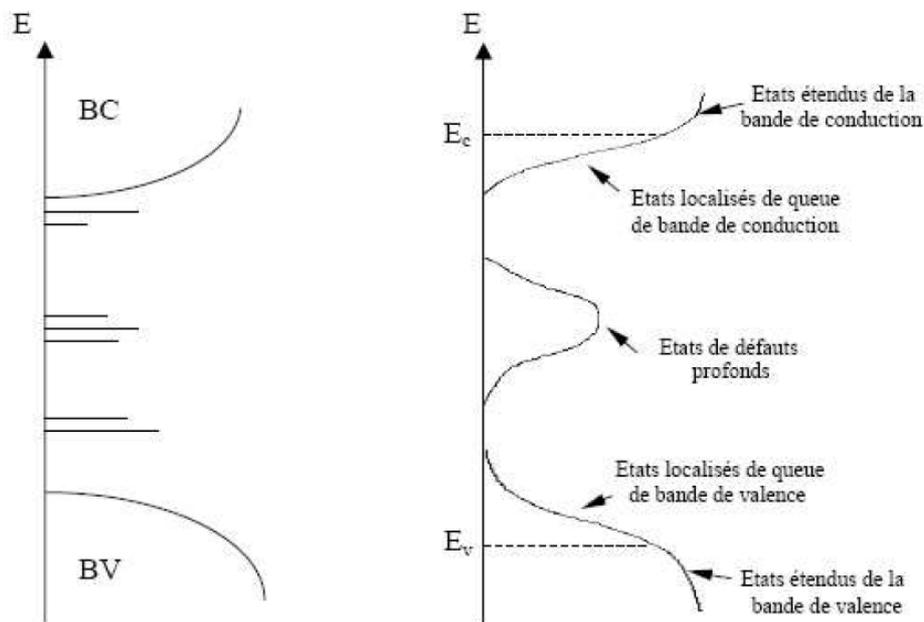


Figure 1.10: Distribution de densité d'états dans la structure cristalline (a), et la structure amorphe (b). [16]

D'autre part, ces distorsions peuvent donner lieu à la formation des liaisons pendantes (Figure 1.11) Ces dernières ont une très grande influence sur les propriétés électroniques du silicium amorphe. Elles sont caractérisées par l'absence d'un électron de l'atome concerné.

Un second électron peut aisément s'y fixer, pour former une paire d'électrons, le centre est alors chargé négativement. Les liaisons pendantes constituent de ce fait des pièges à électrons très efficaces.

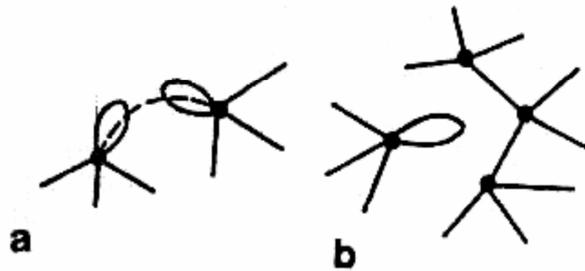


Figure 1.11: Représentation schématique de la structure atomique [17] :

a- une paire de liaisons pendantes.

b- une liaison pendante isolée

a. Silicium amorphe hydrogéné

Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) se caractérise par sa structure aléatoire d'atomes de silicium (Figure 1.12).

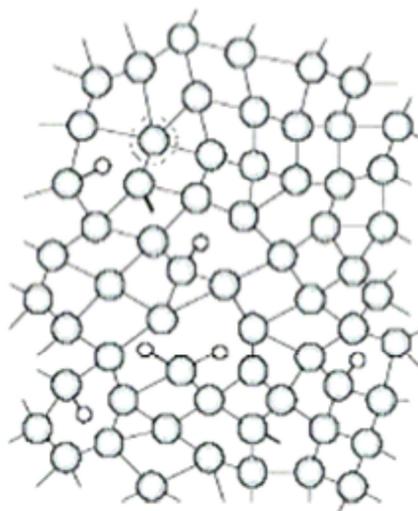


Figure 1.12: Structure du Si amorphe [18]

- **Rôle de l'hydrogène**

L'hydrogène joue le rôle de saturer les liaisons pendantes et rend le silicium amorphe utilisable (Figure 1.14). 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 il est impossible de le doper. En effet, le niveau de Fermi reste inchangé lors du dopage et les atomes dopants sont inactifs. L'hydrogène permet de réduire les liaisons pendantes de 99.99 % [17].

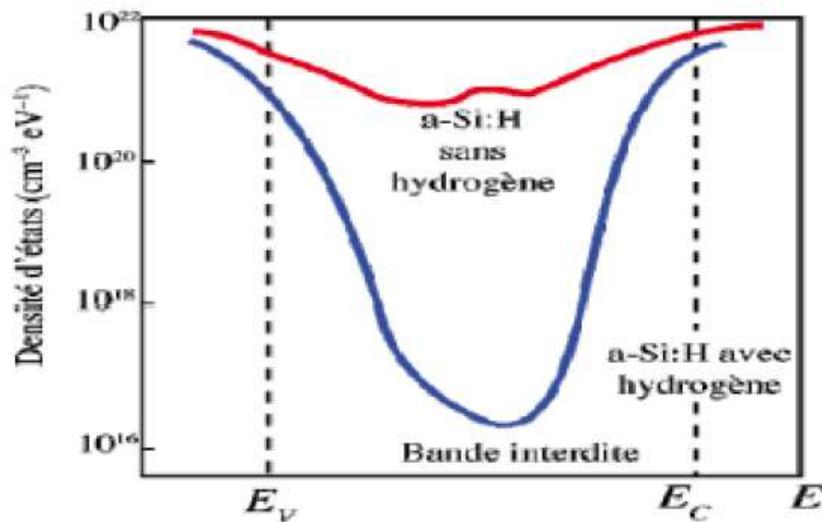


Figure 1.14: Passivation des défauts par l'hydrogène.

De plus, en se liant aux atomes de silicium (liaisons covalentes), il entraîne la disparition d'une partie des états localisés. Ceci se traduit par une diminution de la pente des queues de bande et une augmentation du gap optique. Mais, une incorporation excessive de l'hydrogène peut entraîner la rupture des liaisons faibles et l'introduction de nouvelles liaisons pendantes. Un équilibre donc se met en place. 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 [20] 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. La concentration d'hydrogène dans le silicium amorphe a une influence sur les discontinuités de bande. Elle peut nettement les modifier et celles-ci ont une grande influence sur les caractéristiques de la cellule.

3.2. Les méthodes d'élaboration

Tous les procédés de dépôt des couches minces contiennent quatre parfois cinq étapes successives. La source qui constitue le matériau de base du film mince à élaborer peut être un solide, un liquide, une vapeur ou un gaz. Lorsque le matériau est solide, son transport vers le substrat s'effectue par vaporisation, ce qui peut être réalisé par: évaporation thermique, canon à électron, ablation laser ou par pulvérisation. L'ensemble de ces méthodes est classé sous le nom de dépôt physique en phase vapeur PVD (Physical Vapor Deposition). La source solide est occasionnellement transformée en vapeur. Dans d'autre cas, le matériau de base est sous forme d'un gaz ayant une pression cette vapeur suffisante pour qu'il soit transporté à des températures modérées. Les procédés qui utilisent comme matériau de base les gaz, les liquides évaporés ou les solides évaporés par voie chimique sont connus sous le nom de dépôts chimiques en phase vapeur, CVD (Chemical Vapor Deposition).

a. Implantation ionique

L'implantation ionique (Figure 1.15) est une technique de dopage sélectif de matériau semi-conducteur. Elle consiste à modifier la composition superficielle du matériau en faisant pénétrer des ions possédant une énergie suffisante. Cette énergie est fournie par accélération dans un champ électrique. Les ions possédant une énergie supérieure à quelques centaines d'eV peuvent traverser la surface en provoquant une succession de collisions avec les atomes du matériau.

Sous l'effet de ces collisions, les ions ont une trajectoire aléatoire. Mais à chaque collision, les atomes heurtés peuvent reculer et entrer eux même en collision avec d'autres atomes. Un seul ion d'une centaine de KeV peut rencontrer une bonne centaine d'atomes ou provoquer directement et indirectement la formation de défauts cristallins.

Par ailleurs, si le faisceau ionique est suffisamment intense, des atomes superficiels seront éjectés, c'est le phénomène de pulvérisation. Au cours de la pulvérisation du matériau en surface, diverses émissions ont lieu.

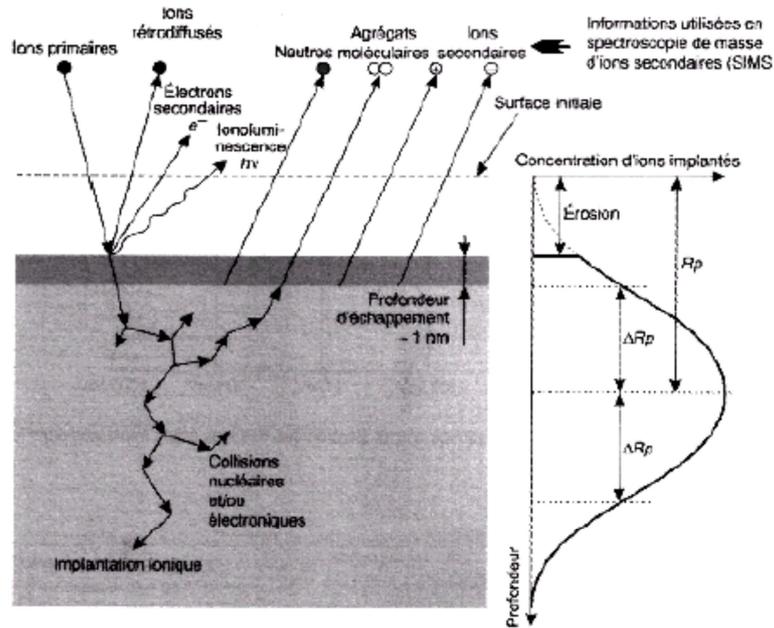


Figure 1.15: Phénomènes de surface dû à l'implantation ionique [16].

b. Pulvérisation cathodique

Le principe technique de cette technologie réside dans la création d'une décharge luminescente entre deux électrodes. Cette décharge, réalisée au sein d'une atmosphère raréfiée donc sous vide 10^{-3} Torr [16], permet la création d'un plasma composé de particules chargées (électrons, ions, photons) et de neutres (atomes).

Le champ électrique engendré par la différence de potentiel, de 3 à 5 KV [16] provoquent un mouvement des particules chargées positivement (l'ionisation) du gaz d'Argon qui sont attirées par la cathode (cible) et entrent en collision avec elle. Ce bombardement provoque la pulvérisation d'atomes ou d'agrégats d'atomes de la cible qui vont se condenser sur le substrat (Figure 1.16).

Afin d'avoir une efficacité au niveau du taux de pulvérisation, le gaz plasmagène communément utilisé pour cette technologie est l'argon. Sa masse atomique, sa neutralité (couche de valence complète), ainsi que son coût en font le candidat idéal.

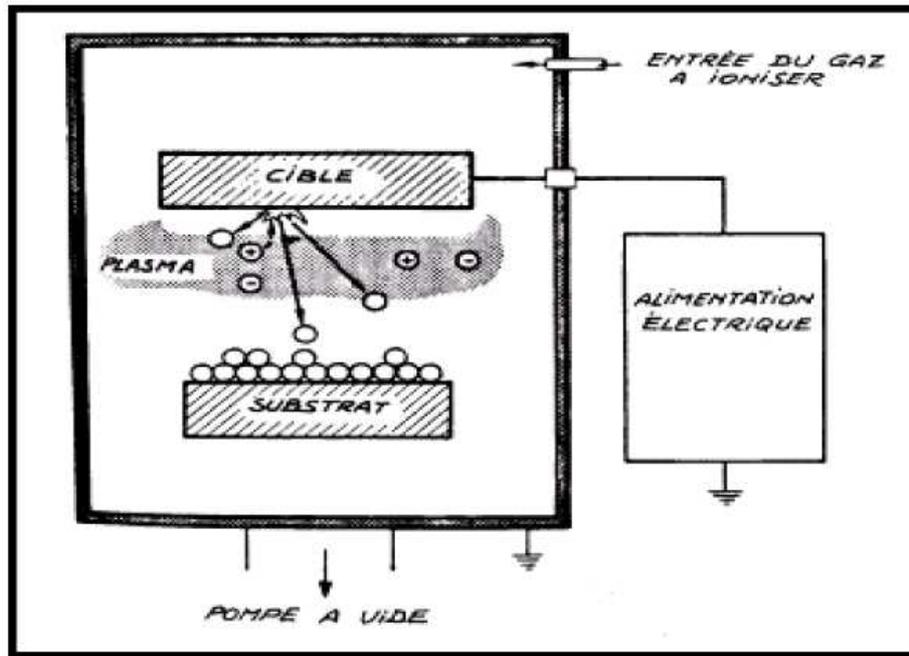


Figure 1.16: Pulvérisation cathodique [21].

Les étapes principales sont

- Collision des ions incidents sur la cible qui aboutit à un transfert d'énergie cinétique et de quantité de mouvements.
- Emission d'atomes ou d'agrégats avec une énergie cinétique donnée qui se déposent sur le substrat et font croître un film mince de matériau cible.

Cette technologie couramment utilisée pour le milieu des couches minces pour le semiconducteur voit son nombre d'applications augmenter. En effet, étant une technologie propre, elle est une solution alternative réaliste et concrète aux traitements par voie humide.

c. L'évaporation sous vide

Dans cette méthode, les films sont déposés après évaporation du silicium par un canon à électrons. L'évaporation sous vide peut produire des films jusqu'à 20 μm d'épaisseur. Cette méthode exige certaines conditions telles que : L'ultravide, un taux assez lent d'évaporation. Cependant, les films produits par évaporation dans un vide contiennent quelque atome d'oxygène ce qui tend à stabiliser les films contre la cristallisation sous chauffage [22].

d. Les techniques basées sur la décomposition chimique en phase vapeur (C.V.D)

Les techniques d'élaboration des couches minces ont connu lors de ces dernières décennies un développement considérable. Le matériau qui a fait un immense succès pour la réalisation des couches minces est le silicium. Il possède des propriétés électriques et des structures mécaniques très convenables. Les dépôts chimiques en phase vapeur ou CVD (Chemical Vapor Deposition) sont des méthodes qui permettent de former des couches minces solides non volatiles sur un substrat, par des réactions chimiques avec des gaz (Figure 1.17).

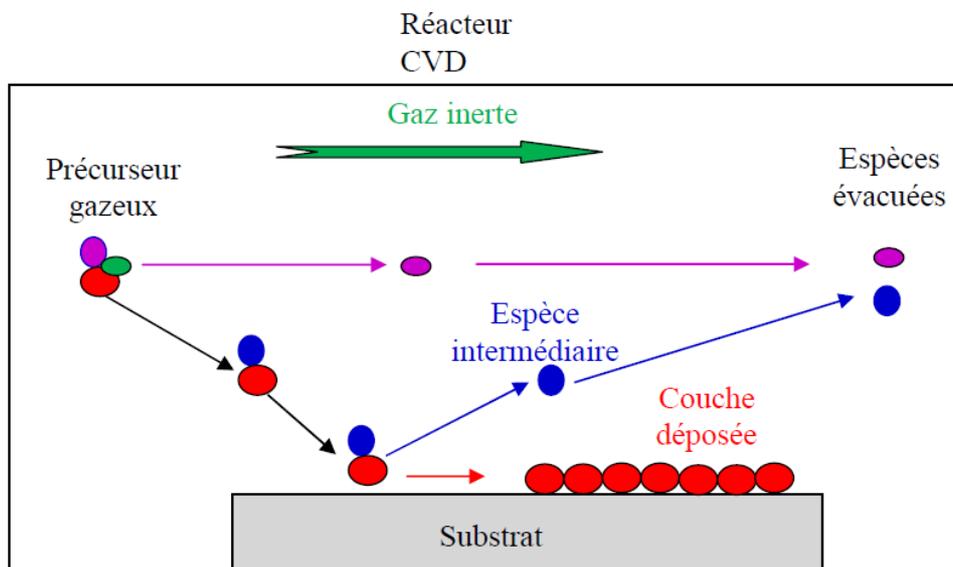


Figure 1.17: Phénomènes physico-chimiques se produisant dans un réacteur CVD [23].

Le principe général du dépôt chimique à partir d'une phase gazeuse CVD est de recouvrir un substrat par un revêtement solide que l'on fait croître à partir de réactifs gazeux. Il existe un intervalle de températures très étroit autour de 600°C, où la vitesse de dépôt du silicium amorphe est approximativement 1µm/heure, le dépôt obtenu est alors amorphe [24].

Le dépôt chimique en phase vapeur permet de produire des films minces dont les propriétés sont contrôlées. Le processus de dépôt est imité par des réactions chimiques qui peuvent être :

-Activées thermiquement (LPCVD, APCVD);

-Assistées par un plasma (PCVD, PECVD).

La décomposition thermique présente une faible concentration d'hydrogène, par contre pour celle assistée par un plasma, la concentration d'hydrogène est comprise entre 5 à 30 % [23].

- **Le dépôt chimique en phase vapeur assistés par plasma PECVD**

Le principe de la PECVD consiste en une dissociation par impact d'électrons d'un gaz (dans notre cas du silane dilué dans de l'hydrogène) dans un plasma créé et entretenu entre deux électrodes (Figure 1.18). Le plasma est un mélange de plusieurs espèces chimiques (ions, électrons, espèces neutres ou radicaux) qui peuvent réagir entre elles au sein de celui-ci. Ces espèces subissent une seconde réaction en atteignant la surface du substrat qui est tenu par l'anode (électrode reliée à la masse). La composition du plasma et les réactions qui ont lieu en son sein, à la surface du substrat et dans le volume du film en croissance déterminent la structure du matériau. Ainsi, on obtient du silicium amorphe, polymorphe, microcristallin,...etc. selon la manière dont ces réactions sont contrôlées.

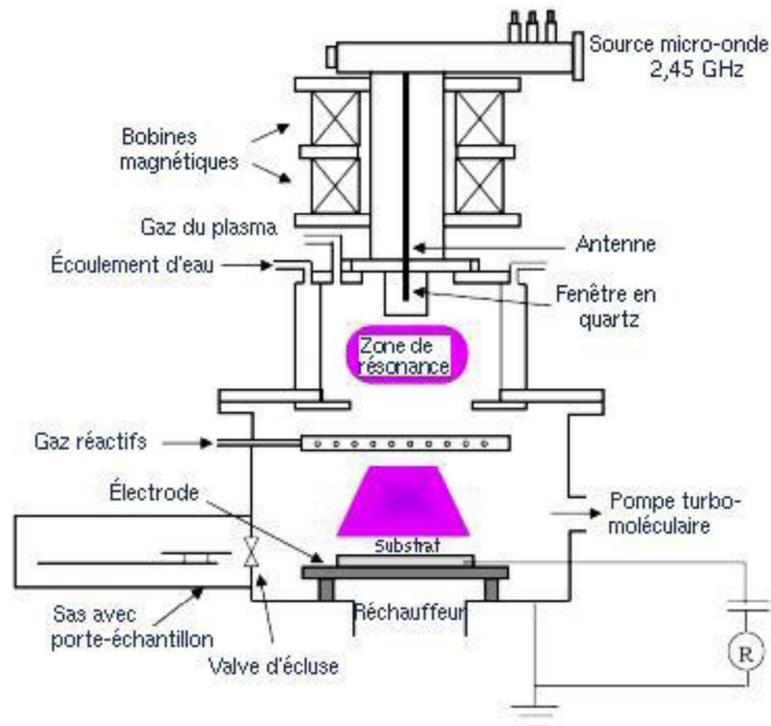


Figure 1.18: Schéma descriptif du réacteur PECVD [25].

e. Le dépôt chimique en phase vapeur à pression atmosphérique (APCVD)

Cette technique (Figure 1.19) a été utilisée à l'origine pour des dépôts CVD de semi-conducteurs, surtout à des températures très élevées autour de 1000 °C. Plus que pour le dépôt du silicium polycristallin ou amorphe, cette méthode était employée pour la croissance épitaxiale des couches de silicium, ce qui est possible même à des températures autour de 600 °C en utilisant du SiH_4Cl_2 et des systèmes de purification de gaz [26,27].

Dans ce cas les vitesses de croissance ne sont plus très grandes (1 nm/ min). Les taux de transfert des espèces gazeuses et celle de la réaction de surface sont voisins.

Dans le domaine de fabrication des couches amorphes à environ 600 °C, les vitesses atteignent environ 5-10 Å/ sec [28]. Dans l'industrie, l'APCVD a été largement remplacée par les dépôts à basse pression, car, dans ce cas, les espèces réactives diffusent plus rapidement, l'uniformité des dépôts s'en trouve améliorée [29].

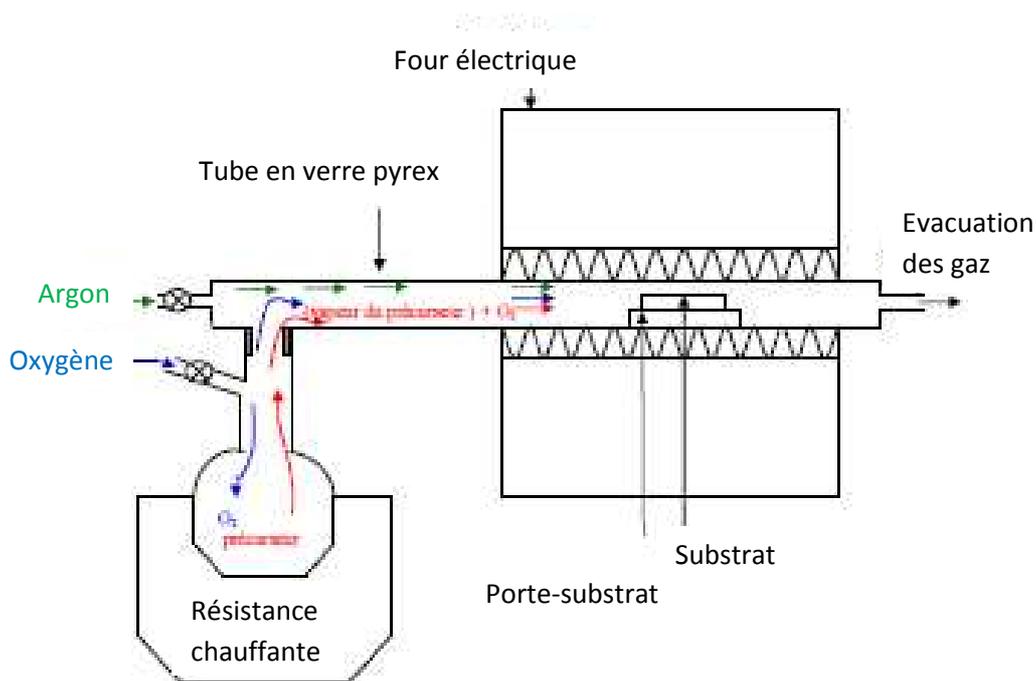


Figure 1.19 : Dispositif expérimental de la technique APCVD [23].

f. Le dépôt chimique en phase vapeur à basse pression (LPCVD)

Le dépôt chimique en phase vapeur à basse pression dit LPCVD est aujourd'hui la méthode la plus répandue dans l'industrie microélectronique et s'effectue dans un réacteur

tubulaire horizontal à paroi chaude (Figure 1.20). Dans cette technique, les molécules du gaz réactif sont décomposées à basse pression (2 mbar) par voie thermique.

En fonction des conditions de pression et de température, des réactions de dissociation ou de formation des molécules se produisent de façon homogène ou hétérogène.

A basse pression, le taux de transfert des espèces gazeuses vers le substrat et des produits de réaction à partir du substrat devient très élevé et la réaction n'est limitée alors que pour la vitesse de réaction de surface. Les vitesses de dépôts se situent autour de 50-100 Å/ min [16].

Cette technique traite un grand nombre de plaquettes lors d'un même cycle de dépôt en obtenant des couches de bonne qualité et d'épaisseur uniforme sur toutes les plaquettes avec une réduction de température et une faible consommation de gaz. Mais, son inconvénient majeur est la limitation de température car certains réacteurs chimiques ont besoin de très hautes températures qui dépassent la température que le substrat doit supporter, ce qui peut entraîner la détérioration de ce dernier ou la modification des propriétés physiques du matériau.

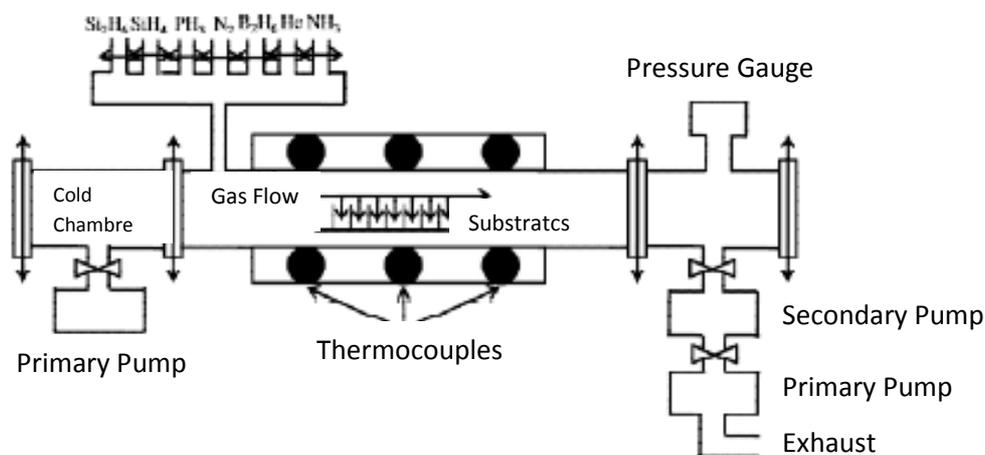


Figure 1.20: Le procédé LPCVD [30].

4. Etudes comparatives entre les trois catégories de silicium

Dans le silicium monocristallin, le cristal est homogène, d'un seul tenant et sans joints de grain. C'est ce qui lui donne une couleur unie gris-noir métallique assez caractéristique.

Au contraire le multicristallin est composé d'un très grand nombre de petits cristaux de silicium. Il se différencie nettement d'aspect du silicium monocristallin : il est constitué d'une multitude de paillettes d'aspect métallique.

Les propriétés de la matière cristalline dépendent des motifs du cristal (atome, assemblages d'ions, oxyde, molécules), de leur organisation (nature du réseau cristallin), et des défauts. Parmi ces défauts, la présence de joints de grains. Un monocristal a donc des propriétés qui peuvent être notablement différentes du multicristallin :

- De manière générale, un monocristallin a des propriétés anisotropes, alors qu'un multicristallin peut être plus ou moins isotrope ;
- Les monocristaux sont souvent utilisés pour étudier les propriétés de la matière en faisant abstraction des joints de grain, ou bien pour voir l'influence de l'orientation cristalline ; les monocristaux sont donc en ce sens un modèle simplifié de la matière multicristallin;
- Propriétés optiques : un monocristal, si ses faces sont lisses et s'il est transparent, va donner de la réflexion spéculaire et de la réfraction parfaite (donc pas diffuses), et l'on pourra constater dans certains cas des phénomènes de biréfringence ; les propriétés optiques sont recherchées pour l'esthétique, mais aussi pour certaines applications technologiques ;
- Diffusion chimique : les joints de grain constituent des court-circuits de diffusion, la diffusion dans un multicristal est donc plus rapide que dans un monocristal ;
- Mécanique : certains modes de fluage font intervenir les joints de grains, les monocristaux résistent en général mieux aux hautes températures ; par exemple, certaines aubes de turbine de moteurs d'avion sont des monocristaux ; la déformation plastique se fait par des glissement de plans cristallographiques denses selon des directions denses, définissant des systèmes de glissement ; la capacité à se déformer plastiquement dépend donc de l'orientation du monocristal par rapport à la sollicitation ; par ailleurs, les joints de grains gênent le déplacement des dislocations, et donc les polycristaux ont souvent une limite d'élasticité supérieure aux monocristaux selon l'orientation de ces derniers [31];
- Electronique : la microélectronique utilise des propriétés des semi-conducteurs telles que la création de paires électron-trou. La diffusion de ces porteurs et leur

recombinaison sont influencés de manière importante par les joints de grains, on s'attache donc à avoir des composants monocristallins.

- Le silicium amorphe est distingué du silicium cristallin par des avantages telles que :
 - Possibilité de le déposer sur des grandes surfaces;
 - Possibilité de le déposer sur des surfaces non planes ou souples ; intéressant pour la déposition sur cylindres ou sphères (axes de symétrie) ;
 - Facilité de fabrication;
 - Forte absorption de la lumière visible;
 - Peu de dégradation par les rayons X;
 - Bande interdite plus élevée (1,75 eV) qui permet d'obtenir des courants inverses dans l'obscurité plus faible.

Le silicium amorphe a aussi quelques inconvénients :

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

5. Le silicium et le photovoltaïque

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques (Figure 1.21).

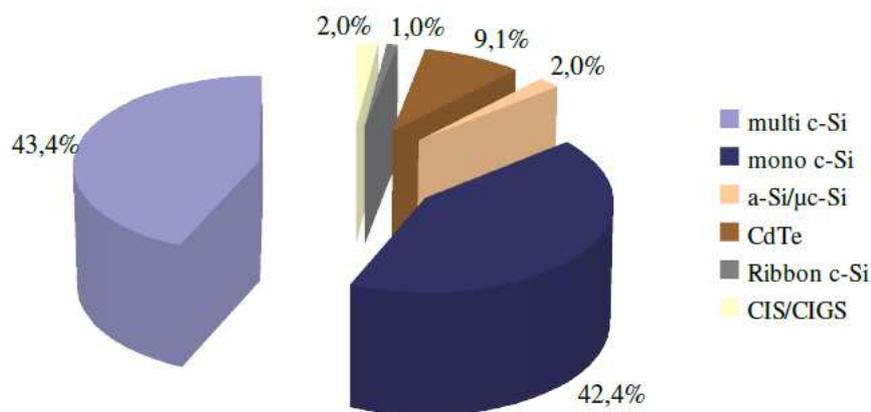


Figure 1.21: Part des différentes technologies dans le marché photovoltaïque en 2010 [32].

- **Les cellules photovoltaïques au silicium monocristallin**

Les cellules monocristallines proviennent d'un seul et même bloc cristal de silicium. Pour obtenir des cellules photovoltaïques, ce cristal est découpé en tranches très fines. L'aspect de ces cellules est uniforme et de couleur foncée.

- **Avantages** : avec cette technologie, la production des panneaux solaires est optimale. Les cellules monocristallines offrent le meilleur rendement (jusqu'à 20 %). Les panneaux issus de cette technologie ont une bonne durée de vie (jusqu'à 30 ans).
- **Inconvénients** : le coût de production est élevé et les panneaux sont donc chers à la vente. On constate qu'avec cette technologie, le rendement diminue par mauvais temps.

- **Les cellules photovoltaïques au silicium polycristallin**

Lorsque le silicium fondu est refroidi, on observe la formation de cristaux, de tailles et de formes différentes. Les cellules photovoltaïques issues de cette technologie ne sont alors pas uniformes et sont de couleur bleu foncée.

- **Avantages** : le coût de production est moins élevé que pour les cellules monocristallines. Les panneaux ont également une bonne durée de vie (jusqu'à 30 ans). Aussi, ces panneaux solaires sont dotés d'une bonne flexibilité d'irradiation qui donne un rendement correct, même par temps nuageux.
- **Inconvénients** : les cellules offrent un rendement inférieur à la technologie monocristalline (de 11 à 15 %).

- **Les cellules photovoltaïques au silicium amorphe**

Les cellules photovoltaïques amorphes sont fabriquées avec un gaz de silicium. Ce gaz peut être projeté ensuite sur différents supports comme des plaques de verre, du plastique souple ou encore du métal, via un procédé de vaporisation sous vide. Les cellules sont de couleur gris foncé.

- **Avantages** : il s'agit d'un type de cellule bon marché, que l'on retrouve dans la plupart des objets du quotidien fonctionnant à l'énergie solaire (calculatrice et montre

solaire par exemple). Cette technologie est pratique car utilisable sur de nombreux supports et elle ne requiert pas beaucoup d'ensoleillement.

- **Inconvénients:** le rendement est faible (7 à 8 %) et la durée de vie des panneaux est limitée à une dizaine d'année.

Conclusion

Pour l'industrie photovoltaïque, le silicium présente l'intérêt d'un semi-conducteur élémentaire, il possède un grand gap, une meilleure tenue en température, et il est facilement exploitable.

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques du silicium monocristallin, silicium multicristallin, et le silicium amorphe. Nous avons décrit les procédés de fabrication de chaque type de silicium. Nous avons présenté également une étude comparative entre les trois filières de silicium en précisant leurs avantages et inconvénients.

CHAPITRE 2

Etat de l'art sur les cellules solaires

Introduction

Découvert en 1839, par le physicien Français Antoine Becquerel, l'effet photoélectrique, communément appelé l'effet photovoltaïque correspond à l'apparition d'une tension aux bornes d'un matériau semi-conducteur exposé à la lumière. Smith et Adams ont respectivement confirmé en 1873 et 1876, la photoconductivité en travaillant sur du Sélénium [33]. Cela conduisit aux premiers testes des cellules photovoltaïques. en 1954, les premières cellules inorganiques, à base du silicium cristallin, fabriquées dans les laboratoires de la compagnie Bell par Chapin et al, permettaient déjà l'obtention des rendements de conversion proches de 6 % [34].

Le principe des convertisseurs photovoltaïques consiste à transformer l'énergie solaire en une énergie électrique. Nous aborderons dans ce chapitre quelques notions de base sur la cellule solaire : structure et fonctionnement. Ensuite, nous décrivons les différentes technologies solaires.

1. Structure d'une cellule solaire

1.1. Définition d'une cellule solaire

Une cellule solaire est un dispositif électronique capable de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Elle peut être conçue à base d'une homojonction ou d'une hétérojonction (Figure 2.1).

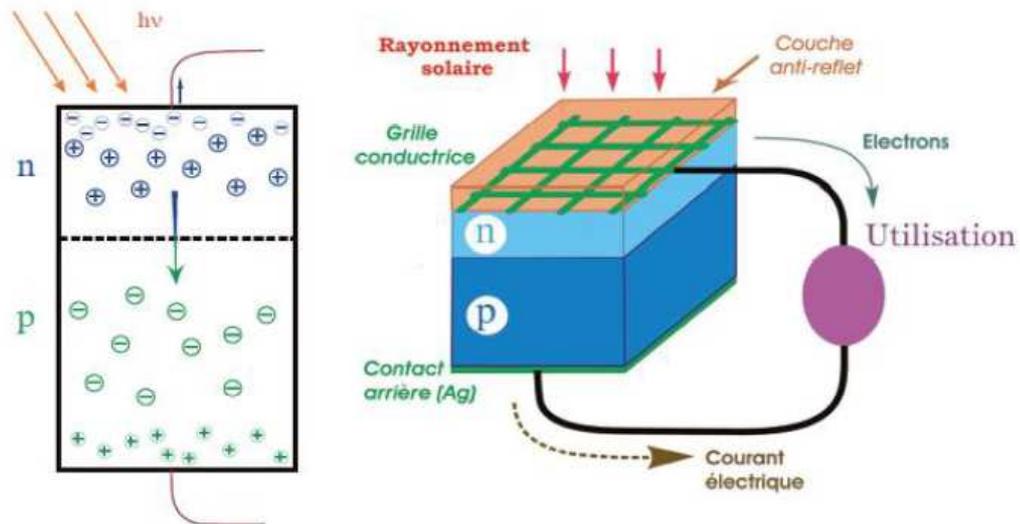


Figure 2.1: Jonction PN éclairée, cellule photovoltaïque [35].

1.2. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque

Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentes dans chaque composant. La structure d'une cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces est présentée sur la Figure 2.2 suivante :

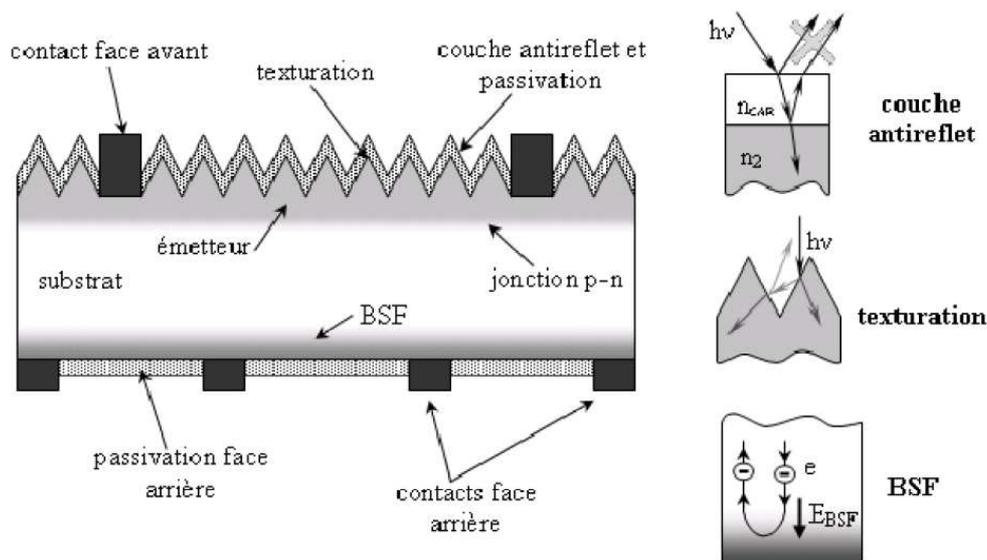


Figure 2.2: Composition d'une cellule photovoltaïque [36].

a. Couches de passivation des faces avant et arrière

La surface des semiconducteurs contient une densité importante de défauts (liaison pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer la qualité électronique de la surface et volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Plusieurs couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitrure de silicium ($\text{SiN}_x : \text{H}$) [37].

b. Couche antireflet

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. L'épaisseur de la couche antireflet est égale à [38]:

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

Avec

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

λ : longueur d'onde

n : indice de réfraction.

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semiconducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques). Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque : TiO_2 , SiO_2 , ZnS , $\text{SiN}_x \dots$ etc [38].

c. Texturation de la surface

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique. Le relief de la surface entraîne une baisse de la réflexion en face avant: un rayon arrivant à incidence normale (par rapport au plan de la cellule) sur une pyramide sera réfléchi sur la face d'une pyramide adjacente.

d. Contacts face avant et arrière

Les contacts métalliques à émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photogénérés. Les contacts doivent être ohmiques, c.à.d. que la caractéristique $I(V)$ du contact doit être linéaire. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement.

e. 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).

1.3. Structure des cellules solaires industrielles

Le rendement des cellules PV industrielles est compris entre 15 et 17% pour les cellules conventionnelles en silicium monocristallin et 14 % environ pour les cellules en silicium multicristallin. La différence de rendement entre les cellules PV industrielles et la cellule PERL (élaborée en laboratoire et qui détient le record de rendement) peut être expliquée par l'existence de deux facteurs : le rendement et le prix. En effet, certains matériaux et techniques (lithographie, silicium FZ, double couche antireflet, émetteur sélectif) utilisés pour la cellule PV ne peuvent pas être adaptés pour l'industrie car ils sont trop chers.

La plupart des cellules photovoltaïques en silicium massif industrialisées ont la structure présentée sur la figure 2.3 si dessous. La structure de la cellule PV industrielle est simplifiée afin de réduire son coût. Par exemple, la texturation de la face avant est réalisée sous forme de «pyramides aléatoires» ou texturation acide et on dépose ensuite une simple couche anti-réfléchissante en SiN. De même, le champ électrique face arrière est obtenu par recuit d'une couche en Aluminium déposée par sérigraphie.

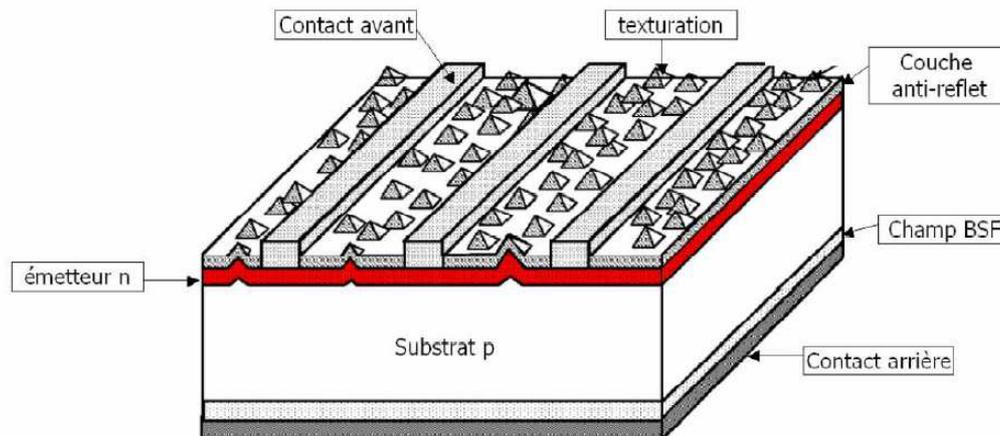


Figure 2.3: Structure d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium cristallin [39].

D'énormes progrès ont été réalisés ces dernières années pour améliorer la passivation du matériau et des surfaces, le piégeage de la lumière, la diminution de la résistance série et du coût de la cellule.

Pour les cellules photovoltaïques en silicium multicristallin, de nombreuses études ont été menées afin de développer une attaque chimique acide du substrat qui soit isotrope (ce qui n'est pas le cas des solutions alcalines) et qui ne détériore pas la tenue mécanique des plaques de silicium. 4% d'augmentation du courant de court-circuit ont pu être obtenus sur du silicium multicristallin grâce à ce procédé [40].

Afin de diminuer la résistance série et d'augmenter le courant de court-circuit, une approche très intéressante est celle de l'émetteur sélectif. Elle consiste à sur doper la zone sous les contacts (afin d'assurer l'ohmicité) et à diminuer le dopage de la jonction entre les contacts (pour améliorer le courant de court-circuit). Différents procédés permettent d'obtenir une telle structure : la structure avec contacts enterrés déjà industrialisée, ou une double sérigraphie (une pour la zone sur dopée de l'émetteur, une pour la métallisation) avec l'alignement de la sérigraphie des contacts sur celle de la zone déjà dopée [40].

2. Principe de fonctionnement de la cellule solaire

2.1. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est le phénomène physique permettant la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique. Il consiste en l'apparition d'une force électromotrice aux bornes d'un dispositif, appelé cellule solaire, soumis à un éclairage.

L'effet photovoltaïque génère des paires (électron/trou) dans un semi-conducteur soumis à un éclairage, et la séparation de ces porteurs photogénérés par le biais du champ interne de la jonction, ce dernier est entraîné par la barrière de potentiel qui provient soit :

- D'une homojonction PN.
- D'un contact métal-semiconducteur : structure MS ou diode Schottky, structure M.I.S.
- D'une jonction entre deux semiconducteurs différents : hétérojonction.

2.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants:

- **absorption des photons** (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif;
- **conversion de l'énergie du photon en énergie électrique**, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur;
- **collecte des particules générées** dans le dispositif.

La conversion de l'énergie est le résultat de l'absorption des photons donnant lieu à la création de paires électron-trou. Un champ électrique permanent au sein du matériau assure une séparation rapide de ces porteurs pour éviter des phénomènes de recombinaison. Ce champ peut être généré de plusieurs manières: par la jonction de deux semi-conducteurs de nature et de type différents (hétérojonctions), par la barrière de potentiel entre un métal et un semi-conducteur (diodes Schottky), ou encore à l'interface de zones d'un même semiconducteur dont les concentrations en électrons libres sont différentes (homojonctions ou jonction p-n).

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela, on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les diodes Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure 2.4 suivante :

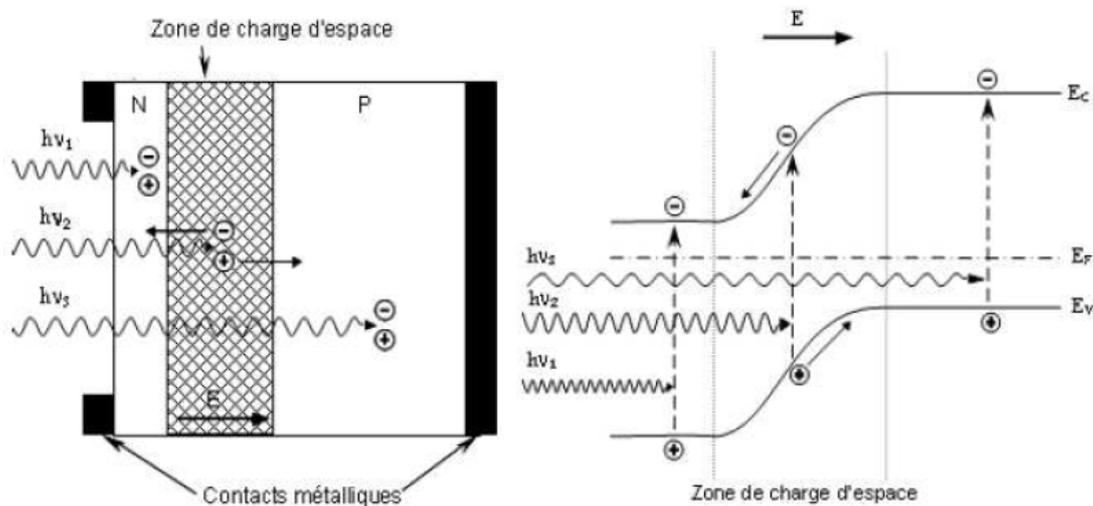


Figure 2.4: Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque [40].

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace.

Les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région:

- dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photocourant de diffusion.
- dans la zone de charge d'espace, les paires électrons / trous créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique: les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

3. Paramètres électriques d'une cellule solaire

3.1. Schéma électrique équivalent de la cellule solaire

Le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle (Figure 2.5) comprend le générateur d'énergie, dont le courant I_{ph} est proportionnel à l'éclairement. Le courant I est défini par la relation :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2)$$

Qui s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{q (V + I \cdot R_s)}{nkT} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (3)$$

Où

I_{ph} : Courant photo-généré 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.

Les valeurs de R_s résistance série et R_{sh} de shunt (résistance des électrodes de la cellule) doivent être très faibles pour la première et élevées pour la seconde.

Les valeurs typiques sont [41] :

$$R_s = 0,5 \text{ à } 2 \Omega.\text{cm}$$

$$R_{sh} = 2.10^3 \text{ à } 2.10^4 \Omega.\text{cm}$$

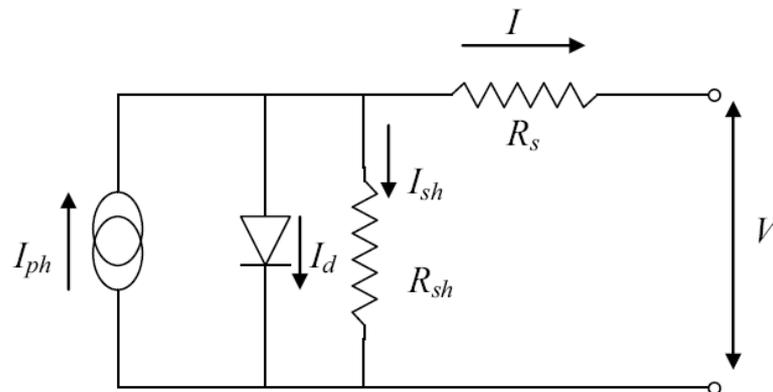


Figure 2.5: Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire [42]

3.2. Caractéristique courant/tension et les paramètres électriques d'une cellule solaire

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique courant-tension $I(V)$ dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïques à jonction PN (Figure 2.6).

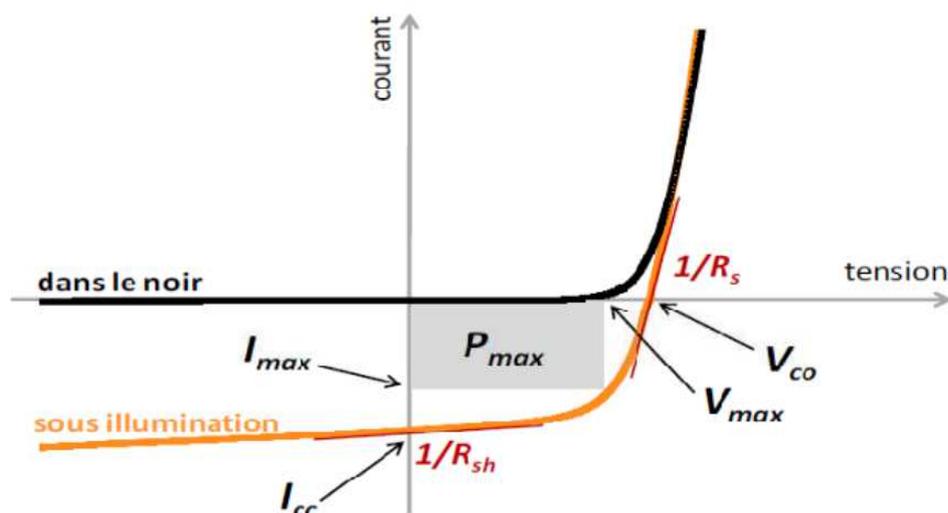


Figure 2.6: Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque [43].

Le tracé de cette courbe (Figure 2.6) permet d'accéder à bon nombre de paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque qui sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) du composant et le rendement de conversion (η).

- **Le courant de court-circuit I_{cc}**

Le courant de court-circuit I_{cc} (pour $V=0$) de la cellule photovoltaïque constitue le maximum de courant qui peut être obtenu d'une cellule solaire.

Pour un niveau d'éclairement standard (égale à 1kW/m^2), lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, l'effet de la résistance série est négligeable.

Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être considéré comme étant équivalent au photo-courant I_{ph} , c'est-à-dire proportionnel à l'éclairement :

$$I_{cc}=I_{ph} \quad (4)$$

- **La tension en circuit ouvert V_{co}**

La tension de circuit ouvert (V_{co}) est la tension pour laquelle le courant aux bornes de la cellule est nul ($I=0$). Elle constitue la tension maximale qui peut être obtenue d'une cellule, elle se situe autour de 0.6 V pour le cas d'une cellule au silicium. Elle est exprimée analytiquement selon la formule suivante [44] :

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \text{Ln} \left[\left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) + 1 \right] \quad (5)$$

- **Puissance maximale P_m**

La partie intéressante dans la caractéristique $I(V)$ d'une cellule est celle qui génère de l'énergie. La puissance de sortie de la cellule (ou du générateur) est le produit du courant de sortie délivré par cette dernière et la tension à ses bornes.

La valeur de la puissance au point de court-circuit est nulle étant donné que la tension est nulle. La puissance au point de circuit ouvert est nulle également étant donné que le courant est nul. La puissance entre ces deux points est positive et le Point de Puissance Maximum (PPM) de coordonnées obtenues pour $V = V_m$ et $I=I_m$ tel que [23, 17]

$$P_m = V_m \times I_m \quad (6)$$

- **Facteur de forme FF**

Il s'agit d'un rapport qui rend compte de la qualité de la forme de la caractéristique courant/tension. Il est défini par la relation suivante [23,17] :

$$FF = \frac{p_m}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (7)$$

Le facteur de forme théorique est compris entre 0,25 et 1. Dans le cas d'une cellule idéale, il ne peut dépasser 0,89, puisque les équations courant/tension sont régies par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle : $e^{qV/kT}$. Il ne pourra donc pas exister de courbe courant/tension rectangulaire. Ce paramètre dépend de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction p-n et du matériau, de la résistivité des contacts métalliques, ...etc

- **Rendement de conversion η**

Il définit le rapport entre la puissance électrique optimale obtenue aux bornes de la cellule et la puissance du rayonnement incident. Il est donné en fonction des grandeurs mesurables.

Le rendement s'écrit alors [44] :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{co} \times I_{cc}}{P_{in}} \cdot FF \quad (8)$$

Où :

FF: Facteur de forme.

P_{inc} : Puissance incidente avec $P_{inc} = ExS$.

Avec :

S : Est la surface du module.

E : L'éclairement en W/m^2 .

Ce rendement est souvent mesuré dans les conditions de référence, c'est-à-dire sous l'ensoleillement de 1000W/m^2 , à la température de 25°C et sous un spectre AM1.5. Ces conditions normalisées sont dites « STC » Standard Test Conditions.

La puissance maximale P_m d'un panneau dans ces conditions STC est la puissance crête P_c exprimée en Watts-crête (Wc) [44].

3.3. Paramètres influençant le comportement électrique d'une cellule solaire

Cinq paramètres influent sur le comportement électrique d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque. Ces paramètres sont :

- la résistance série R_s
- la résistance shunt R_{sh}
- le courant de saturation I_s
- Le flux d'éclairement
- la température T

Pour un flux égal à 1000 W/m^2 , ces paramètres peuvent être considérés comme indépendants, excepté le courant de saturation I_s qui dépend de la température T de la cellule.

a. Les paramètres internes

- **Influence de la résistance série R_s**

La résistance série modélise les pertes résistives dans la cellule (émetteur, base, contacts métalliques). D'une valeur généralement très faible, la résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la cellule se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension de circuit ouvert. Lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court-circuit. Sa valeur est fonction des résistances de contacts métalliques et de la résistance de la grille collectrice.

- **Influence de la résistance shunt R_{sh}**

La résistance shunt correspond à la présence de courants de fuite dans la cellule (sur les bords de la cellule ou à travers l'émetteur). La résistance shunt est en général très élevée.

Si elle diminue on remarque une légère pente au voisinage du point de courant de court-circuit sur la caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque.

Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la cellule ; en effet, une cellule photovoltaïque dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous un faible éclairement.

b. Les paramètres externes

• Influence de la température

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique I(V). La tension en circuit ouvert diminue avec l'augmentation de la température (Figure 2.7). Par contre une élévation de la température (de jonction) des cellules solaires provoque un important accroissement de leur courant à l'obscurité, mais facilite plus la création de paires électron-trou. Il y a une légère augmentation du courant I_{cc} accompagnée d'une forte diminution de la tension V_{co} en raison d'une augmentation du courant direct de la diode.

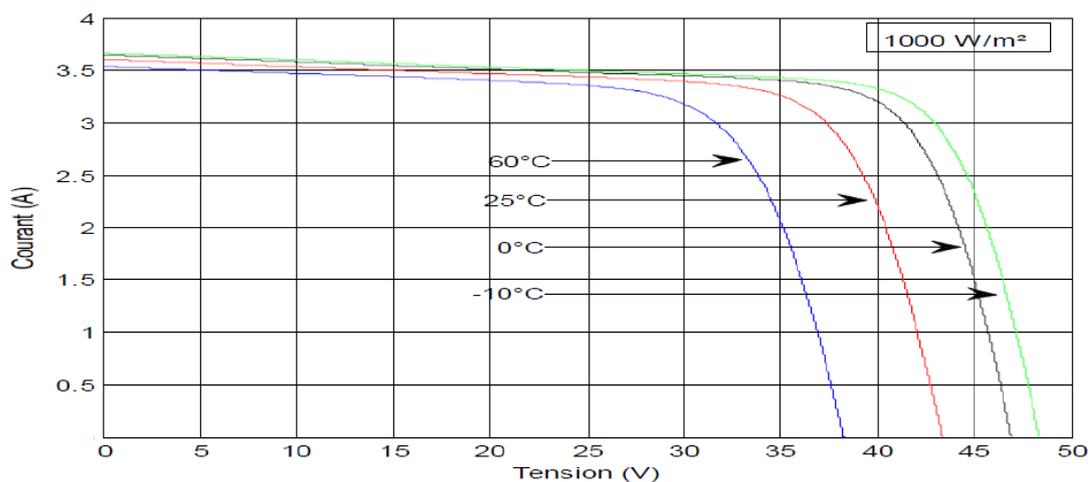


Figure 2.7: Influence de la température sur la caractéristique courant/tension d'une cellule photovoltaïque [41].

• Influence de l'éclairement

Nous avons vu que le courant produit par la photopile I_{ph} est pratiquement proportionnel au flux lumineux. Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant à l'obscurité inchangée. Le courant du générateur étant égal à la soustraction du photo-courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire I_{cc} proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension V_{co} (Figure 2.8).

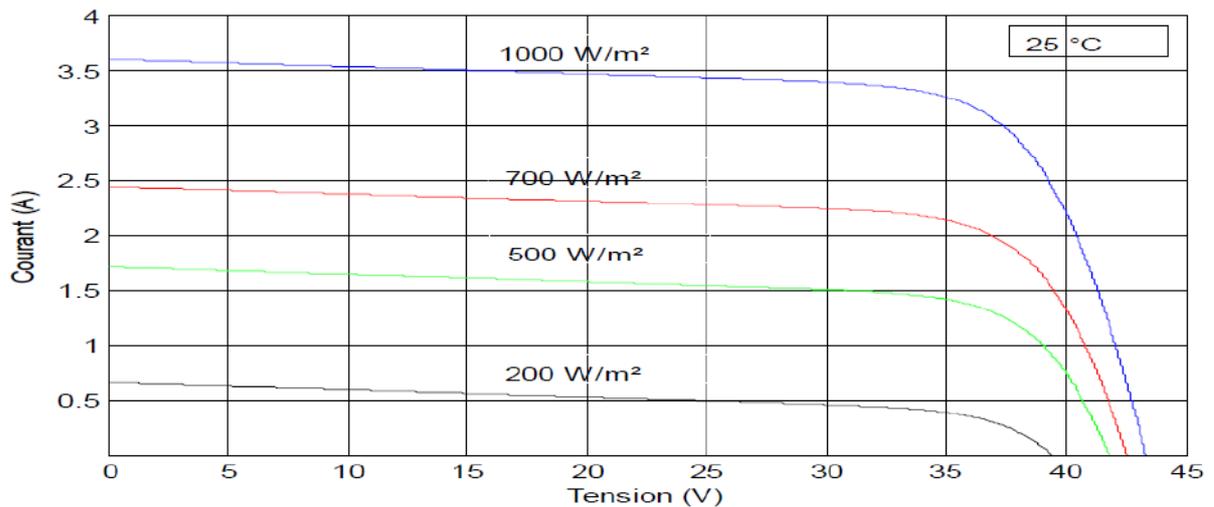


Figure 2.8: Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant/tension d'une cellule photovoltaïque [41].

4. Technologies des cellules solaires

Il existe aujourd'hui, plusieurs technologies des cellules photovoltaïques réparties en trois générations de cellules, en fonction des matériaux utilisés pour leur fabrication. La figure 2.9 présente l'évolution du rendement de conversion en laboratoire au cours des années.

4.1. Cellules PV de première génération

Les cellules PV de première génération sont issues des « wafers » de silicium (Si) ou Si massif. Le Si est le matériau semi-conducteur le plus abondant que l'on trouve en grande quantité dans le sable, car il représente 32 % de la masse de la croûte terrestre. Le rendement théorique de ces cellules est limité 29 % (courbes bleues Figure 2.9). En outre, malgré la maturité de la technologie, le rendement des panneaux commercialisés n'excède pas 20 %. Enfin, l'inconvénient majeur de ces cellules réside dans les coûts de production du Si qui, s'élève à environ 70 % du coût final d'un panneau PV [45].

4.2. Cellules PV de deuxième génération

En plus du silicium amorphe qui fait le lien entre les deux générations, les recherches dans le domaine des matériaux semi-conducteurs ont conduit à l'apparition d'une diversité de technologies utilisant des complexes de matériaux en couches minces [46],[47]. Parmi elles, il y a l'Arséniure de Gallium (GaAs) dont le haut rendement et le coût très élevé conduisent à en

réserver l'usage essentiellement au domaine spatial, le Tellure de Cadmium (CdTe), le Cuivre/Indium/Sélénium (CIS), et le Cuivre/Indium/Gallium/Sélénium (CIGS). Cette génération a permis de baisser les coûts de production, mais les rendements restent autour de 10 % à l'échelle commerciale. Outre la rareté des matériaux comme le sélénium, l'indium et le gallium qui entraîne inéluctablement des coûts de fabrication plus élevés, cette technologie pose des problèmes d'intégrabilité, car certains matériaux (Cd, Te, Se) sont néfastes pour l'environnement. En effet, la Directive Européenne de 2006 interdisait déjà l'utilisation du Cadmium dans les piles. Ces cellules ne semblent pas être la solution à grande échelle dans la course énergétique du 21ème siècle [48],[49].

4.3. Cellules PV de troisième génération

On y trouve en premier, la technologie des cellules à jonction qui utilisent principalement des concentrations de matériaux III-V, dont parmi elles : des cellules tandem et des cellules multi-jonctions. La superposition d'au moins deux couches de semi-conducteurs différents, permet d'améliorer l'absorption du spectre solaire et par conséquent, l'efficacité [50]. Les rendements de ces cellules dépassent les 40 %. Cependant, les procédés de fabrication sont très complexes ce qui rend les coûts de productions élevés et réduit l'utilisation de cette technologie à des applications spécifiques. Ensuite, il y a une autre technologie des cellules appelées hybrides. Leur fonctionnement est fondé sur la sensibilisation d'un oxyde métallique semi-conducteur (SC) à large bande interdite par un colorant qu'on appelle aussi sensibilisateur. Ces cellules suscitent un grand intérêt à cause de leur mise en œuvre facile et du faible coût des matériaux mis en jeu. A ce jour, les meilleurs rendements avec ce type de technologie se situent autour de 12% [51].

Enfin, la dernière technologie de cette génération concerne des cellules utilisant uniquement des matériaux organiques, appelées cellules photovoltaïques organiques (OPVs).

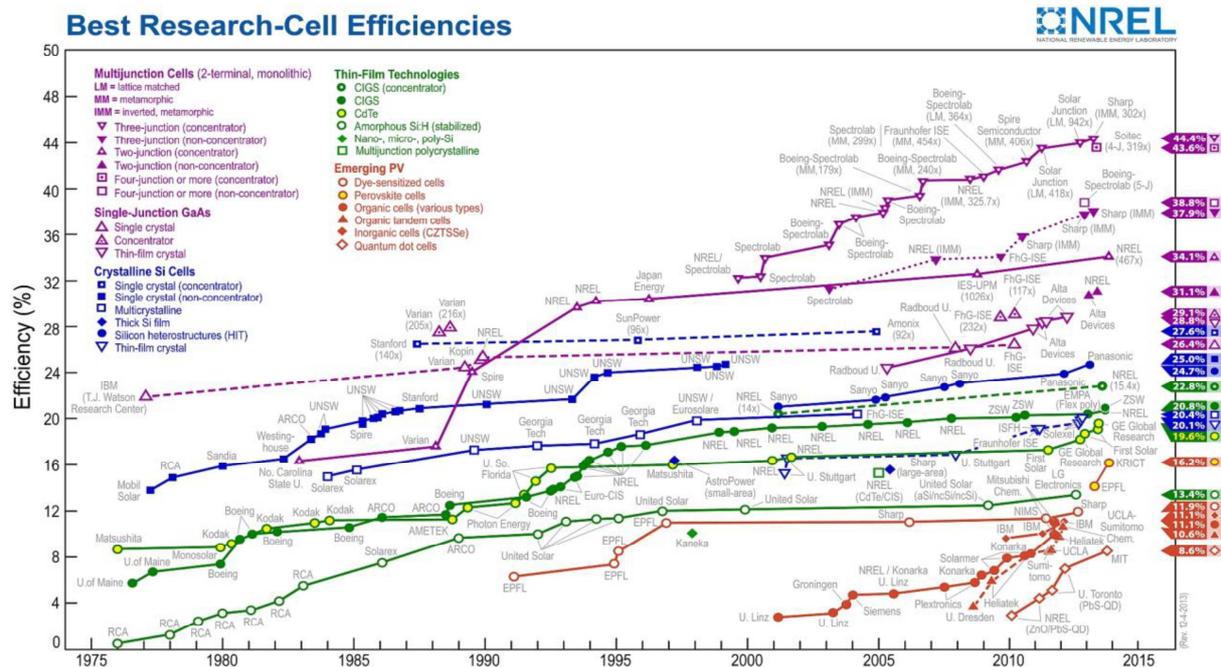


Figure 2.9: Evolution du rendement des différentes technologies photovoltaïques [51].

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé en premier lieu, la structure d'une cellule solaire et le principe de son fonctionnement, puis les paramètres électriques de la cellule photovoltaïque. Nous avons présenté en second lieu les différentes technologies solaires.

CHAPITRE 3

Etude des cellules solaires à
hétérojonctions de type a –Si :
H/c-Si

Introduction

Les cellules solaires à hétérojonction présentent l'intérêt d'avoir un rapport entre le rendement physique et le rendement économique meilleur que celui des cellules solaires conventionnelles à homojonction PN.

Dans ce chapitre nous aborderons en premier lieu, quelques notions sur les cellules solaires à hétérojonctions, ainsi que la cellule solaire à hétérojonctions de type a-Si:H / c-Si, nous présentons ensuite quelques définitions des oxydes transparents conducteurs (TCO) tels que le ZnO et l'ITO.

1. Les cellules solaires à hétérojonctions

Le concept des cellules solaires à hétérojonction repose sur le contact redresseur qui s'établit entre le métal et le semiconducteur. Le métal est généralement représenté par un oxyde transparent conducteur TCO (Transparent Conductive Oxide).

Les modèles qui traitent des hétérojonctions sont :

- Le modèle d'Anderson, dans ce cas on ne tient pas compte des états d'interfaces ;
- Des modèles tenant compte des états d'interfaces et des pertes qui influent sur le profil des bandes engendrant les recombinaisons.

Des modèles qui prennent en considération les états d'interfaces et le transport de charge par effet tunnel.

1.1. Diagramme des bandes d'énergie d'une hétérojonction

Dans les cellules solaires conventionnelles à homojonction PN, l'émetteur est constitué par la zone fortement dopée, alors que dans les cellules solaires à hétérojonction cet émetteur est remplacé par le matériau à large gap (Figure 3.1). Cependant, le problème de recombinaison en surface rencontré dans la cellule photovoltaïque à homojonction est remplacé par le problème des recombinaisons au niveau de l'interface. Il est à signaler que le taux de recombinaison au niveau de l'interface est considérablement inférieur au taux de recombinaison au niveau de la surface. Cette comparaison est valable dans le cas où, le matériau à large gap est passif, c'est-à-dire, présente une faible absorption et une recombinaison nulle.

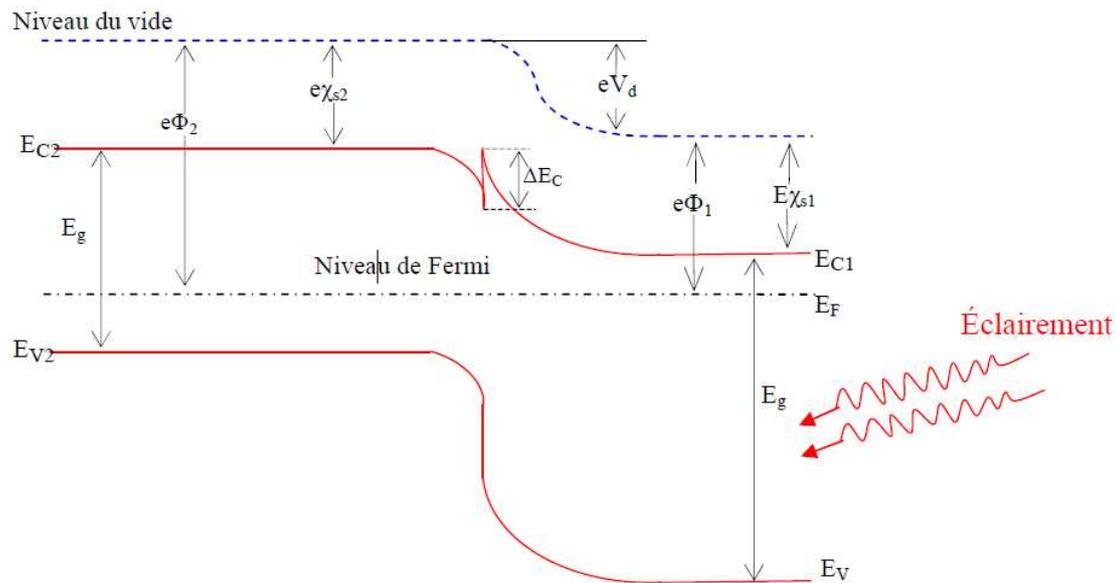


Figure 3.1: Diagramme des bandes d'énergie d'une hétérojonction sous éclairage [23].

1.2. Les composants de la cellule silicium à hétérojonctions

1.2.1. L'oxyde transparent conducteur

Dans la structure standard d'une cellule photovoltaïque, un oxyde transparent conducteur est placé sur la face avant (face éclairée) de la cellule. Le TCO doit avoir certaines propriétés :

- Il doit avoir une excellente transparence optique. Etant placé sur la face avant, 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 collecte des porteurs ;
- Il doit aussi avoir une bonne adhérence sur une variété de substrats.

Les oxydes transparents conducteurs sont des matériaux à grand gap. Il existe une grande variété d'oxydes transparents conducteurs possibles, nous avons les oxydes de zinc, les oxydes d'étain et les oxydes d'indium.

1.2.2. L'émetteur

L'émetteur est constitué par une fine couche de silicium amorphe hydrogéné de dopage opposé au substrat ou du c-Si fortement dopé dans le cas d'une homojonction. L'émetteur permet d'avoir une jonction p-n afin de séparer les paires électron-trou photogénérés. Il doit être pris très mince pour minimiser l'absorption dans cette couche. Toutefois, c'est une

couche qui a une résistance carrée importante d'où la nécessité de la couvrir d'un excellent conducteur (métal ou oxyde transparent conducteur) pour assurer la collecte des porteurs.

1.2.3. Le BSF

Le BSF est une couche qui crée un champ électrique arrière et qui permet également de passiver la face arrière de la cellule. Le BSF est une couche fortement dopée (p^+ ou n^+) avec le même type de dopage que le substrat. Avec une jonction p^+-p ou n^+-n , une barrière de potentiel est induite par la différence de niveau de dopage entre le substrat et le BSF. Cette barrière de potentiel sur la face arrière de la structure permet de confiner les porteurs minoritaires dans le substrat et ainsi d'éviter qu'ils ne se recombinent sur 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.

1.2.4. Les contacts

Les contacts métalliques sont placés sur les deux faces de la cellule pour les structures standards. Ces contacts permettent de collecter le courant photogénéré. Les contacts métalliques de type ohmique constituent un cas idéal car le maximum de courant sera collecté avec ce type de contact. Outre un choix de métal donnant des contacts ohmiques, il est aussi important d'avoir des résistances de contact le plus faible possible.

La métallisation de la face avant résulte d'un compromis entre taux d'ombrage et résistances série. En effet, diminuer le taux d'ombrage se traduit par un courant élevé puisque plus de photons pénètrent dans la cellule mais cela suppose d'un autre côté d'avoir des doigts de métallisation moins larges et donc une augmentation des résistances série.

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

- 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.

2. Les cellules solaires du type Métal-semiconducteur (Schottky)

Lorsque deux matériaux, Métal-Semiconducteur, semiconducteur-semiconducteur ou métal-isolant-semiconducteur, sont en contact, il s'établit un échange de charges pour que le système trouve un équilibre thermodynamique.

Les cellules solaires du type Schottky sont formées à l'aide d'une structure composée d'un métal et d'un semiconducteur en contact.

2.1. Contact Métal-Semiconducteur

Le contact métal-semiconducteur constitue l'un des dispositifs de base de l'électronique moderne. On l'emploie aussi bien pour ses propriétés de redressement (diode Schottky) que pour réaliser des contacts ohmiques de bonne qualité.

La structure des bandes d'énergie à l'interface du contact métal-semiconducteur est conditionnée d'une part du type du semiconducteur et d'autre part de la différence éventuelle entre le travail de sortie du métal ϕ_m et celui du semiconducteur ϕ_s , on aura alors les cas suivants :

- Lorsque : $\phi_m > \phi_s$: Le contact métal semiconducteur (n) est redresseur.

Le contact métal semiconducteur (p) est ohmique.

- Lorsque : $\phi_m < \phi_s$: Le contact métal semiconducteur (n) est ohmique.

Le contact métal semiconducteur (p) est redresseur.

a) Contact ohmique :

Ce contact est établi lors de la parution d'une zone d'accumulation des porteurs majoritaires côté Semiconducteur. La caractéristique courant-tension doit obéir à la loi d'ohm $V=R.I$. Les diagrammes des bandes d'énergie d'un tel contact sont représentés sur les figures (3.2.a) et (3.2.b) [52]. On voit bien que l'amplitude de la courbe des bandes et leur prolongement dans le semiconducteur sont très petits. Comme résultat, il n'ya presque pas de

barrière entre le semiconducteur et le métal. Ainsi les électrons peuvent circuler librement à travers le contact.

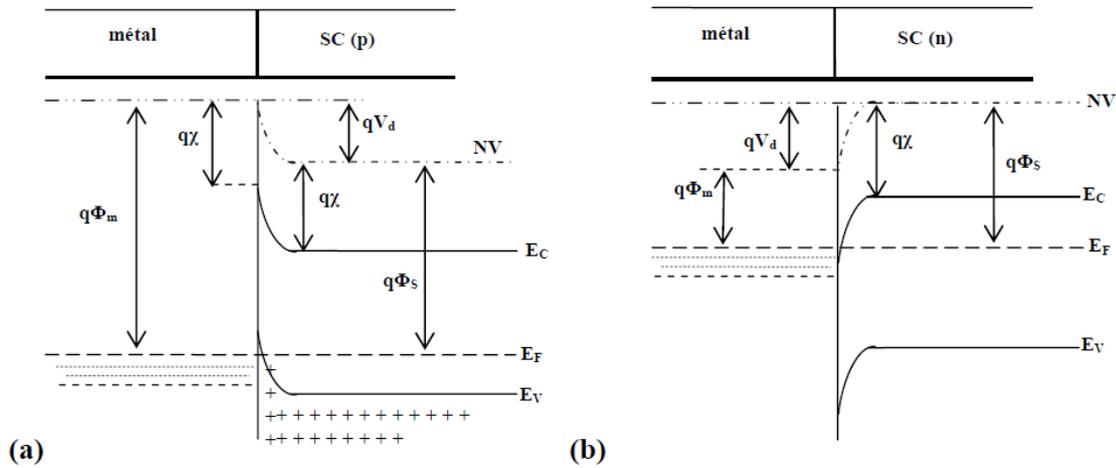


Figure 3.2: Diagramme de bandes d'un contact ohmique en équilibre thermodynamique entre (a) un métal et un semi-conducteur de type p avec $q\phi_m > q\phi_s$, et (b) un métal et un semi-conducteur de type n avec $q\phi_m < q\phi_s$. NV est le niveau du vide, V_d est la tension de diffusion.

b) Contact redresseur (Schottky)

Ce type de contact est obtenu lorsqu'une zone désertée en porteurs majoritaires apparaît du côté semiconducteur, l'équilibrage des niveaux de Fermi s'effectue par passage d'électrons du métal vers le semiconducteur ou vice versa, selon leurs travaux de sortie ainsi que le dopage du semiconducteur. Cette diffusion d'électrons s'arrête lorsque le champ interne généré par la charge d'espace équilibre le courant de diffusion. La barrière de potentiel formée à l'interface est appelée barrière de Schottky $q\phi_B$, dont la hauteur est donnée par la différence entre le travail de sortie du métal et l'affinité électronique du semiconducteur selon la relation suivante [53] :

$$q\phi_B = q(\phi_M - \chi_S) \quad (9)$$

avec

$q\phi_M$: Travail de sortie du métal ;

χ_S : Affinité électronique du semiconducteur.

La tension de diffusion V_d (pour un semiconducteur de type N) s'écrit [53] :

$$V_d = \phi_M - \phi_S = \phi_M - \chi_S - \frac{E_C - E_{Fn}}{q} \quad (10)$$

avec

E_C : niveau d'énergie de la bande de conduction ;

$E_{F,n}$: Niveau d'énergie de Fermi du semiconducteur.

Les diagrammes énergétiques de ce type de contact sont illustrés sur les figures (3.3.a) et (3.3.b) [52].

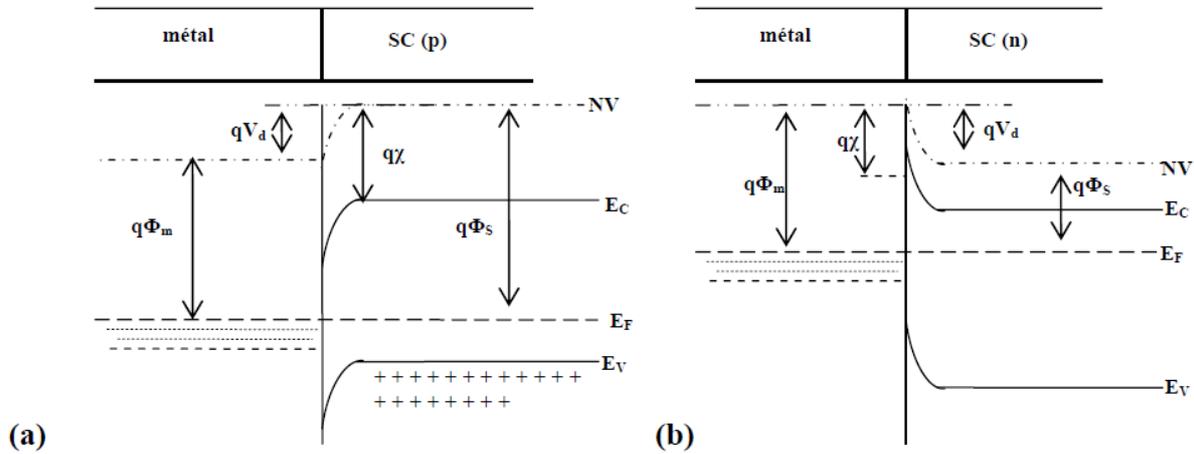


Figure 3.3: Diagramme de bandes d'un contact Schottky en équilibre thermodynamique entre (a) un métal et un semi-conducteur de type p avec $q\phi_m < q\phi_s$, et (b) un métal et un semiconducteur de type n avec $q\phi_m > q\phi_s$. NV est le niveau du vide, V_d est la tension de diffusion.

2.2. Principe de fonctionnement de la cellule (Schottky)

Le concept des cellules solaires à hétérojonction repose sur le contacte redresseur qui s'établit entre le métal et le semiconducteur. Le métal est généralement représenté par un oxyde transparent conducteur (TCO).

Sous l'effet d'un rayonnement solaire, les photons sont absorbés par le semiconducteur. Ces photons vont transmettre leur énergie aux électrons. Si l'énergie transmise est supérieure à celle associée à la bande interdite E_g du semiconducteur, des paires électrons trous sont alors créées dans cette zone de déplétion par arrachement des électrons.

Les électrons créés dans la région P et les trous engendrés dans la région N diffusent, sous l'effet d'un champ électrique E qui règne dans cette zone. Ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule et une différence de potentiel supportée entre les électrodes métalliques de la cellule.

3. Cellules à hétérojonctions de type a-Si:H / c-Si

3.1. Présentation de la cellule à hétérojonctions de type a-Si:H / c-Si

Les cellules PV à hétérojonctions (HJ) sont obtenues par la mise en contact de matériaux d'énergie de gap (E_G) différente. L'hétérojonction silicium (Si-HJ) consiste à mettre en contact le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) avec le silicium cristallin (c-Si). L'énergie de gap du a-Si:H ($1.5 \text{ eV} \leq E_G \leq 1.9 \text{ eV}$) est en effet plus élevée que celle du c-Si (1.12 eV) [54]. À la différence des cellules à homojonction classiques, les zones dopées et la passivation de surface sont ici réalisées par un unique dépôt de silicium amorphe hydrogéné.

La conductivité du a-Si:H est très inférieure à celle du c-Si, il faut donc ajouter une couche conductrice sur toute sa surface afin de pouvoir collecter le courant. Sur la face illuminée de la cellule, cette couche conductrice est constituée d'un oxyde transparent conducteur (OTC) qui collecte le courant. Cet OTC assure également un bon contact avec les électrodes métalliques, tout en jouant le rôle de couche antireflet (Figure 3.4) [55]. Si l'on n'éclaire pas la face arrière des cellules, un simple métal peut y être déposé sur la couche amorphe, plutôt qu'un OTC.

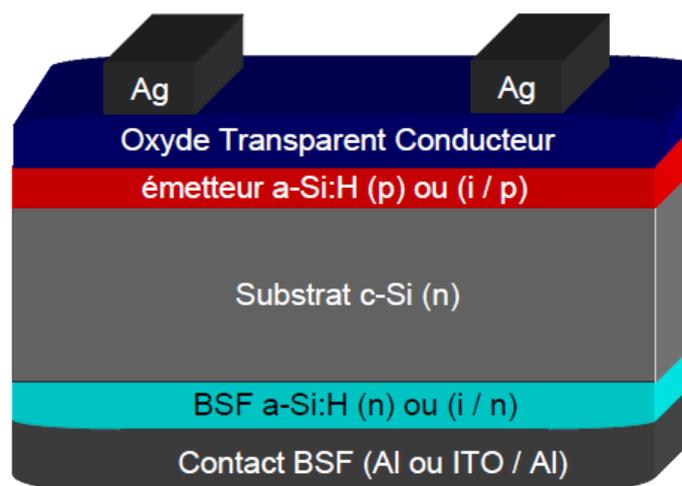


Figure 3.4 : Structure schématique de cellules à hétérojonctions a-Si:H / c-Si.

Pour les hétérojonctions, 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, charges et des dipôles qui influent sur le diagramme de bandes en engendrant des recombinaisons. D'autres modèles prennent aussi en compte l'influence de ces états d'interface et le transport par effet tunnel.

3.2. Le modèle d'Anderson

Le modèle d'Anderson 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 . Lors du raccordement des bandes de conduction et de valence, la différence entre les gaps et les affinités électroniques sont à l'origine des discontinuités. Les figures (3.5.a) et (3.5.b) [52] 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 [52]:

$$\text{Le désaccord de la bande de conduction} \quad \Delta E_c = q(\chi_2 - \chi_1) \quad (11)$$

$$\text{Le désaccord de la bande de valence} \quad \Delta E_v = q(\chi_2 - \chi_1) + E_{g1} - E_{g2} \quad (12)$$

$$\text{La tension de diffusion} \quad qV_d = q(\phi_2 - \phi_1) \quad (13)$$

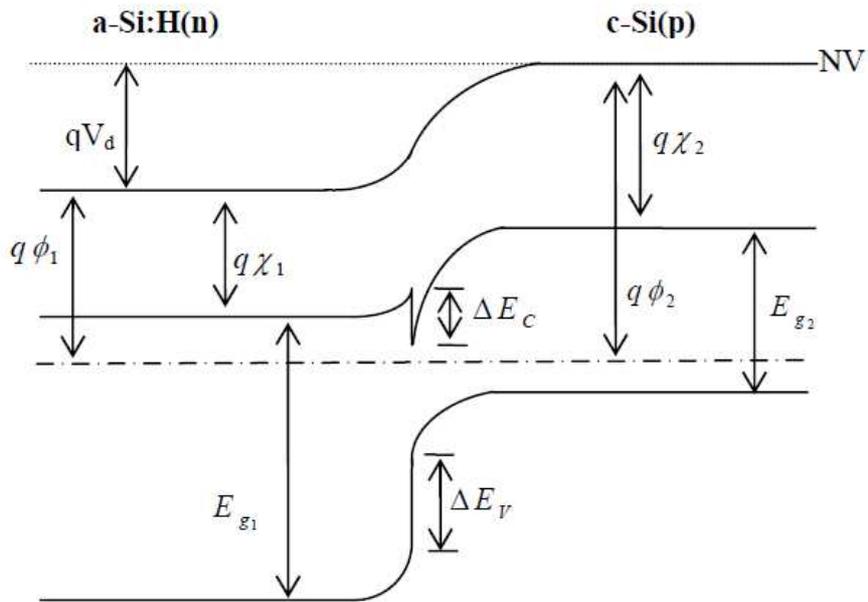


Figure 3.5.a: Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p) à l'équilibre thermodynamique.

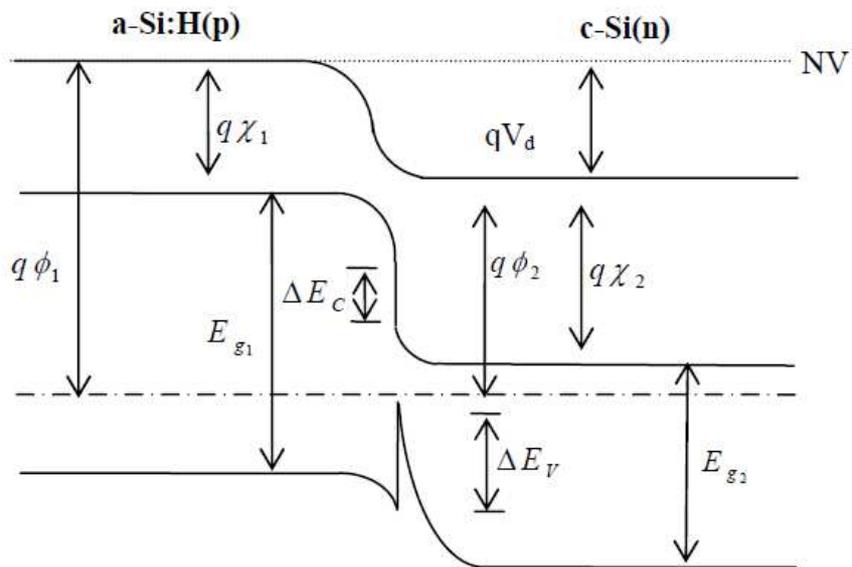


Figure 3.5.b: Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si:H(p)/c-Si(n) à l'équilibre thermodynamique.

4. Les oxydes transparents conducteurs (TCO)

4.1. Définition oxydes transparents conducteurs (TCO)

Les oxydes transparents conducteurs (Transparent Conductive Oxides) TCO sont des semiconducteurs dégénérés à large gap, c'est-à-dire leur niveau de Fermi se situe proche de la bande de conduction. Cela signifie que leur bande de conduction est déjà remplie même à température ambiante ce qui les rend conducteurs. De plus, leur gap élevé (3 à 4 eV) les empêche d'absorber les photons ayant une énergie inférieure à ce gap et les rend donc transparents dans le visible.

Les TCO semiconducteurs importants sont ZnO dopé, In_2O_3 , SnO_2 , aussi bien que les ternaires composés Zn_2SnO_4 , ZnSnO_3 , $\text{Zn}_2\text{In}_2\text{O}_5$, $\text{Zn}_3\text{In}_2\text{O}_6$, In_2SnO_4 , CdSnO_3 , et les oxydes multi-composants qui consistent en combinaison de ZnO, In_2O_3 et SnO_2 . L'ITO, et le ZnO. Ils sont les couches minces les plus étudiées pour la plupart des applications photovoltaïques.

4.2. L'oxyde de zinc ZnO

4.2.1. Structure cristalline

L'oxyde de zinc est un oxyde transparent conducteur du groupe II-VI. Il cristallise sous différentes structures comme le sel gemme, le zinc blende et la Wurtzite (Figure 3.6) [23].

Les films d'oxyde de zinc sont principalement connus sous la structure Wurtzite.

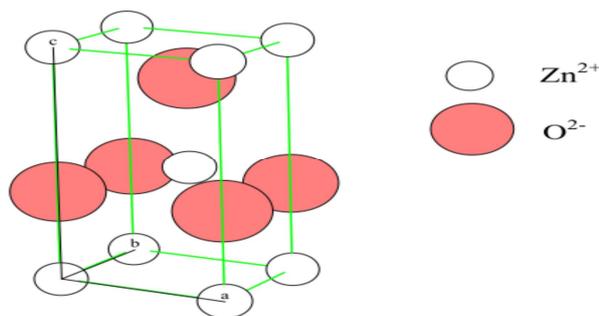


Figure 3.6: Structure Wurtzite de l'oxyde de zinc.

4.2.2. Propriétés électriques

L'oxyde de zinc présente un gap direct (Figure 3.7) [23], ceci est dû au fait que le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent sur le même point de l'espace des k (k étant le vecteur d'onde dans la zone de Brillouin).

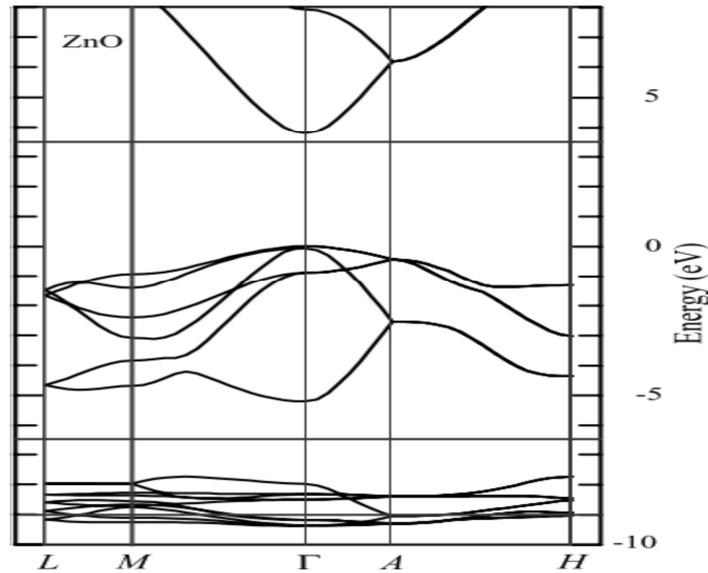


Figure 3.7: Présentation du gap de l'oxyde de zinc.

La conduction électrique de l'oxyde de zinc est due à la présence des atomes de zinc dans des sites interstitiels ainsi qu'aux lacunes d'oxygène. Par ailleurs, le ZnO stoechiométrique est un isolant. Le dopage permet d'améliorer la conductivité électrique de ce matériau. L'oxyde de zinc est un TCO qui peut avoir un dopage type p ou type n [56].

4.2.3. Propriétés optiques

L'oxyde de zinc ZnO est un matériau transparent, son indice de réfraction varie entre 1,9 et 2,2 [57,58]. Il présente une absorption aux environs de 360 nm, longueur d'onde dans l'ultraviolet, ce qui explique la valeur du gap des films minces de ce matériau. Par contre, il est transparent dans le spectre visible et proche infrarouge comme l'indique la Figure 3.8 [59].

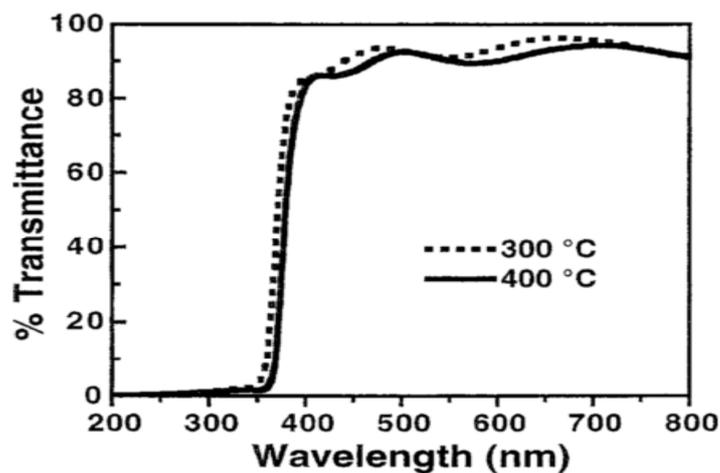


Figure 3.8: Transmission d'un film d'oxyde de zinc recuit pour différentes températures [59].

4.3. Présentation de l'ITO

4.3.1. Propriétés structurales

L'ITO est l'un des oxydes transparents conducteurs "TCO" les plus utilisés, L'ITO se forme à partir d'oxyde d'indium (In_2O_3) et de quelques pourcentages atomiques en étain (Sn), généralement 10%, qui vont se substituer aux positions des atomes d'indium dans le cristal. Si la concentration d'étain augmente, la conductivité électrique s'améliore mais la transparence sera altérée.

L'ITO peut se présenter sous deux formes: la première est cubique et la deuxième est hexagonale.

a) Structure cubique

L'ITO, en général, se cristallise dans une structure bixbyite où structure d'oxyde de terres rares [60, 61]. La maille élémentaire de l'ITO est composé de 16 mailles d'oxyde d'indium " In_2O_3 ", qui contient 80 nœuds dans la maille ($\text{In}_{32}\text{O}_{48}$) [61,62] (Figure 3.9). Les atomes d'oxygène se situent aux coins des cubes secondaires tandis que le sommet est occupé par les atomes d'indium, avec l'existence de 16 lacunes d'oxygène qui déforme le cube.

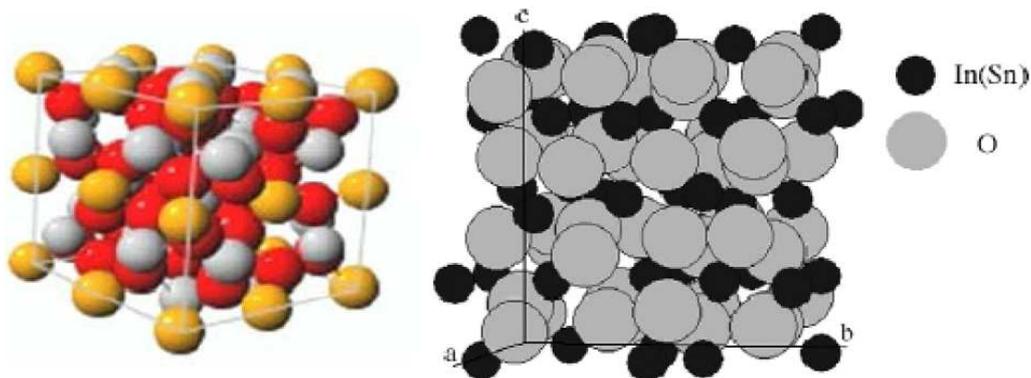


Figure 3.9: Maille élémentaire de Bixbyite d' In_2O_3 .

b) Structure hexagonale

L'ITO possède une autre structure cristallographique de type hexagonale. Cette structure est obtenue pour des conditions d'élaboration exceptionnelles de pression et de température (exemple 65kBar est 103°C [63]) ou dans le cas de fort dopant. Dans cette structure, la maille

élémentaire contient six mailles d'oxyde d'indium In_2O_3 où dans ce cas, les paramètres de maille sont égaux à 5,49Å et 14,52Å, la densité volumique est $7,30 \text{ g cm}^{-3}$ [64].

4.3.2. Propriétés électriques

L'ITO est un semiconducteur de type n généralement dégénéré. Le niveau de Fermi est situé au-dessous de la bande de conduction et le dopage d'oxyde d'indium par l'étain élève le niveau d'énergie à l'intérieure de la bande de condition, donc le comportement de l'ITO est quasi-métallique.

La conductivité élevée de l'ITO résulte de la formation de lacunes d'oxygène présente dans la structure d'oxyde d'indium, en effet la structure non-stœchiométrique est à l'origine de l'existence d'électrons libres qui sont les porteurs permanants de la conductivité électrique. La deuxième raison de la conductivité est associée à des atomes d'étain qui jouent un rôle important pour augmenter la concentration de porteurs de charge. La substitution des atomes d'étain, Sn^{4+} , aux positions des ions d'indium, In^{3+} , dans le réseau d'oxyde d'indium In_2O_3 produit des électrons libres dans la bande de conduction [61].

4.3.3. Propriétés optiques

L'ITO est caractérisé par une large bande interdite, directe, qui varie entre 3,5- 4,3eV [7], possédant une absorption élevée dans le domaine de l'ultraviolet, une bonne transmission dans le visible, généralement supérieure à 85%,et une réflexion importante dans le domaine infrarouge [65].

La valeur de l'indice de réfraction de l'ITO se situe entre 1,66 et 2,48 [66]. La transmission du film ITO est influencée par certains facteurs tels que la microstructure, la rugosité et l'homogénéité de la surface.

Par ailleurs, les couches minces de l'oxyde d'indium dopé à l'étain sont, chimiquement, inertes et caractérisées par une bonne adhésion au substrat et par une dureté élevée.

4.4. Application photovoltaïque

4.4.1. Electrode transparente

En pratique, Les TCO en couches minces utilisées en tant qu'électrodes transparentes et conductrices sont polycristallins ou amorphes, ils possèdent une résistivité électrique de l'ordre de $10^{-3} \Omega.\text{cm}$ ou inférieure et une transmission de 80% ou supérieure dans la gamme

du visible. De plus, ces TCO doivent avoir une concentration en électrons libres de l'ordre de 10^{20} cm^{-3} ou supérieure et un gap optique de 3 à 4 eV.

Les couches minces de ZnO peuvent être utilisées comme contact transparent et diffuseur de la lumière pour les cellules solaires en couche minces [67].

4.4.2. Couche antireflet

Le rendement d'une cellule solaire est limité par les multiples pertes qui s'y produisent. Les pertes relatives aux photons sont à l'origine d'une réduction considérable du rendement.

Ces pertes peuvent être dues à une mauvaise absorption, généralement liée au gap du matériau utilisé ou à une réflexion due au fait que le matériau possède un indice de réfraction élevé (Figure 3.10). Pour le silicium plus de 35% du flux lumineux incident est réfléchi, ce qui affecte considérablement le rendement des cellules photovoltaïques [68]. Pour améliorer l'efficacité des cellules solaires, le ZnO peut être utilisé comme couche antireflet.

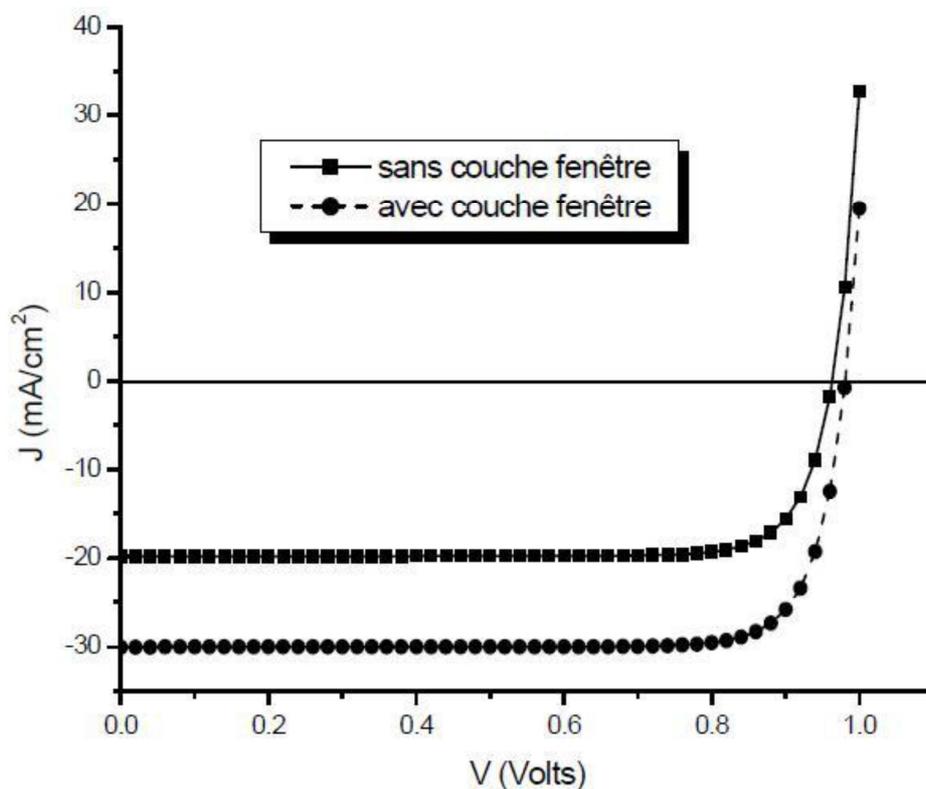


Figure 3.10: Effet de la couche antireflet sur la cellule photovoltaïque [63].

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 propriétés structurales et optoélectroniques des matériaux ZnO et ITO comme constituants des cellules solaires à hétérojonction a-Si:H / c-Si.

CHAPITRE 4

Simulation des cellules solaires
de type a-Si :H/c-Si

Introduction

Dans ce chapitre nous présentons une étude comparative entre les résultats de simulation des cellules solaires à hétérojonction de type a-Si:H/c-Si sans et avec couches antireflet, nous nous intéressons particulièrement à l'ITO et le ZnO. Pour cela, nous avons utilisé le simulateur des dispositifs AFORS-HET.

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 que nous avons obtenus en identifiant le revêtement antireflet permettant les meilleures caractéristiques électriques des cellules solaires.

1. Présentation du logiciel de simulation AFORS-HET :

Le logiciel AFORS-HET (Automate **FOR** Simulation of **HET**erostructures) est un outil de simulation numérique à une dimension, développé en Allemagne par le laboratoire Helmholtz Zentrum Berlin (HZB), ce logiciel est adapté d'une manière particulière à la simulation des cellules solaires à hétérojonction à base de silicium [69].

AFORS HET possède une interface graphique qui nous permet de définir, de créer facilement des structures différentes, dont on peut contrôler la plupart des paramètres, tels que: l'affinité électronique, énergie du gap du matériau, la mobilité des électrons et trous. Cette interface est répartie en 3 zones (voir figure 4.1.a):

- a. La première zone:** 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.
- b. La deuxième zone:** zone des paramètres externes (external parameters) on y trouve la température externe, le spectre d'illumination et les conditions aux limites.
- c. La troisième zone:** zone de mesure (measurment) où les mesures sont effectuées.

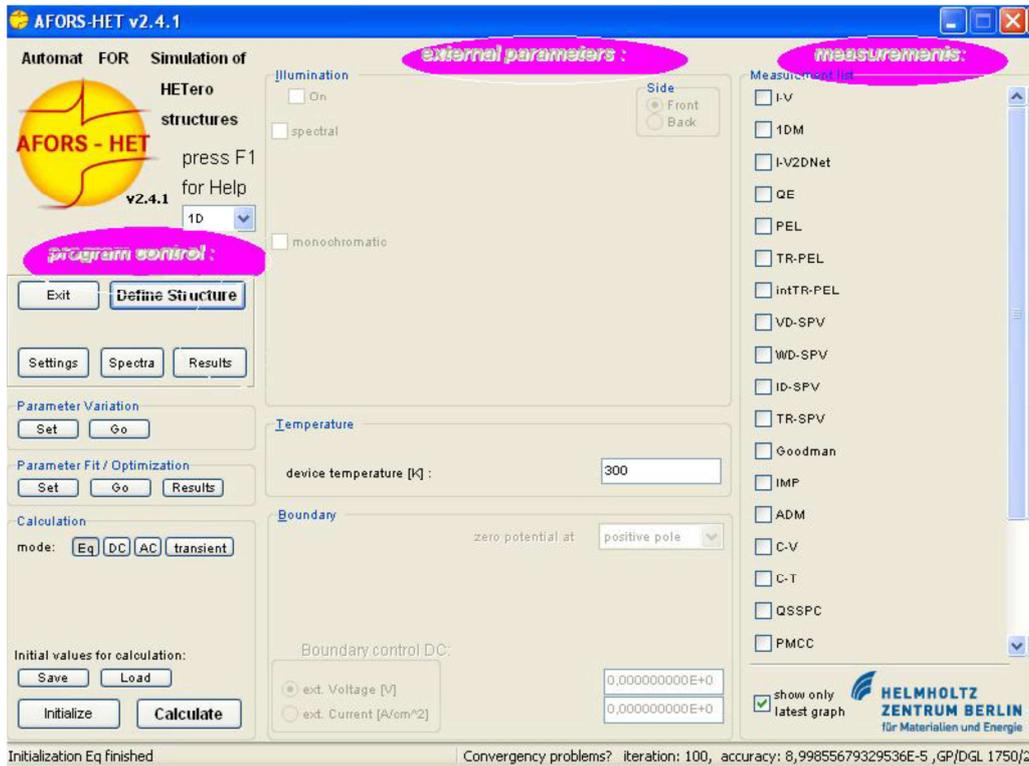


Figure 4.1.a: Fenêtre principale de l'interface graphique du logiciel de simulation.

Ce logiciel AFORS-HET est utilisé par de nombreux chercheurs [70],[71] dans la simulation des cellules solaires à hétérojonction.

2. Les étapes de simulation

On note les étapes de la simulation comme suit :

- On commence par une définition de 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. On peut les définir en cliquant sur le bouton correspondant dans la fenêtre principale AFORS-HET (Figure 4.1.b).

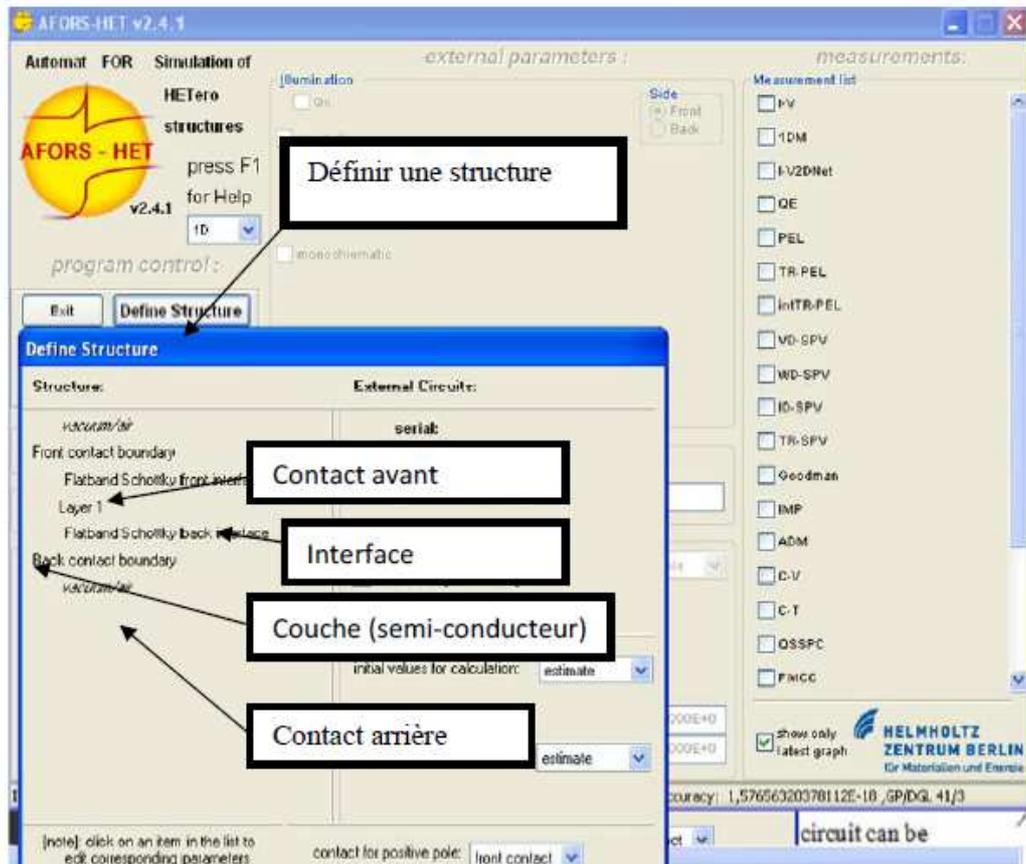


Figure 4.1.b: Fenêtre correspondante à la définition de la structure.

- Après la définition de la structure, nous introduisons les paramètres nécessaires tels que l'épaisseur et les propriétés électriques (le gap, le dopage ...etc.) (Figure 4.1.c).

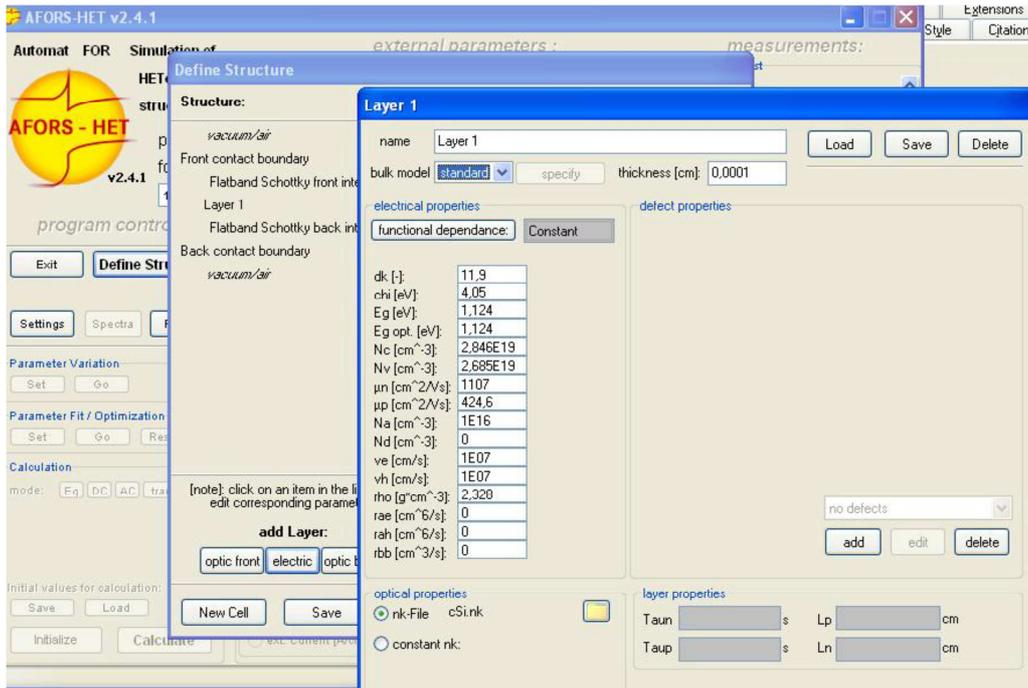


Figure 4.1.c: Introduction des paramètres de la cellule solaire.

- Une fois la cellule est créée et enregistrée, le calcul des conditions d'équilibre thermodynamique est effectuée automatiquement.
- Pour l'illumination de la cellule, on choisit d'abord le mode de polarisation AC ou DC, on sélectionne ensuite la lumière spectrale ou monochromatique avec laquelle on veut travailler (Figure 4.1.d). On pourra ensuite effectuer de nombreuses simulations.

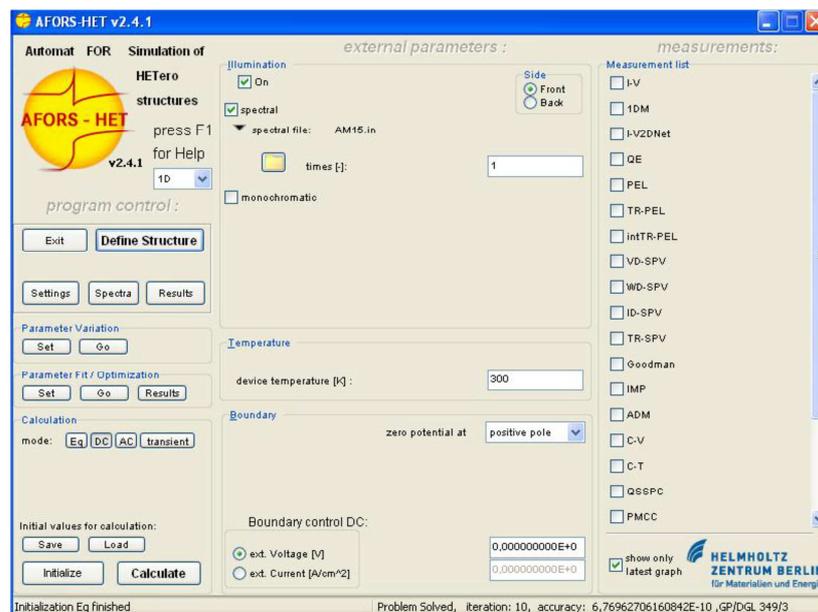


Figure 4.1.d: Mode de calcul et illumination de la cellule.

3. Les structures des cellules solaires simulées

Notre étude a concerné en premier lieu les cellules solaires à hétérojonction de type a-Si:H/c-Si/Al sans couche antireflet. Nous avons étudié ensuite l'effet de l'introduction d'une couche antireflet sur la face avant de ces cellules solaires sur leurs performances photovoltaïques. Nous avons alors choisi le ZnO et l'ITO, connus pour être de bons TCO qui jouent un double rôle : celui d'une couche conductrice permettant de conduire les porteurs de charge jusqu'à l'électrode de collecte et de couche antireflet permettant de diminuer les pertes optiques dans la cellule.

La figure 4.2 présente les structures des cellules solaires simulées : ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al et ITO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al.

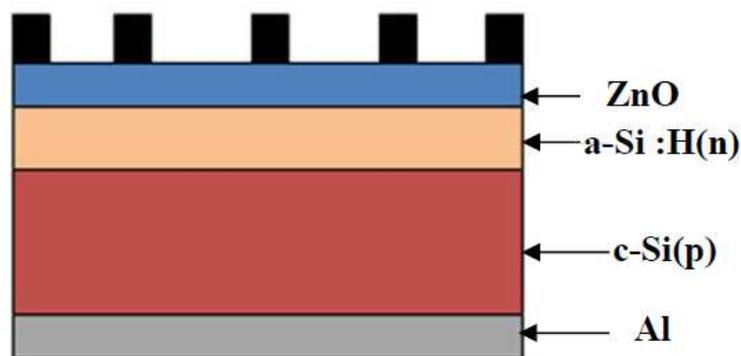


Figure 4.2.a: La cellule solaire ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al simulée.

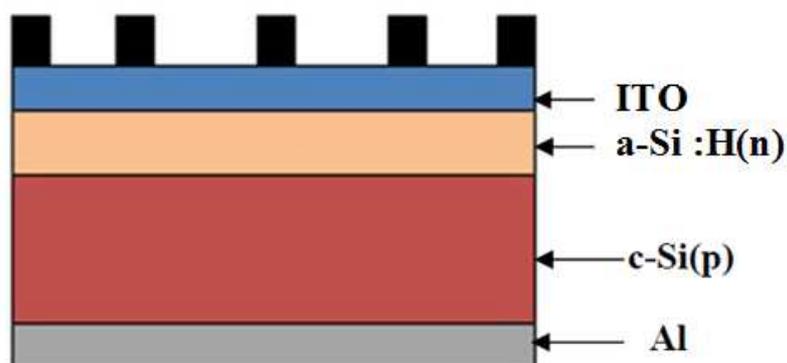


Figure 4.2.b: la cellule solaire ITO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al simulée.

4. Les paramètres de simulation

4.1. Paramètres des couches ITO et ZnO

Les simulations ont été effectuées sous un spectre solaire AM 1.5 avec $P = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 300 \text{ K}$. Le tableau 1.a suivant regroupe les principaux paramètres des couches de ZnO et ITO utilisées dans la simulation.

Paramètres de simulation	ITO	ZnO
Gap	3,55 eV	3,4 eV
Travail de sortie	4,4 eV	4,45 eV
Résistivité	$1,63 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$	$2 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$
Mobilité des électrons μ_n	$100 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	$200 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
Mobilité des trous μ_p	$25 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	$50 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
Dopage	10^{19} cm^{-3}	10^{19} cm^{-3}
Epaisseur	$8 \cdot 10^{-6} \text{ cm}$	$8 \cdot 10^{-6} \text{ cm}$

Tableau 4.1.a : Paramètres de simulation des couches ITO et ZnO utilisées.

4.2. Paramètres des couches a-Si :H(n), c-Si(p) utilisées

L'ensemble des paramètres des couches base et émetteur utilisées dans la simulation sont données dans le tableau ci-dessous.

Paramètres	a-Si :H(n)	c-Si(p)
Epaisseur	5 nm	300 μm
Gap	1,72 eV	1,124 eV
Dopage	$6,892 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Tableau 4.1.b : Paramètres de simulation des couches a-Si :H(n) et c-Si(p) utilisées.

5. Résultats de simulation

5.1. Diagramme des bandes d'énergie

A l'équilibre thermodynamique, les niveaux de Fermi sont alignés ce qui implique une courbure de bandes de conduction et de valence. La figure suivante 4.3 représente les diagrammes des bandes d'énergie des cellules solaires à simple hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p) avec les couches antireflet ITO et ZnO.

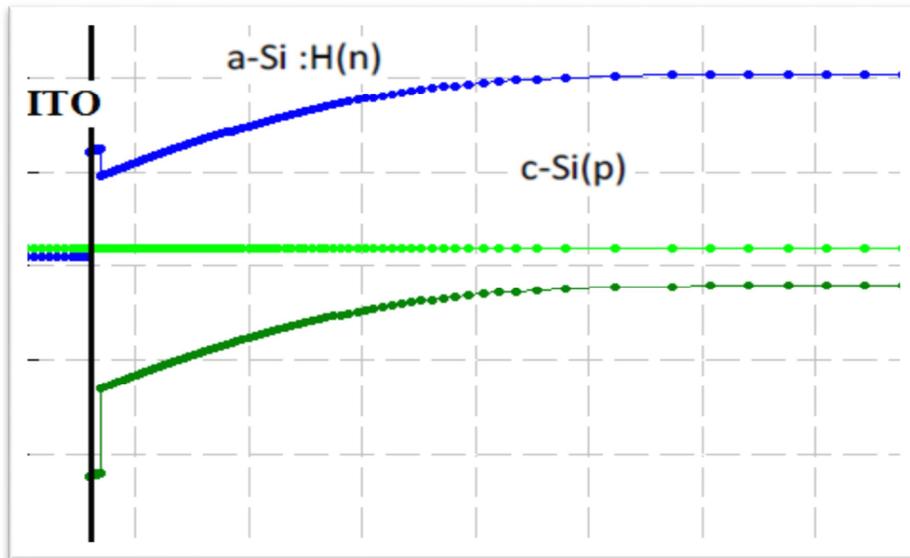


Figure 4.3.a: Diagramme des bandes d'énergie de la cellule solaire ITO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al.

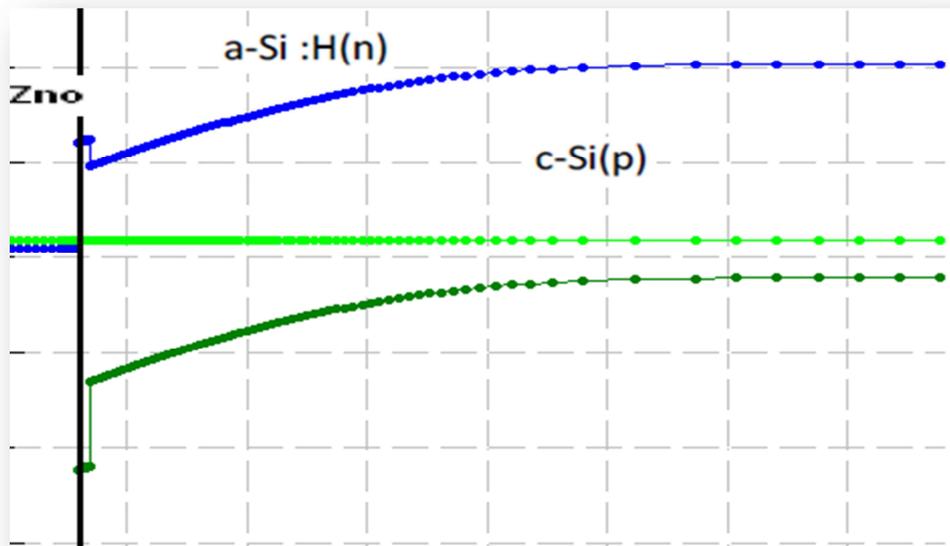


Figure 4.3.b: Diagramme des bandes d'énergie de la cellule solaire ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al.

5.2. Caractéristique courant-tension des cellules solaires simulées

La figure 4.4 représente les caractéristiques $I(V)$ des cellules solaires à hétérojonctions simulées sans couche antireflet (a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al), avec couche antireflet d'ITO (ITO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al) et avec couche de ZnO (ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al). Nous observons une amélioration des caractéristiques électriques des cellules solaires après l'introduction d'une couche antireflet sur la face avant ; ceci peut être expliqué par l'augmentation de la transmission du rayonnement à travers la couche antireflet et la réduction de la réflectivité de la cellule solaire. Les cellules solaires a-Si:H(n)/c-Si(p) présentent de meilleures caractéristiques avec une couche antireflet à base de ZnO comparativement à celles munies d'une couche antireflet d'ITO. Cette différence est due principalement aux mobilités des porteurs de charge qui sont plus grandes dans le ZnO comparées à celles de l'ITO (voir tableau 4.1.a).

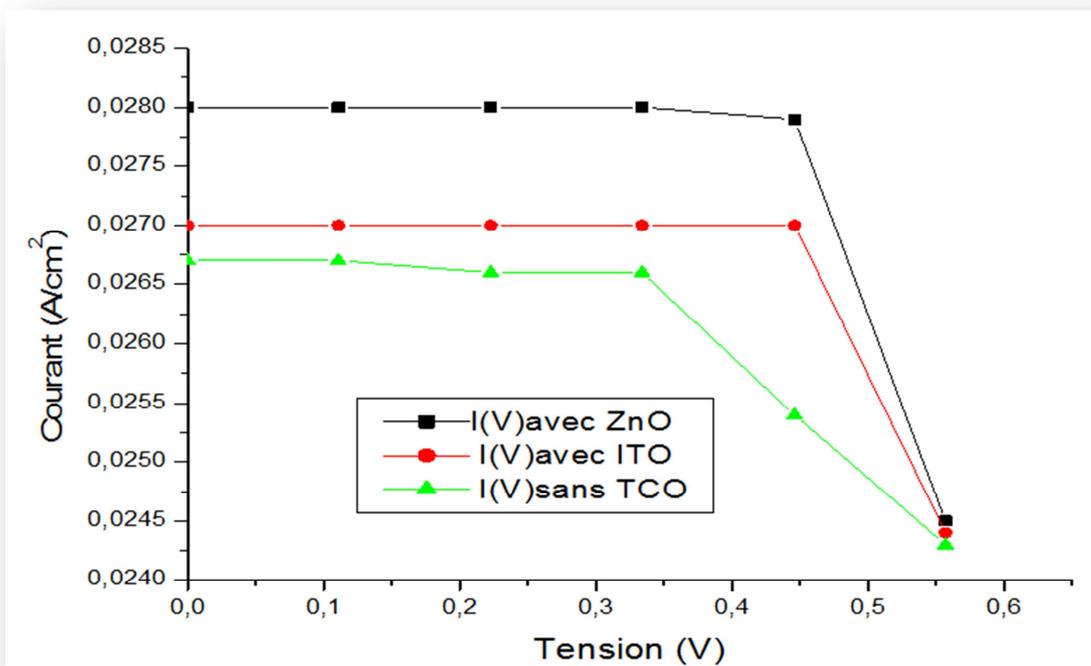


Figure 4.4: Caractéristiques courant-tension des cellules solaires à hétérojonction a-Si:H/c-Si simulées.

5.3. Influence du dopage de l'ITO sur les performances de la cellule solaire ITO/a-Si :H(n)/c-Si(p)/Al

Les paramètres électriques des cellules solaires ITO/a-Si :H(n)/c-Si(p)/Al sont résumés dans le tableau 4.3.a pour différentes concentrations de dopage de l'ITO.

Nous observons une amélioration du rendement de conversion des cellules solaires a-Si :H(n)/c-Si(p) avec une couche antireflet d'ITO à $\eta = 14.33\%$, ce rendement est conforme au rendement expérimental obtenu par Woong-Kyo Oh et al [72].

ITO	V_{co} (mv)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
10^{17}	619	28.02	70.49	12.22
10^{18}	619	28.02	78.27	13.57
10^{19}	620.7	28.02	81.24	14.12
10^{20}	620.7	28.01	82.34	14.32
10^{21}	620.7	28.01	82.76	14.39
10^{22}	620.7	28.01	82.82	14.4

Tableau 4.2.a : Les paramètres électriques des cellules solaires ITO/a-Si :H(n)/c-Si(p)/Al en fonction de la variation de la concentration du dopage de l'ITO.

5.4. Influence du dopage du ZnO sur les performances de la cellule solaire ZnO/a-Si :H(n)/c-Si(p)/Al

Le tableau 4.2.b regroupe les paramètres électriques des cellules solaires ZnO/a-Si :H(n)/c-Si(p)/Al en variant la concentration du dopage de la couche ZnO.

La figure 4.5 illustre une comparaison entre les valeurs du rendement des cellules solaires à hétérojonctions avec deux revêtements antireflet à base de ZnO et ITO. Comme le montre cette figure, en dessous d'une concentration de dopage du TCO de 10^{19} cm^{-3} , l'utilisation du ZnO comme couche antireflet dans les cellules solaires a-Si:H/c-Si offre un meilleur rendement photovoltaïque comparativement à l'ITO. En effet, plusieurs chercheurs voient en ce matériau du ZnO un candidat très prometteur pour remplacer l'ITO dans les

cellules solaires en silicium amorphe [73],[74] et ce, grâce à sa stabilité contrairement à l'ITO qui peut se brunir et perdre de sa transparence sous un flux d'hydrogène présent dans la phase de dépôt du silicium amorphe.

ZnO	V _{co} (mv)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
10 ¹⁷	619	28.02	78.17	13.56
10 ¹⁸	619	28.02	78.77	13.66
10 ¹⁹	620.7	28.02	81.31	14.14
10 ²⁰	620.7	28.01	82.35	14.33
10 ²¹	620.7	28.01	82.76	14.39
10 ²²	620.7	28.01	82.82	14.4

Tableau 4.2.b : Variation des paramètres électriques des cellules solaires ZnO/a-Si :H(n)/c-Si(p)/Al en fonction de la variation de la concentration du dopage du ZnO.

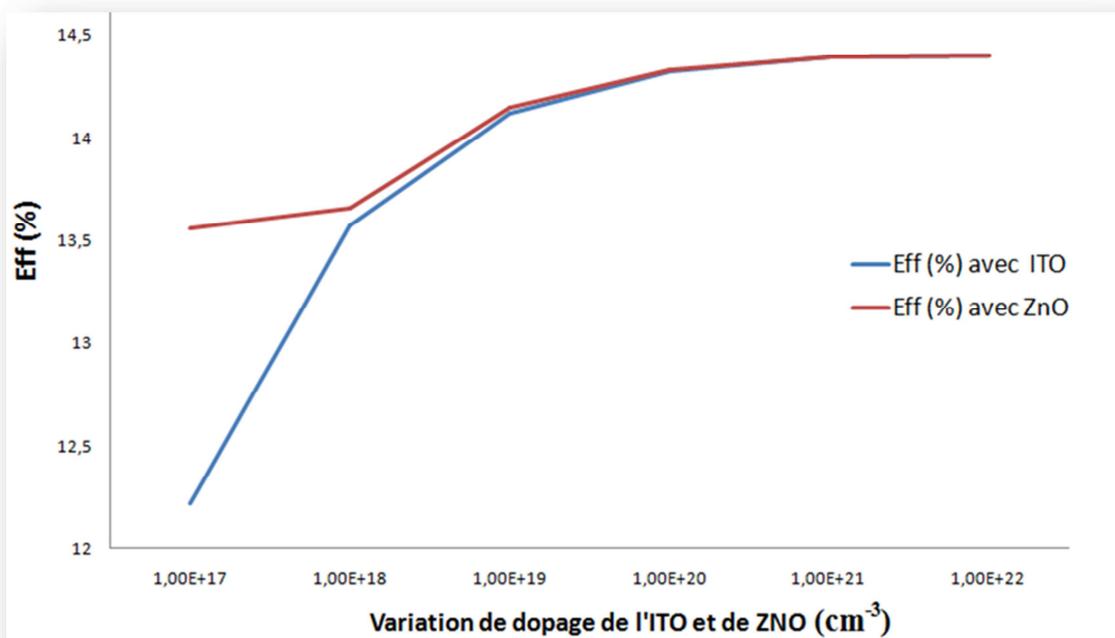


Figure 4.5: Variation du rendement des cellules solaires a-Si :H(n)/c-Si(p) en fonction de dopage de l'ITO et de ZnO.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation des cellules solaires de type a-Si :H(n)/c-Si(p), et nous avons étudié l'effet de la variation du dopage de l'ITO et de ZnO sur leurs performances photovoltaïques.

D'après ces résultats, nous pouvons conclure que l'utilisation de revêtements antireflet à base de l'ITO et ZnO en face avant des cellules solaires à hétérojonction a-Si :H/c-Si, améliore considérablement leurs performances photovoltaïques ; ceci peut être expliqué par l'augmentation de la transmission du rayonnement à travers la couche antireflet qui se traduit par un accroissement du courant photogénéré et par conséquent du rendement de conversion de la cellule solaire.

L'utilisation du ZnO en tant que couche antireflet dans les cellules solaires à hétérojonction a-Si :H/c-Si, permet d'obtenir les meilleures performances photovoltaïques de ces dispositifs comparativement à l'ITO. Ce qui constitue un autre avantage pour le matériau ZnO en tant qu'un TCO compétitif et très prometteur pouvant remplacer l'ITO dans les cellules solaires au silicium amorphe, comme observé par d'autres groupes de recherche.[73],[74].

Conclusion générale

Conclusion générale

L'amélioration de la compétitivité de l'électricité photovoltaïque consiste à augmenter le rendement de conversion des cellules solaires tout en réduisant leurs coûts de production. Le développement de nouvelles structures permettant d'atteindre un meilleur rapport rendement de conversion/cout de production est donc nécessaire. Les cellules solaires à hétérojonctions utilisant les semiconducteurs transparents (TCO) présentent aujourd'hui une évolution considérable avec de bons rendements de conversion et des processus de fabrication moins coûteux.

Dans ce travail, nous avons effectué une étude comparative des effets des revêtements antireflets à base de l'ITO et ZnO sur les performances photovoltaïques des cellules solaires de type a-Si:H/c-Si à l'aide de la simulation numérique. Cela a concerné notamment la comparaison des caractéristiques courant-tension (I-V) des cellules solaires sans et avec les deux couches antireflets (ITO, ZnO) ainsi que la détermination de leurs rendements de conversion dans le but d'identifier le revêtement antireflet permettant d'obtenir les meilleures performances photovoltaïques.

Selon nos résultats de simulation, nous pouvons conclure que l'utilisation de revêtements antireflet à base de l'ITO et ZnO en face avant des cellules solaires à hétérojonction a-Si:H/c-Si, améliore considérablement leurs performances photovoltaïques ; ceci peut être expliqué par l'augmentation de la transmission du rayonnement à travers la couche antireflet et la réduction de la réflectivité de la cellule solaire. Les cellules solaires a-Si:H(n)/c-Si(p) présentent de meilleures caractéristiques électriques avec une couche antireflet à base de ZnO comparativement à celles munies d'une couche antireflet d'ITO. Cette différence est due principalement aux mobilités des porteurs de charge qui sont plus grandes dans le ZnO comparées à celles de l'ITO.

L'utilisation du ZnO comme couche antireflet dans les cellules solaires a-Si:H/c-Si offre un meilleur rendement photovoltaïque comparativement à l'ITO. Donc le ZnO est un TCO très prometteur pour remplacer l'ITO dans les cellules solaires en silicium amorphe et ce, grâce à sa stabilité contrairement à l'ITO qui peut se brunir et perdre de sa transparence sous un flux d'hydrogène présent dans la phase de dépôt du silicium amorphe. En plus de ses

propriétés électriques et optiques intéressantes, le ZnO présente d'autres avantages liés à son prix d'achat qui n'est pas élevé (par rapport à l'ITO), non toxicité et une température de déposition relativement basse.

Références

Références

- [1]. B.Loic, thèse doctorat « cellules photovoltaïques organiques souples à grandes surfaces », université bordeaux 1, (2008).
- [2]. Henry Mathieu, Physique des Semiconducteurs et des Composants Electroniques, 6ème Edition, DUNOD, 2009
- [3]. Mme Benahmed Benabdallah Nadia. Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe-URMER -Juillet 2006.
- [4]. E. H. Rhoderick et R. H. Williams, "Metal-Semiconductor Contacts" . 2ème édition. Oxford University Press, USA, sept. 1988.
- [5]. S.M.Sze, "Physics of semiconductor devices" ouvrage, Simon M. Sze, Kwok K. Ng, John Wiley and Sons, ISBN: 0470068302, 9780470068304, (2006).
- [6]. Zabardjade Said-Bacar. Elaboration et caractérisations de silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe. Université paris sud -paris xi, 2012.
- [7]. S.gall, « semiconductors for solar cell applications », progression materiel science, (1991), 205-418.
- [8]. Xavier Mellhaoui. Mécanismes physico-chimiques dans le procédé de gravure plasma du silicium. Micro et nanotechnologies/microélectronique. Université d'orléans, 2006.
- [9]. Amal Nadri. Modélisation de la microstructure des grains dans le silicium multicristallin pour le photovoltaïque. Université de grenoble, 2012.
- [10]. Mme Benahmed Benabdallah Nadia, propriétés physiques des semi-conducteurs (si monocristallin et ge) et simulation des cellules solaires à base de si et sige-urmer -juillet 2006.
- [11]. Aberlea. G. Fabrication and characterization of crystalline silicon thin-film materials for solar cells. Thin solid films, 2006, vol. 511-512, pp. 26 – 34.
- [12]. mysmace. Hexabyt.tn.
- [13]. T.M.Mruton et al, « towards 20% efficient silicon solar cell manufactured at 50 mwp of the 3rd world conference on photovoltaic energy conversion, osaka, japan, (2003), 899-902.
- [14]. G.nouet, p .lay, et jl chermant «le silicium polycristallin polix, élaboration, propriétés et performances » laboratoire de cristallographie, chimie et physiques des solides, france (1986, 1987).

- [15]. Sebastien Dubois. Influence des interactions impureté-défaut et impureté-impureté sur le rendement de conversion des cellules photovoltaïques au silicium cristallin. Université paul cézanne aix-marseille iii. 2007.
- [16]. Khaled Amira. Elaboration de nouvelles phases de silicium en couches minces. Université mentouri constantine. 2008.
- [17]. R. C. Chittick, j. H. Alexander, and h.s. Sterling, j. Electrochem. Soc. 116, 77 (1969).
- [18]. Poortmansj. And arkipovv. Thin filmsolar cells, fabrication, characterization and applications. Edition wiley, 2007 england.
- [19]. P. Chabloz, thèse de l'école polytechnique fédérale de lausanne, (1996).
- [20] Y. Veschitto, thèse de doctorat, « Modélisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince », Université louis pasteur Strasbourg I, (2005).
- [21]. M. Bendahan, thèse de doctorat, université aix-marseille iii, (1996).
- [22]. M. C. Carrozza, a. Menciassi, g. Tiezzi and p. Dario, j. Micromech. Microeng. 8,141(1998).
- [23]. Kahina Lagha-Menouer. Etude et réalisation d'une cellule solaire multicouches du type si-sio₂-sno₂-zno par apcvd. Université mouloud mammeri de tizi-ouzou. 2011.
- [24]. P. Krulevitch, a. P. Lee, p. B. Ramsey, j. C. Trevino, j. Hamilton and m. A. Northrup, j. Micro electromechanical systems, 5 (4), 270 (1996).
- [25]. Fellahi Ouarda. Elaboration de nanofils de silicium par gravure chimique assistée par un métal : caractérisation et application en photocatalyse hétérogène de l'oxyde de graphène, du chrome (vi) et de la rhodamine b. Université sétif 1. 2014.
- [26]. W. B. De boer and d.j. Meyer, appl. Phys. Lett. 58, 1286 (1991).
- [27]. T. O. Sedgwick, p. D. Agnello, d. N. Ngoc, t. S. Kuan and g. Scilla, appl. Phys. Lett. 58, 1896 (1991).
- [28]. R. Bisaro, j. Magarino, n. Proust, k. Zellama, j. Appl. Phys. 59 (4), 1167 (1986).
- [29]. T.j. Kamins, a. Fisher – calbrie, appl phys lett. 71 (16), 2322 (1997).
- [30]. Peng Zhang. Développement et fabrication de transistors couches minces verticaux en technologie silicium polycristallin basse température. Electronique. Université rennes 1. 2012.
- [31]. S. Lamine, these de doctorat, "Etude experimental et thermodynamique du procédé de demoulage appliqué au semiconducteurs" Institut national polytechnique de Grenoble, (2008).
- [32]. Photon international mars 2011.
- [33]. W. Smith, « selenium, its electrical qualities and the effect of light thereon », journal of the society of telegraph engineers, vol. 6, no 20, p. 423-441, 1877.

- [34]. D. M. Chapin, c. S. Fuller, et g. L. Pearson, « a new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power », journal of applied physics, vol. 25, no 5, p. 676-677, mai 2004.
- [35]. [Www.puvesources.com](http://www.puvesources.com)
- [36]. Bounouar Malika. Etude de la purification du silicium destiné a la réalisation des cellules photovoltaïques. Université mouloud mammeri de tizi-ouzou.
- [37]. Zouak Belkacem« etude de l'évolution des caractéristique des matériaux thermoélectriques des anciennes et nouvelles générations et application photovoltaïque–thermoélectricité»
- [38]. « La fabrication des cellules photovoltaïques » 2000.
- [39]. W. Chenled, z. Hui, w. Tihu et z. Lili, «solidification interface shape control in a continuous czochralski growth system,» journal of crystal growth, v. 287, p. 252-257, january 25, 2006.
- [40]. N. Oleksiy, «simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïque à contacts arrières interdigites,» thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées, 2005.
- [41]. J. C. Muler, «electricité photovoltaïque: principes»;techniques de l'ingénieur; be8578.
- [42]. S. Gauthier, «cellules solaires photovoltaïque,» université de montréal.
- [43]. Helali Kamelia. Modélisation c'une cellule photovoltaïque : etude comparative. Université mouloud mammeri de tizi-ouzou. 2012.
- [44]. A. Labouret et m. Viloz, «energie solaire photovoltaïque, » paris: dunod 3éme edition, 2009.
- [45]. Ghislain boloma. Développement de composants photovoltaïques organiques et études de la morphologie des couches à l'échelle nanométrique. Universite de limoges. 2013.
- [46]. « thin layer silicon materials on foreign substrates - iness, institut d'électronique du solide et des systèmes ». [en ligne]. Disponible sur: <http://www-iness.c-strasbourg.fr/thin-layer-silicon-materials-on,531>.
- [47]. M. A. Green, k. Emery, y. Hishikawa, w. Warta, et e. D. Dunlop, « solar cell efficiency tables (version 41) », progress in photovoltaics: research and applications, vol. 21, no 1, p. 1–11, 2013.
- [48]. C. S. Tao, j. Jiang, et m. Tao, « natural resource limitations to terawatt-scale solar cells », solar energy materials and solar cells, vol. 95, no 12, p. 3176-3180, 2011.

- [49]. Directive 2006/66/ce du parlement européen et du conseil relative aux piles et accumulateurs ainsi qu'aux déchets de piles et d'accumulateurs et abrogeant la directive 91/157/cee (texte présentant de l'intérêt pour l'eee).
- [50]. J.-m. Tarascon, « le photovoltaïque: principes et filières inorganiques, organiques, hybrides : cours du 2 mars 2011 ».
- [51]. M. A. Green, k. Emery, y. Hishikawa, w. Warta, et e. D. Dunlop, « solar cell efficiency tables (version 43) », progress in photovoltaics: research and applications, vol. 22, no 1, p. 1–9, 2014.
- [52]. Djicknoum diouf. Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière. Faculté des sciences d'orsay, université paris-sud 11. 15 juin 2010.
- [53]. H.mathieu, physique des semiconducteur et des composants électronique, 6^{eme} edition, dunod, (2009).
- [54]. Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière. Thibaut desrues. Ecole doctorale matériaux de lyon, année 2009.
- [55]. Korte L, conrad e, angermann h, stangl r, schmidt m. Overview on a-si:h/c-si heterojunction solar cells – physics and technology. Proceedings of the 22nd european photovoltaic solar energy conference, milano, italie, pages 859-866, 2007.
- [56]. P. Nunes et al/ vaccum, 64 (2002) 281-285.
- [57]. W.j. Shen et al/ journal of physics.d : applied physics, 39 (2006) 269-273.
- [58] : S.A. Studenikin et al/ journal of applied physics, 83 4 (1998) 2104-2109.
- [59]. S. Suh et al/ journal of materials science letters, 20(2001) 115-118.
- [60]. Tania konry, robert s. Marks, thin solid films 492 (2005) 313 – 321.
- [61]. I. Saadeddin, thèse de doctorat, université bordeaux i (2007).
- [62]. G. Giusti, l. Tian, i.p. Jones, j.s. Abell, j. Bowen, thin solid films 518 (2009) 1140–1144.
- [63]. K. Daoudi, thèse de doctorat, université claudes bernard, lyon1 (2003).
- [64]. L. Kerkache, thèse de doctorat d'état, ufas (2006).
- [65]. M. C. Radhakrishna, m. R. Rao, pramāna, vol. 9, no. 1 (1977) 1-6.
- [66]. J.-c. Manificier, l. Szepessy, j. F. Bresse, ni. Perctin, r. Stuck, mat. Res. Bull. 14 (1979) 163-175.
- [67]. M. Purica, e. Budianu, e. Rusu, m. Danila and r. Gavrilă; thin solid films (2002).
- [68]. S. Ponce-alcántara, c. Del cañizo and a. Luque, "integration of silicon nitride layers in Multicrystalline silicon solar cell processes". 21st european photovoltaic solar energy Conference, dresden, germany, (2006).

- [69]. W. Favre, "silicium de type n pour cellules à hétérojonctions : «caractérisations et modélisations", thèse doctorat, université paris-sud11, (2011).
- [70]. C. Leendertz and r. Stangl, "modeling an a-si: h/c-si solar cell with afors-het", isbn 978-3-642-2275, (2012).
- [71]. U.gangopadhyay, s. Roy et al, « comparative simulation study between n-type and p-type silicon solar cells and the variation of efficiency of n-type solar cell by the application of passivation layer with different thickness using afors-het and pcld » ,iosr journal of engineering(iorjen) issn:2250-3021, (2012),41-48.
- [72]. Woong- terials Research Bulletin, Vol. 4Kyo Oh et al, Ma7, pp. 3032 – 3035, 2012.
- [73]. A.F. Aktaruzzaman et al, Thin Solid Films, Vol. 198, pp. 67 – 74, 1991.
- [74]. A. Chen, K. Zhu, SolarEnergy, Vol. 107, pp. 195 – 201, 2014.