

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'Etude de MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Matériaux et Dispositifs Electroniques et Photovoltaïques

Présenté par

DjedjigaLALAM

Thème

Etude et optimisation des cellules solaires en couches minces CdTe/CdS

Soutenu publiquement le 21 /07/2016 devant le jury composé de :

M^r KANNANE president

M^r ATTAF Examineur

M^{lle} Amel SIDI SAID Examinatrice

M^{lle} Dalila Hocine promotrice

Remerciements

Je tiens à exprimer ma grande gratitude envers ma promotrice Mlle Dalila HOCINE, pour avoir dirigé ce travail, je la remercie pour son aide, sa compréhension et ses conseils.

Je remercie également Mlle Samira OUSIDHOUM pour son aide précieuse.

Je remercie sincèrement les membres de jury qui ont accepté aimablement d'examiner et de juger mon travail, je leur fais honneur de respect.

Je tiens également à remercier tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail

Chapitre 1 : Propriétés des matériaux semi-conducteurs II-VI

1. Introduction
2. Les semi-conducteurs II-VI usuels
3. Propriétés structurales et optoélectroniques du tellurure de cadmium (CdTe) :
 - 3.1. Présentation du matériau semi-conducteur CdTe
 - 3.2. La Structure cristalline du CdTe
 - 3.3. Propriétés électriques du CdTe
 - 3.4. Propriétés optiques du CdTe
4. Propriétés structurales et optoélectroniques du Sulfure de Cadmium (CdS)
 - 4.1. Présentation du matériau semi-conducteur CdTe
 - 4.2. La Structure cristalline du Cds
 - 4.2.1. Structure cubique (zinc blende)
 - 4.2.2. Structure hexagonale (wurtzite)
 - 4.2.3. Structure mixte Hexagonale-cubique
 - 4.3. Propriétés électriques du Cds
 - 4.4. Propriétés optiques du Cds
5. Etude du dopage des matériaux II-VI pour applications photovoltaïques
 - 5.1. Conduction semi-conducteur
 - 5.2. Dopage de type n et de type p
 - 5.2.1. Dopage de type n
 - 5.2.2. Dopage de type p
 - 5.3. Dopage des semiconducteurs II-V
 - 5.4. Les techniques de dopage
 - 5.4.1. Dopage par implantation ionique
 - 5.4.2. Dopage par Diffusion thermique
 - 5.4.3. Dopage par technique laser
 - 5.4.4. Dopage par L'épitaxie
6. Intérêts et applications des matériaux II-VI
7. Conclusion

Chapitre 2 : Structure et fonctionnement des cellules solaires conventionnelles

1. Introduction

2. Le spectre solaire

2.1. Généralités

2.2. L'énergie solaire reçue sur Terre

2.3. La propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère

2.3.1. Réfléchi par la surface terrestre

2.3.2. Diffusé

2.3.3. Absorbé par les composants gazeux de l'atmosphère.

3. La conversion photovoltaïque

3.1. Définition

3.2. Principe de fonctionnement

4. structure

4.1. Eléments de base

4.2. Les contacts face avant et face arrière

4.3. Texturation de la surface et couche antireflet

4.3.1. Texturation de la surface

4.3.2. La couche antireflet

5. Fonctionnement des cellules solaires

5.1 Principe de fonctionnement

5.2 Modélisation électrique

5.3 Paramètres Photovoltaïques

5.3.1. Le courant de court-circuit I_{cc}

5.3.2. La tension du circuit-ouvert V_{co}

5.3.3. La puissance maximale P_{max}

5.3.4. Le facteur de forme FF

5.3.5. Le rendement η

6. Conclusion

Chapitre 3 : Etude des cellules solaires à hétérojonctions de type CdTe/CdS

1. Introduction

2. Historique de la première cellule à hétérojonction

3. Fonctionnement physique d'une hétérojonction à l'équilibre thermodynamique

4. la cellule solaire CdTe/Cds

4.1 Définition

4.2 Structure de la cellule solaire CdTe/CdS

4.3 L'hétérojonction CdS/CdTe

4.4 Diagramme des bandes d'énergie de l'hétérojonction CdS/CdTe

5. Méthodes de dépôt des couches

6. Procédé par électrodéposition

7. conclusion

Chapitre 4 : Simulation et optimisation des cellules solaires CdTe/CdS

1. introduction

2. Présentation du logiciel AFORS-HET

2.1 Définition

2.2 Etapes de simulation

3. Les paramètres des couches de la cellule à simuler

3.1 Paramètres de la première couche (Al)

3.2 Paramètres de l'absorbeur (CdTe)

3.3 Paramètres de la couche (Cds)

3.4 Paramètres de la couche antireflet (ITO) : [3]

3.5 Paramètres de la couche antireflet (ZnO)

4. Simulation de la cellule CdTe/Cds

4.1 Effet de la variation de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe sur les performances des cellules à simuler

4.1.1 Influence de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe sur le circuit ouvert V_{co}

a. cellule avec couche antireflet ITO

b. cellule avec couche antireflet ZnO

4.1.2 Influence de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe sur le courant de court-circuit J_{cc}

a. cellule avec couche antireflet ITO

b. cellule avec couche antireflet ZnO

4.1.3 Influence de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe sur le facteur de forme FF

a. cellule avec couche antireflet ITO

b. cellule avec couche antireflet ZnO

4.1.4 Influence de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe sur le rendement η

a. cellule avec couche antireflet ITO

b. cellule avec couche antireflet ZnO

4.2 Effet de la variation du dopage de l'absorbeur CdTe sur les performances des cellules à simuler

4.2.1 Influence du dopage de l'absorbeur CdTe sur le circuit ouvert V_{co}

a. cellule avec couche antireflet ITO

b. cellule avec couche antireflet ZnO

4.2.2 Influence du dopage de l'absorbeur CdTe sur le courant de court-circuit J_{cc}

a. cellule avec couche antireflet ITO

b. cellule avec couche antireflet ZnO

4.2.3 Influence du dopage de l'absorbeur CdTe sur le facteur de forme FF

a. cellule avec couche antireflet ITO

b. cellule avec couche antireflet ZnO

4.2.4 Influence du dopage de l'absorbeur CdTe sur le rendement η

a. cellule avec couche antireflet ITO

b. cellule avec couche antireflet ZnO

5. Etude comparative entre les cellules CdTe/Cds sans et avec couche antireflet

5.1 Diagramme des bandes d'énergies

a. cellule sans couche antireflet

b. cellule avec couche antireflet ITO

c. cellule avec couche antireflet ZnO

5.2 La caractéristique courant-tension I(V)

a. cellule sans couche antireflet

b. cellule avec couche antireflet ITO

c. cellule avec couche antireflet ZnO

6. conclusion

Introduction générale

Introduction générale

Dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude, nous nous intéresserons à l'énergie solaire photovoltaïque faisant partie des énergies renouvelables. Ces dernières sont particulièrement intéressantes vu qu'elles sont inépuisables, propres et ne produisent aucun impact nocif pour l'environnement. De nombreuses filières technologiques existent dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque. Elles se caractérisent aussi bien par les matériaux employés que par le principe de mise en œuvre.

Notre travail sera réalisé par simulation, il consistera à prévoir les caractéristiques de la cellule solaire CdTe/Cds. Pour ce faire, nous allons mettre en œuvre le logiciel AFORS-HET. Nous prendrons en compte plusieurs paramètres tels que l'épaisseur de l'absorbeur CdTe et le dopage.

Dans la première partie nous décrirons les propriétés des matériaux semi-conducteurs II-VI, leur dopage et leurs intérêts et applications.

Dans la deuxième partie, nous aborderons les généralités du photovoltaïque, principes de fonctionnement des cellules solaires leur structure, ainsi que leurs paramètres photovoltaïques.

La troisième partie portera sur l'étude des cellules solaires à hétérojonctions, nous avons présenté également la cellule de type CdTe/Cds et décrit son principe de fonctionnement, sa structure, et les différentes méthodes de dépôt de ses couches.

Dans la quatrième partie nous effectuerons une simulation numérique de la cellule solaire à hétérojonction CdTe/Cds en utilisant le logiciel AFORS-HET (version 2.4.1) développé par l'université de Berlin. Puis nous effectuerons une étude comparative entre les résultats de simulation des cellules solaires CdTe/Cds avec et sans couche antireflet.

Introduction générale

L'énergie solaire photovoltaïque faisant partie des énergies renouvelables est particulièrement intéressante vu qu'elle est inépuisable, propre et ne produit aucun impact nocif pour l'environnement. De nombreuses filières technologiques existent dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque. Elles se caractérisent aussi bien par les matériaux employés que par le principe de mise en œuvre.

Les cellules solaires en couches minces intégrant le tellure de cadmium (CdTe) et le Sulfure de Cadmium (CdS) suscitent un intérêt croissant de la part des scientifiques et industriels motivés par la réduction des coûts de fabrication. De plus cette technologie offre la possibilité d'utiliser une grande variété de substrats peu coûteux comme le verre ainsi que des substrats flexibles. Dans ce travail, on s'intéressera à l'optimisation des cellules solaires en couches minces de type p-CdTe/n-CdS. La partie la plus importante de ce type de cellules solaires est la couche absorbante CdTe, généralement de type P, où les photons ayant une énergie supérieure au gap de ce matériau, sont essentiellement absorbés induisant ainsi la génération de paires électron-trou. Donc cette couche caractérisée par un fort coefficient d'absorption, doit être optimisée afin d'absorber une grande partie du spectre solaire. Pour former l'hétérojonction avec le CdTe dopé P, une couche de CdS dopée de type N est utilisée comme fenêtre transparente dont le rôle est d'assurer le transport des électrons photogénérés. Dans le but d'améliorer le rendement des cellules solaires CdTe/CdS, nous introduisons une couche d'oxyde transparent conducteur (TCO) à base d'ITO ou de ZnO qui servira de contact avant en permettant d'accroître la transmission du rayonnement à travers la cellule solaire. La simulation numérique nous permettra d'optimiser l'épaisseur et le dopage de l'absorbeur CdTe, composant de base de la cellule solaire CdTe/CdS, et d'évaluer l'effet de l'introduction d'un TCO sur la face avant pour de meilleures performances photovoltaïques.

Pour ce faire, notre mémoire est établi en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous décrivons les propriétés structurales et optoélectroniques des matériaux semiconducteurs II-VI, leur dopage. Nous présentons aussi leurs intérêts et applications.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons le principe de la conversion photovoltaïque en présentant les notions de base liées à la structure et fonctionnement des cellules solaires conventionnelles.

Le troisième chapitre est consacré à une étude détaillée des cellules solaires à hétérojonctions de type CdTe/CdS, incluant leur structure, principe de fonctionnement et techniques de fabrication.

Dans le quatrième chapitre, nous effectuons, dans une première partie, la simulation numérique des cellules solaires CdTe/CdS à l'aide du logiciel AFORS-HET en évaluant l'effet de l'introduction d'un TCO en face avant sur leurs caractéristiques électriques.

La deuxième partie concerne l'optimisation de l'épaisseur et dopage de la couche absorbante CdTe afin d'améliorer davantage leur rendement de conversion. Une analyse et interprétation des résultats de simulation est également présentée dans ce chapitre.

Enfin, nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale des perspectives.

Chapitre 1

**Propriétés des matériaux
semiconducteurs II-VI**

1. Introduction

Nous allons dans ce chapitre, présenter les matériaux semiconducteurs II-VI usuels. On présentera les deux matériaux CdS et CdTe, leurs structures cristallines et propriétés électriques et optiques. On parlera ensuite du dopage des matériaux II-VI et les techniques utilisés pour cet effet. O terminera par la présentation des intérêts et applications de ces matériaux.

2. Les semi-conducteurs II-VI usuels

Les semi-conducteurs sont principalement les éléments de la colonne IV du tableau de classification des éléments (Si, Ge), mais aussi des composés II-VI ou IV-VI, ou aussi un mélange de II- IV-VI.

Les semi-conducteurs II-VI sont constitués par l'association des atomes de la colonne II avec ceux de la colonne VI de la table périodique des éléments chimiques comme montré sur le tableau1.

Colonne I A-B	Colonne II A-B	Colonne III B	Colonne IV B	Colonne V B	Colonne VI B	Colonne VII B
Li ³	Be ⁴	B ⁵	C ⁶	N ⁷	O ⁸	F ⁹
Na ¹¹	Mg ¹²	Al ¹³	Si ¹⁴	P ¹⁵	S ¹⁶	Cl ¹⁷
Cu ²⁹	Zn ³⁰	Ga ³¹	Ge ³²	As ³³	Se ³⁴	Br ³⁵
Ag ⁴⁷	Cd ⁴⁸	In ⁴⁹	Sn ⁵⁰	Sb ⁵¹	Te ⁵²	I ⁵³
Au ⁷⁹	Hg ⁸⁰	Tl ⁸¹	Pb ⁸²	Bi ⁸³	Po ⁸⁴	At ⁸⁵

Tableau1 : éléments chimiques du tableau Mendeleïev des colonnes II et VI [1].

Les semi-conducteurs de composés binaires sont constitués de deux éléments inorganiques distincts et représentent une famille de matériaux très étendue. Ils peuvent être constitués de deux éléments de la même colonne IV, d'éléments des colonnes III et V, notés composés III-V ou d'éléments des colonnes II et VI : composés II-VI tels que (CdTe, CdS, CaS, CaSe et SrS) ou encore des composés de type IV-VI.

Pour les atomes II-VI une partie ionique non négligeable qui provient de la différence de nature entre l'élément VI, très électronégatif (anion), et l'élément II (cation) [2].

La liaison II-VI est donc iono-covalente. C'est cette ionicité qui va conférer aux II-VI leurs propriétés remarquables, les bonnes : (forte bande interdite, fortes interactions coulombiennes) comme les moins bonnes : (faible rigidité).

Les propriétés optiques de ces composés leur confèrent diverses applications potentielles dans plusieurs domaines, tel que le photovoltaïque.

3. Propriétés structurales et optoélectroniques du tellurure de cadmium (CdTe)

3.1. Présentation du matériau semi-conducteur CdTe

Le CdTe est un semi-conducteur défini binaire, de la famille (II-VI) de masse molaire 240 g/mole, formé d'un élément métallique, le cadmium ($Z = 48$, $4d^{10}5s^2$) et d'un élément semi-métallique, le tellure ($Z = 52$, $4d^{10}5s^25p^6$). Ce composé possède un numéro atomique élevé qui lui confère un coefficient d'absorption important pour les photons, et une bande interdite de 1,44 eV [3] bien adaptée au spectre solaire. Ces propriétés font de ce matériau un bon candidat non seulement dans le domaine du photovoltaïque, mais aussi pour l'absorption de rayonnements plus énergétiques tels que les rayons X.

3.2. La Structure cristalline du CdTe

Deux structures cristallines sont possibles dans le cas d'un composé binaire : la structure de type hexagonale compacte (wurtzite) et celle de type cubique (blende de zinc).

La structure cristallographique du CdTe est du type zinc-blende. Les atomes de cadmium et de tellure sont disposés selon deux réseaux cubiques à faces centrées (cfc) décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de la diagonale du cube du réseau.

Les nœuds d'un des réseaux cubiques à faces centrées sont occupés par les atomes de cadmium (Cd) tandis que ceux de l'autre réseau sont occupés par les atomes de tellure (Te) (figure I.1). Ainsi, autour de chaque atome d'une espèce, quatre atomes de l'autre espèce sont disposés aux sommets d'un tétraèdre régulier.

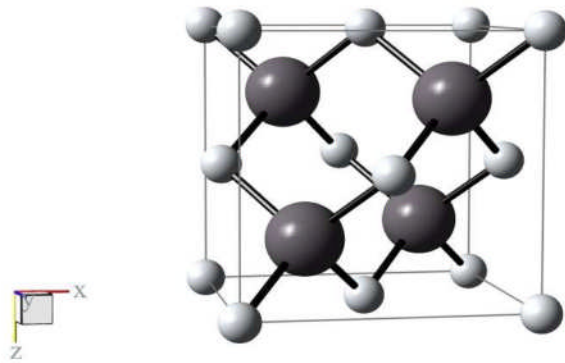


Figure I.1 : Maille élémentaire de la structure cubique de CdTe. Les sphères claires représentent les atomes de cadmium et les sphères foncées ceux de tellure.

3.3. Propriétés électriques du CdTe

La structure de bande du CdTe présente une bande d'énergie interdite (BI) de largeur E_g séparant la bande de valence quasiment remplie d'électrons de la bande de conduction quasiment vide. Le niveau de Fermi noté E_f est défini comme l'énergie à laquelle la probabilité théorique d'occupation par les électrons est de 0,5. Par analogie avec les métaux, ce niveau est identifié avec le travail de sortie électronique $q \Phi_{sc}$ qui correspond à l'énergie minimale nécessaire pour faire passer un électron du solide au vide immédiatement adjacent. La figure I.2 représente les diagrammes énergétiques du CdTe dans les cas d'un matériau intrinsèque, dopé n et dopé p. L'affinité électronique notée χ_{CdTe} , est définie comme la différence d'énergie entre le bas de la bande de conduction et le vide.

Pour un matériau intrinsèque, le niveau de Fermi est situé au milieu de la bande interdite, un dopage de type n le rapproche de la bande de conduction tandis qu'un dopage p le rapproche de la bande de valence.

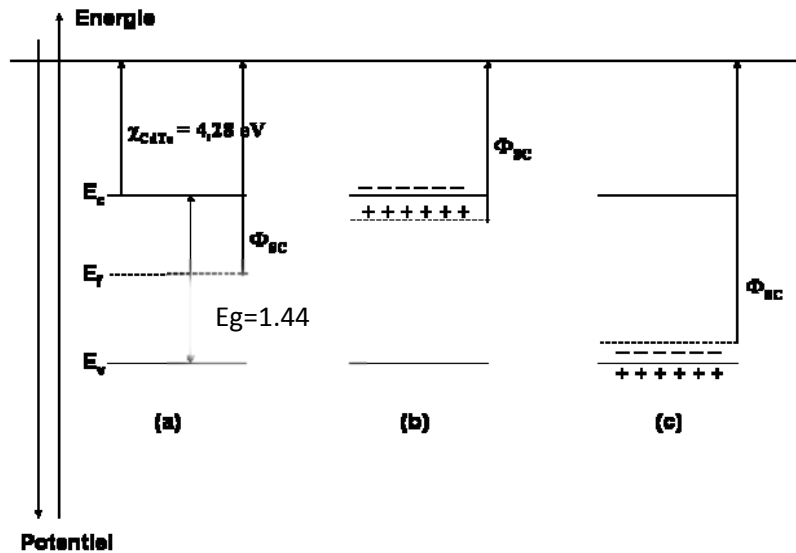


Figure I.2 : Représentation schématique des diagrammes d'énergie dans les cas d'un matériau intrinsèque (a), dopé n (b) et dopé p (c).

Le tableau suivant (tableau 2) résume quelques propriétés électriques du CdTe :

Le gap (E_g)	1.44 eV
L'affinité (X)	4.28 eV
La mobilité des trous	60 à 90 $\text{cm}^2/\text{v.s}$
La mobilité des électrons	800 à 1100 $\text{cm}^2/\text{v.s}$
τ_p	1 μs
τ_n	1 μs
conductivité	P

Tableau 2 : les propriétés électriques du CdTe [3].

3.4. Propriétés optiques du CdTe

Le CdTe a une structure de bande directe, autorisant les transitions optiques. Son indice de réfraction est égal à 2.68. Le tableau suivant (tableau 3) résume quelques propriétés optiques du CdTe :

indice de réfraction	2.68
Constante diélectrique optique	7.15
Constante diélectrique statique	10.03

Tableau 3 : les propriétés optiques du CdTe [3].

4. Propriétés structurales et optoélectroniques du Sulfure de Cadmium (CdS)

4.1. Présentation du matériau semi-conducteur CdS

Le CdS, appartenant au groupe II-VI est un semi-conducteur important de type n qui a, à température ambiante, une résistivité électrique assez élevée permettant de l'utiliser comme une couche tampon très mince dans les cellules solaires photovoltaïques poly cristallines bien connues tels que, CdTe et CIGS. La structure de la cellule solaire basée sur le CdS montre une meilleure captivité optique et des rendements élevés [4].

Ses structures électroniques fondamentales sont les suivantes :

Cd: [Kr] 4d¹⁰ 5s²

S: [Ne] 3s² 3p⁴ [5].

4.2. La Structure cristalline du CdS

Le sulfure de cadmium peut prendre deux structures cristallographiques hexagonal (Wurtzite) plus stable on le trouve dans le minéral Greenockite et cubique (zinc blende) trouvé dans le minéral Hawleyite (figure I.3), ou même une structure mixte Hexagonal / Cubique, et ceci selon les conditions de dépôt.

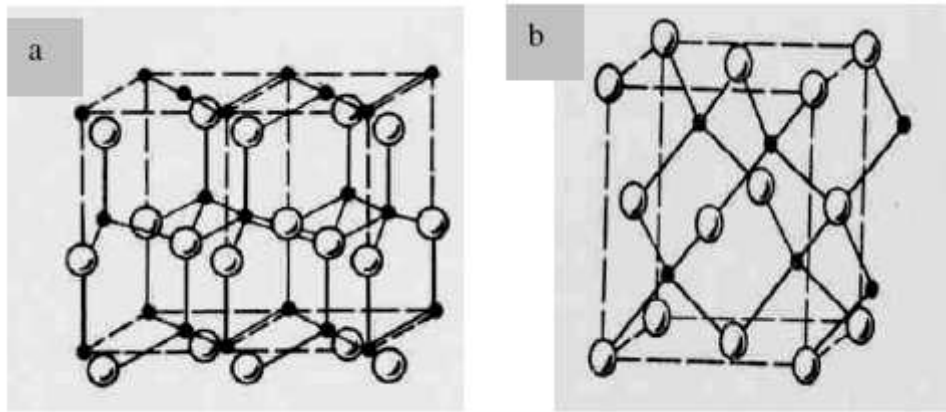


Figure I.3: (a) structure hexagonale (wurtzite) et (b) structure cubique (zinc blende) des composés II-VI. Le cercle rond en noir indique le site occupé par l'atome métallique [6].

a. structure hexagonale :

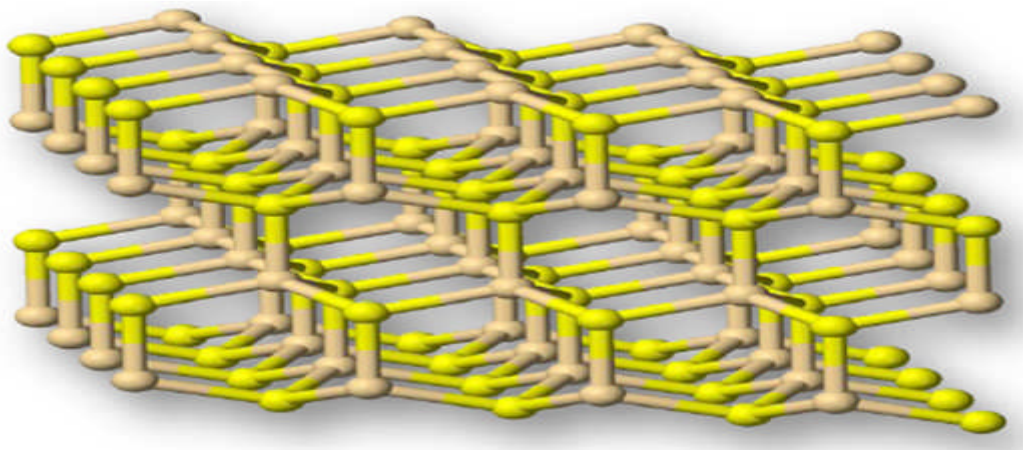


Figure I.4 : structure GRRENOCKITE

Greenockite est un cristal hexagonal, jaunâtre, un minéral rare et le seul existant dans la nature source de cadmium. Il est très intéressant par sa couleur et la beauté de son cristal. Il a la même structure que celui de sulfure de zinc Wurtzite. La structure de Greenockite est composée de tétraèdres (figure I.4) [7].

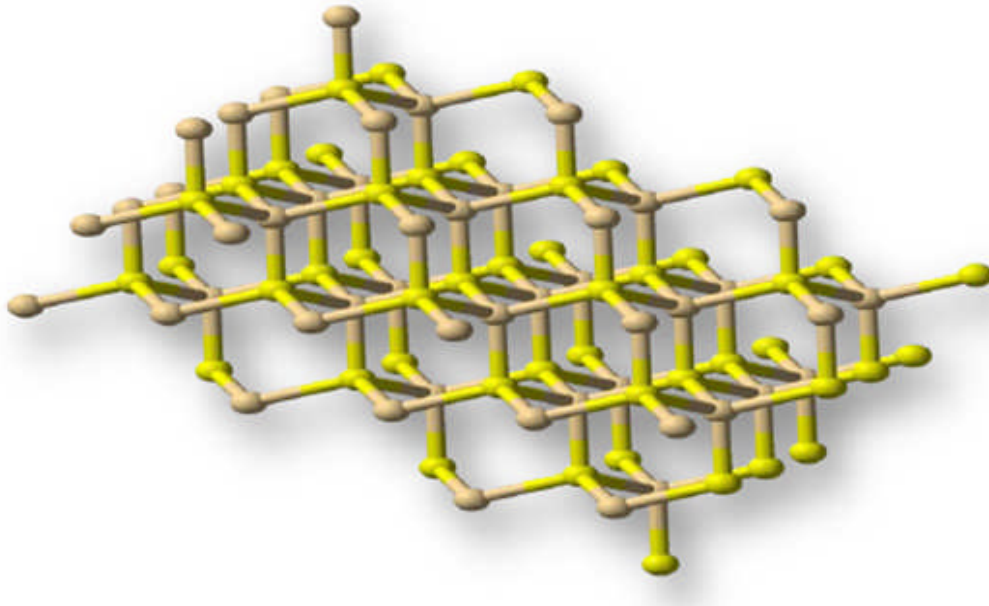
b. structure cubique :

Figure I.5 : structure HAWLEYITE

Hawleyite cubique, autre polymorphe de sulfure de cadmium, est un minéral de sulfure rare dans le groupe de la sphalérite, dimorphe et facilement confondu avec greenockite.

Ce sulfure de cadmium, se produit comme un revêtement jaune vif sur la sphalérite ou sidérite dans les vacuoles, déposé par les eaux météoriques, la (figure I.5) montre la structure HAWLEYITE.

4.3. Propriétés électriques du CdS

Le CdS est un semiconducteur de type n, son large gap direct le rend le matériau le plus utilisé pour les applications électroniques et optoélectroniques [6].

On rappelle que les structures électroniques du soufre et du cadmium sont:

Cd: [Kr] 4d¹⁰ 5s²

S: [Ne] 3s² 3p⁴

Les états 3p de Sulfure forment la bande de valence, les états 5s de Cadmium constituent la zone de conduction. Le CdS est un semi-conducteur de type n, son large gap direct le rend le matériau le plus utilisé pour les applications électroniques et optoélectroniques.

La nature de substrat influe sur la valeur de la résistivité. Cependant, la résistivité des films CdS déposés sur des substrats en ITO est plus élevée que celle des films déposés sur des substrats en verre [16].

Le tableau suivant (tableau 4) résume quelques propriétés électriques du CdS :

Le gap	2.4 eV
L'affinité électronique	4.79 eV
La mobilité des trous	40 cm ² /v.s
La mobilité des électrons	350 cm ² /v.s

Tableau 4 : les propriétés électriques du CdS [3].

4.4. Propriétés optiques du CdS

Les propriétés optiques les plus généralement rapportées sont : la transmission optique, avec quelques études également sur la photoluminescence. Tous les films CdS ont une transparence optique très élevée (en général entre 60 et 90%), dans les régions visibles du spectre solaire (520-850) nm, ce qui permet de les utiliser comme des couches fenêtres dans les cellules solaires [17]. Cependant, ces films sont uniformes, ont une forte adhérence et une excellente transmission dans le spectre visible [18]. La transmission est une fonction de l'épaisseur, du gap, et de la structure de film [19].

La nature du substrat joue un rôle important sur la transmission optique. *Jae. Lee* [20] a trouvé une transmission élevée dans le visible pour les films du CdS déposés sur le verre. La moyenne de la transmission pour les films déposés sur le (PC) polycarbonate et le (PET) polyéthylène téréphtalate est autour de 50 et 55% respectivement. Elle augmente jusqu'à 70% pour les substrats de verre.

Le changement de la synthèse de déposition de CdS a un effet aussi sur la taille et la forme de la structure de CdS et donc de l'énergie de gap [21].

Le CdS en couche mince est un matériau à gap optique direct, sa valeur est de 2,4 eV [3].

L'indice de réfraction de couche mince CdS est 2,59 [3].

5. Etude du dopage des matériaux II-VI pour applications photovoltaïques

5.1. Conduction semi-conducteur

Un semi-conducteur est un solide cristallin dont les propriétés de conduction électrique sont déterminées par deux bandes d'énergie particulières : d'une part, la bande de valence, qui correspond aux électrons impliqués dans les liaisons covalentes ; d'autre part, la bande de conduction, comprenant les électrons dans un état excité, qui peuvent se déplacer dans le cristal [22].

Ces deux bandes sont séparées par un gap, une bande interdite que les électrons ne peuvent franchir que grâce à une excitation extérieure (par exemple, l'absorption d'un photon). La bande interdite correspond à une barrière d'énergie.

Les électrons présents dans la bande de conduction permettent la conduction du courant. La conduction du courant peut être considérée de façon tout à fait équivalente en termes de trous d'électron se déplaçant dans la bande de valence.

Il y a deux types de semi-conducteur :

- Un semi-conducteur intrinsèque, ou pur, il n'y a aucun atome dopant. Tous les électrons présents dans la bande de conduction proviennent donc de la bande de valence.
- Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques lui conférant des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques et optoélectroniques.

5.2. Dopage de type n et de type p

Il existe deux types de dopage :

5.2.1. Dopage de type n

Un semi-conducteur type n est un semi-conducteur intrinsèque dans lequel on a introduit des impuretés de type donneurs. On dit que le semi-conducteur est dopé n (figure I.6).

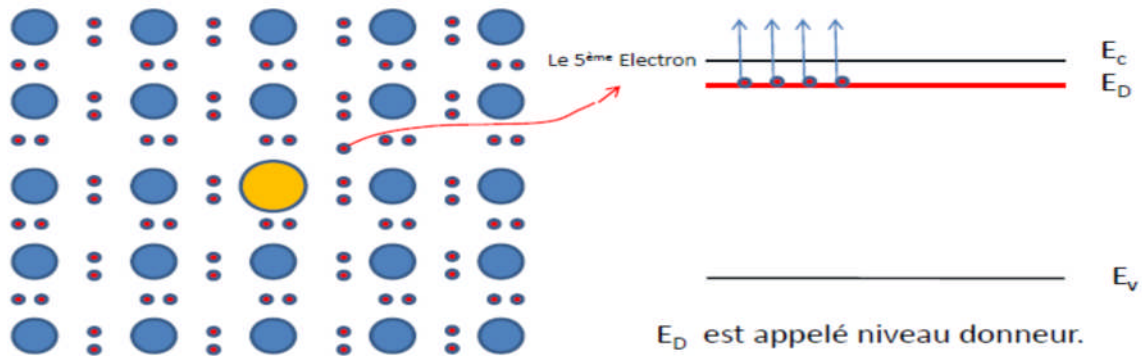


Figure I.6: Dopage de type n

Les matériaux ainsi formés sont appelés semi-conducteurs de type N parce qu'ils contiennent un excès d'électrons négativement chargés.

5.2.2. Dopage de type p

Ce sont les semi-conducteurs dans lesquels nous avons introduit volontairement des impuretés de type accepteur. On dit que le semiconducteur est dopé p (figure I.7).

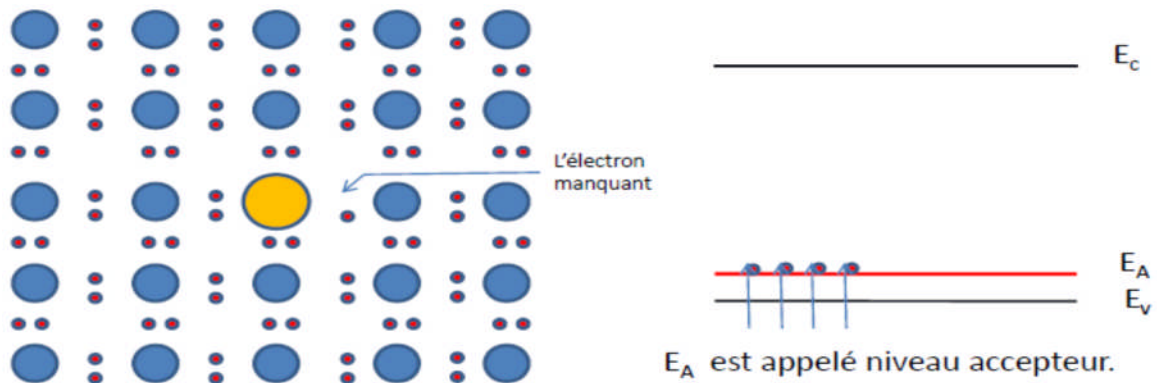


Figure I.7: Dopage de type p

Dans Semi-conducteurs de type P : Les trous sont dits majoritaires et les électrons minoritaires.

5.3. Dopage des semiconducteurs II-V

Le dopage peut être réalisé de deux manières différentes : la première consiste à introduire dans le matériau des impuretés possédant soit un ou plusieurs électrons excédentaires (dopage de type n) soit un ou plusieurs électrons de valence en moins (dopage de type p). Dans le premier cas un niveau donneur ED à une énergie proche du bas de la bande de conduction est créé.

Dans le deuxième cas, un niveau accepteur EA est formé au voisinage de la bande de valence.

5.4. Les techniques de dopage

5.4.1. Dopage par implantation ionique

Le dopage par implantation ionique consiste à accélérer des impuretés ionisées avec un champ électrique, afin de leur conférer l'énergie nécessaire pour rentrer dans le matériau à doper. Cette méthode permet d'utiliser une grande variété d'éléments dopants. Le faisceau mono-énergétique et la chambre sous vide rendent possible une grande reproductibilité et des dopages localisés.

L'implanteur est en pratique un accélérateur d'ions.

➤ **Intérêt de cette technique**

- Elle permet un contrôle précis de la quantité totale d'atomes implantés (dose d'implantation) et du profil de concentration du dopant.
- L'implantation se réalise à basse température.

➤ **Inconvénients**

- Le bombardement d'un monocristal par des atomes crée des dommages dans la structure cristalline implantée.

5.4.2. Dopage par Diffusion thermique

La technique de diffusion thermique a longtemps été la seule méthode utilisée dans les dopages localisés. Elle consiste à faire diffuser à partir de la surface un dopant amené dans une phase vapeur, la distribution en impureté obtenue est différente de celle obtenue par

implantation ionique, la concentration en impuretés diminue régulièrement à partir de la surface.

A température ambiante, le phénomène de diffusion sera très important dans un milieu gazeux, plus faible dans un milieu liquide et pratiquement nul dans un milieu solide. Pour obtenir un phénomène de diffusion dans un solide ou un cristal, il faudra chauffer le matériau à des températures voisines de 1000°C [23] comme le montre la figure I.8.

Le dopant peut être obtenu à partir :

- D'une source solide : l'échantillon à doper est placé dans le four en face d'un composé solide contenant le dopant. L'atome dopant est alors transporté jusqu'à l'échantillon par un gaz vecteur inerte, à partir du composé solide qui se sublime.
- D'une source liquide : le gaz vecteur barbote dans le liquide ou frôle sa surface à une température choisie. La pression partielle du composé dans le gaz est égale à la tension de vapeur du liquide.
- D'une source gazeuse : le gaz contenant l'espèce dopante est introduit dans le four.

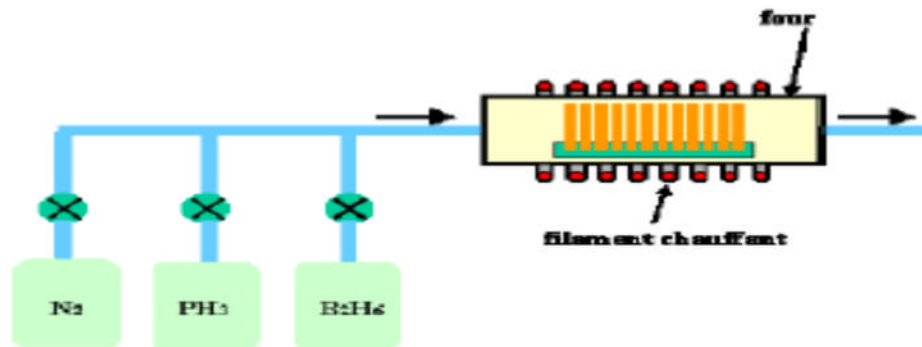


Figure I.8 : Diffusion dans un four à partir de sources gazeuses. Les gaz dopants sont entraînés par un gaz porteur neutre, tel que l'azote [24].

5.4.3. Dopage par technique laser

Un laser induit un cycle de fusion/solidification très rapide (de l'ordre de 10^{-8}S) durant lequel le dopant est diffusé dans la phase liquide. La vitesse de diffusion du dopant étant très rapide en phase liquide et négligeable en phase solide, la répétition de ce processus permet d'obtenir une densité de dopants supérieure aux limites de solubilité obtenues avec les techniques classiques.

5.4.4. Dopage par L'épitaxie

L'épitaxie est une étape technologique consistant à faire croître du cristal sur du cristal. La technique donc consiste à utiliser le substrat comme germe cristallin de croissance et à faire croître la couche par un apport d'éléments constituant la nouvelle couche. La couche épitaxiée peut être dopée ou non dopée.

Il existe plusieurs techniques d'épitaxie :

- L'épitaxie par jet moléculaire ;
- L'épitaxie en phase liquide ;
- L'épitaxie en phase vapeur.

6. Intérêts et applications des matériaux II-VI

Jusqu'à présent, les applications des matériaux semiconducteurs II-VI se focalisent principalement sur les détecteurs des radiations dans la région proche infrarouge, ce qui est particulièrement intéressant, puisque la grande partie des émissions de radiation thermiques est dans cette région pour un large intervalle de température.

Un semiconducteur de cette classe de matériaux, est le CdS, qui possède de bonnes propriétés photoélectriques.

Les matériaux II-VI luminescent tous dans le visible (à l'exception des semi-métaux HgSe et HgTe et ce, à cause de l'atome lourd de mercure ($Z = 80$) : du rouge avec le CdTe à l'infrarouge grâce à l'incorporation de mercure (en se servant du fait que le CdTe et le HgTe aient quasiment le même paramètre de maille, respectivement de 6, 480 °Å et de 6, 460 °Å). C'est en particulier dans l'infrarouge que les tellures ont trouvé leur principales applications (militaires). Quant au visible, les récentes diodes électroluminescentes LED vertes à base de ZnTe [25,26] et les diodes lasers jaune-vertes à base de ZnSe [27] conquièrent un marché encore vierge puisqu'au contraire du rouge et du bleu il n'existe pas encore de diodes lasers commercialisées dans la gamme des 550 ~ 590 nm.

Les semiconducteurs II-VI sont aussi des matériaux très prometteurs pour la fabrication des cellules solaires tels que le CdS et le CdTe, à cause de la bonne adaptation de la bande interdite qui se situe au milieu du spectre solaire. Des efficacités de conversion de l'ordre de 20.4% - 21% en laboratoire [28,29] sont régulièrement atteintes avec les cellules CdS-CdTe, qui concurrencent les autres matériaux prometteurs comme CuInGaSe₂ (20.5%) ou le silicium

amorphe (13.4%). Une couche mince de CdTe avec une épaisseur d'environ de 2 μm absorbera presque 100% du rayonnement solaire incident [30].

7. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les propriétés générales des semiconducteurs de la famille II-VI et particulièrement le Cds et CdTe, qui possèdent une multitude d'applications technologiques telles que: la fabrication des cellules solaires, des LEDs des détecteurs infrarouges, grâce à leurs propriétés variées (structurales, électriques, optiques....)

- [1] Elaboration et caractérisation de couches minces CdS par bain chimique CBD pour application photovoltaïque, Thèse de doctorat présentée par Mme BENGHABRIT Siham le 24/06/ 2015 Pour l'obtention du diplôme de doctorat LMD en physique, université « Mohamed BOUDIAF » d'Oran.
- [2] J. C. Phillips, Rev. Mod. Phys. 42, 317 (1970).
- [3] (H)
- [4] http://www.unilim.fr/theses/2003/sciences/2003limo0056/these_notes.html.
- [5] Elaboration et caractérisation de nanocristaux de sulfure de cadmium - dépôt en couches minces nanostructurées, le 8 novembre 2012, Thèse de doctorat présentée par Mathieu FREGNAUX en vue d'obtenir le grade de Docteur de l'Université de Lorraine.
- [6] « élaboration et caractérisation de couches minces de sulfure de cadmium (cds) », thèse présentée pour obtenir le diplôme de doctorat en sciences par Hassiba MOUALKIA le 23/05/2010.
- [7] A.Kergommeaux, Synthèse de nouveaux types de nanocristaux semi-conducteurs pour application cellule solaire, Grenoble: Université de Grenoble, (2013).
- [8] G. Hodes, « Chemical Solution Deposition of Semiconductor Film » Marcel Dekker.Inc. 2002.
- [9] T. Nakanishi, and K. ITO, Technical Digest of the International PVSEC, 7 (Nagoya, Japan, PP 11- 12, (1993) 431.
- [10] R. Castro- Rodriguez, A. I. Oliva, V. Sosa, F. Caballero- Briones, J. L. Pena- Appl. Surf. Sci. 161, (2000) 340.
- [11] Y. Liu, T. Tang, B. Wang, R. Zhai, X. Song, E. Li, H. Wang, H. Yan, Journal of Colloid and Interface Science 320 (2008) 540.
- [12] Jae-Hyeong Lee. Thin Solid Films 515 (2007) 6089.
- [13] Peter. C. Reike and Susan, B. Bentjen. Chem. Mater. 5, (1993) 43.
- [14] A. Mondal, T. K. Chandhuri, P. Pramanik, Sol. Energy Mater. 7, (1983) 431.

- [15] Natalia S. Kozhenikova, Andrey A. Rempel, Frank Hergert, Andreas Magerl. *Thin Solid Films* 517 (2009) 2586.
- [16] J Emerson-Reynolds. *J. Chem. Soc.* 45 (1884) 162.
- [17] M. S. Aida. Cours post graduation (2005).
- [18] [http://fr.Pulsed/Laser/Deposition \(PLD\)5.mht](http://fr.Pulsed/Laser/Deposition (PLD)5.mht).
- [19] http://fr.wikipedia.org/wiki/Ablation_laser.
- [20] J.-H. Lee, *Thin Solid Films* 515, p. 6089. (2007).
- [21] C. D. Gutierrez, *Journal of the Electrochemical Society*, pp. D 158- D 162, (2008).
- [22] J.L. SANTAILLER «Croissance de monocristaux de ZnO: état de l'art », Journée thématique INP Grenoble - Minatec, (2007).
- [23] K.DJERIOUAT, « Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions : GaInP/GaAs », Thèse de Magister, Université Tlemcen, (2010).
- [24] K.DJERIOUAT, «Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions : GaInP/GaAs », Thèse de Magister, Université Tlemcen, (2010).
- [25] Rolf Enderlein, NommJ. M. Horing, "Fundamentals of Semiconductor Physics and Devices", World Scientific Publishing (1997) ISBN 981-02-2387-0.
- [26] J.H. Chang, J.S. Song, K. Godo, M.Y. Shen, T. Goto, T. Yao, *Appl. Phys. Lett.* 78 (2001) 566-568.
- [27] M. Klude, G. Alexe, C. Kruse, T. Passow, H. Heinke, D. Hommel, *Phys. Stat. Sol. (b)* 229 (2002) 935-942.
- [28] C. Walkons, B. Guralnick, B. M. Candless and R. Birkmire, *IEEE*, 1567 (2014).
- [29] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta and E. D. Dunlop, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 23, 1 (2015).
- [30] C. S. Ferekides, U. Balasubramanian, R. Mamazza, V. Viswanathan, H. Zhao, D. L. Morel, *Solar Energy* 77, 823 (2004).

Chapitre 2

**Structure et fonctionnement des
cellules solaires conventionnelles**

1. Introduction

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839. Ce phénomène physique correspond à l'apparition d'une tension entre deux électrodes séparées par un solide ou un liquide lorsqu'il est éclairé par une lumière incidente [31].

Einstein expliqua en 1912 les mécanismes à l'origine de ce phénomène, mais il faudra attendre l'année 1954 pour voir apparaître la première cellule photovoltaïque (Bell Laboratories) fabriquée à partir de silicium cristallin avec un rendement de 6 %.

Le développement des programmes spatiaux a ensuite entraîné une demande de cellules solaires à base de semi-conducteurs comme le silicium, qui sont rapidement devenues des sources incontournables d'énergie pour l'alimentation des satellites.

Les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille, mais il faudra attendre la crise énergétique de 1970 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

2. Le spectre solaire

2.1. Généralités

Le Soleil est une boule de 7×10^5 km de rayon, soit environ 110 fois celui de la Terre !

Au cœur, la température est de l'ordre de 15 millions de degrés. L'énergie produite doit traverser plusieurs couches jusqu'à la photosphère : la température n'y est plus que d'environ 6 000 °C. Mais c'est cette fine couche gazeuse qui émet la lumière du soleil.

Le rayonnement solaire qui arrive au sol se décompose en deux parties : L'une provient directement du soleil (direct), l'autre a été diffusée par l'atmosphère (diffusée). L'atmosphère et la terre possèdent également un rayonnement propre. La connaissance de ces divers rayonnements permet d'établir un bilan radiatif du système terre- atmosphère.

2.2. L'énergie solaire reçue sur Terre

La Terre est située à 150 millions de km du Soleil. Celui-ci émet en permanence 1026 Watt sous forme de rayonnement et la Terre reçoit 178 millions de milliard de Watt sur sa face

éclairée soit 350 Watt par m² à l'équateur. Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique composé essentiellement (figure II.1) :

- de lumière visible de longueur d'onde comprise entre 400 nm et 800 nm ;
- de rayonnement ultraviolet (UV) de longueur d'onde inférieure à 400 nm ;
- de rayonnement infrarouge de longueur d'onde supérieure à 800 nm.

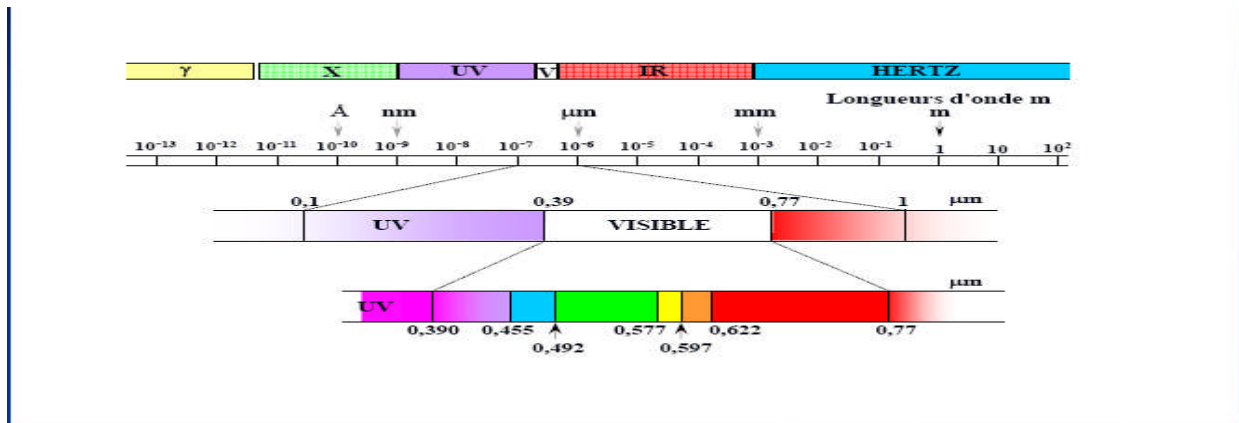


Figure II.1 : les longueurs d'onde de la lumière.

Sur Terre, l'atmosphère (via le dioxyde de carbone, l'ozone, la vapeur d'eau...) absorbe en grande partie les IR et les UV et un peu la lumière visible. Ainsi plus l'épaisseur d'atmosphère traversée est importante, plus la quantité d'énergie solaire reçue par le sol est faible. Quand on se rapproche des pôles, les rayons sont plus inclinés : la même quantité d'énergie se répartie sur une plus grande surface. C'est pourquoi le rayonnement solaire par unité de surface reçu diminue de l'équateur vers les pôles (ceci, avec l'inclinaison de l'axe de la Terre, est à l'origine du phénomène des saisons). L'énergie solaire est également réduite:

- par l'alternance des jours et des nuits ;
- par la couverture nuageuse (celle-ci réduit à 50 % l'énergie solaire) ;
- par la variation saisonnière.

2.3. La propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère

Lorsque le rayonnement solaire se propage dans l'atmosphère, il interagit avec les constituants gazeux de celle-ci et avec toutes les particules présentes en suspension (aérosols, gouttelettes d'eau et cristaux de glace). Les particules dont on parle ici ont des dimensions variant du centième de μm à quelques centaines de μm .

Le rayonnement solaire peut être réfléchi, diffusé ou absorbé.

2.3.1. Réfléchi par la surface terrestre :

C'est-à-dire renvoyé dans une direction privilégiée (réflexion dite spéculaire) ou de manière diffuse. Le sol réfléchit plutôt le rayonnement de manière diffuse et anisotrope.

2.3.2. Diffusé :

C'est-à-dire renvoyé dans toutes les directions. Le phénomène de diffusion se produit dans un milieu contenant de fines particules ou des molécules et dépend fortement de la taille des particules considérées. Par exemple, l'influence des molécules est plus intense pour les courtes longueurs d'onde (bleu) que pour les grandes (rouge), en raison de la loi de diffusion de Rayleigh en λ^{-4} , où λ est la longueur d'onde. C'est la raison pour laquelle la voûte céleste apparaît en général bleue et le Soleil couchant rougeâtre (les rayonnements violet et bleu ayant été diffusés). Les molécules diffusent la lumière dans toutes les directions; cependant, deux directions sont privilégiées : la diffusion avant et la diffusion arrière. Pour les particules les plus grosses (cas des gouttelettes de nuages), la diffusion se fait majoritairement en avant.

2.3.3. Absorbé par les composants gazeux de l'atmosphère :

Cette absorption est dite sélective, car elle s'opère pour des valeurs de longueur d'onde bien précises. Elle est due essentiellement à la vapeur d'eau, à l'ozone, au dioxyde de carbone et, à un degré moindre, à l'oxygène. On appelle rayonnement solaire direct celui qui arrive au sol sans avoir subi de diffusion. Le spectre du rayonnement solaire direct reçu à la surface terrestre s'éloigne de façon notable du rayonnement atteignant la limite supérieure de l'atmosphère, en particulier du fait de l'absorption par les constituants gazeux de l'atmosphère. Dans certaines bandes de longueur d'onde, le rayonnement est atténué ou même annulé. Les principales bandes d'absorption sont dues à l'ozone entre 0,2 et 0,3 μm (dans le domaine ultraviolet), au dioxyde de carbone autour de 2,75 μm et 4,25 μm , mais surtout à la

vapeur d'eau dont l'absorption est prépondérante (en particulier autour de 0,9 μm , de 1,1 μm , de 1,4 μm , de 1,9 μm , de 2,4 à 2,9 μm et de 3 à 4 μm) et qui module principalement l'allure du spectre solaire reçu au sol.

3. La conversion photovoltaïque

3.1. Définition

La conversion photovoltaïque peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique [32].

Cela est possible grâce par exemple à des cellules solaires réalisées en associant un matériau semi-conducteur dopé N à un autre semi-conducteur dopé P.

3.2. Principe

L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque (figure II.2).

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semi-conducteurs pour récolter les paires électron-trou créées par la collision des photons dans le matériau. Cependant, selon le matériau utilisé, le nombre de photons utiles (qui peuvent être absorbés) diffère.

Le fait d'avoir associé deux types de matériaux pour créer une jonction permet récupérer les charges avant que ces dernières ne se soient recombinées dans le matériau qui redevient alors neutre. La présence de la jonction PN permet ainsi de maintenir une circulation de courant jusqu'à ses bornes.

Le nombre de photons par unité de longueur d'onde est une donnée à connaître pour les applications photovoltaïques pour estimer l'énergie totale disponible. La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650 – 670 nm.

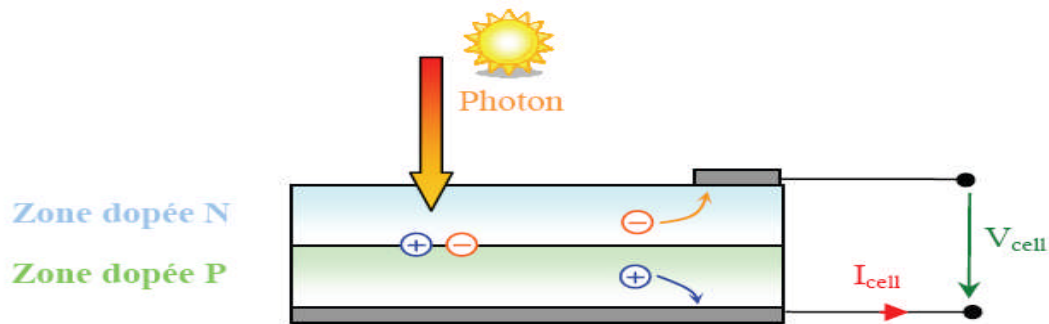


Figure II.2 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique [33].

La conversion photovoltaïque repose donc sur trois principes :

- L'absorption de photons ;
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres ;
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique.

4. Structure des cellules solaires

4.1. Eléments de base

On considère que la cellule photovoltaïque de base est constituée d'une ou plusieurs couches actives entourées par des électrodes. La cellule photovoltaïque est le siège de la photo-excitation, de la création d'excitons et du transport de charges aux électrodes. Pour ne pas nuire à l'un de ces mécanismes, chaque couche de l'empilement doit vérifier certains critères. La première chose à vérifier est que la lumière incidente ne soit pas absorbée dans les premières couches avant d'atteindre la couche active. La cellule solaire à homojonction à base de silicium est formée de plusieurs couches :

- Une grille collectrice avant ;
- Une couche de Si dopée N ;
- Une couche de Si dopée P ;
- Une couche conductrice.

La figure suivante (figure II.3) montre le schéma de principe d'une cellule solaire.

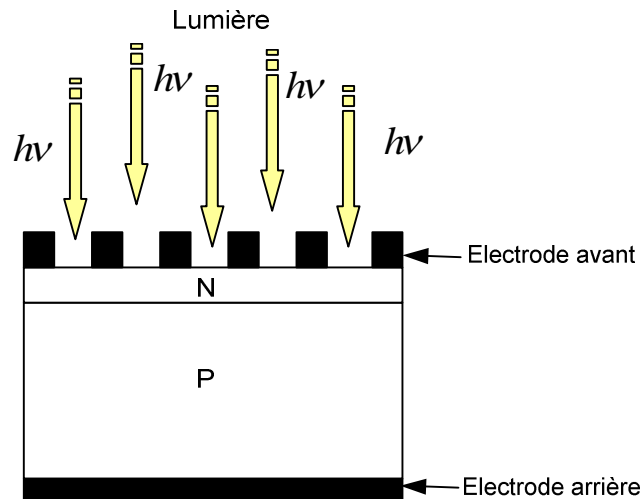


Figure II.3 : Schéma de principe d'une cellule solaire.

4.2. La couche active

Elle est constituée de deux semi-conducteurs de types différents (N) et (P), pour créer la jonction PN qui est le principe de base de la cellule solaire. La création d'une barrière de potentiel dans le semi-conducteur permet de séparer les électrons et les trous qui sont générés par l'absorption de lumière dans le matériau. Lors de la formation de la jonction, les électrons diffusent vers la zone P et les trous vers la zone N, afin de tendre vers un équilibre thermodynamique.

4.3 Les contacts face avant et face arrière

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photo-générés vers le circuit externe. Pour assurer efficacement ce rôle, les contacts doivent être ohmiques. De mauvais contacts, c'est à dire entraînant une forte résistance série, auront essentiellement une répercussion sur le facteur de forme de la cellule et sur le courant récupéré.

4.4. Texturation de la surface et couche antireflet

Les premières cellules étaient constituées seulement d'une jonction diffusée (émetteur) et d'un contact ohmique. Mais leur architecture a ensuite évolué, en effet, la texturation de surface, et l'usage d'une couche antireflet ont permis l'augmentation de leur rendement.

4.4.1. Texturation de la surface

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturation 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 (figure II.4). Le relief créé permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides. La texturation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

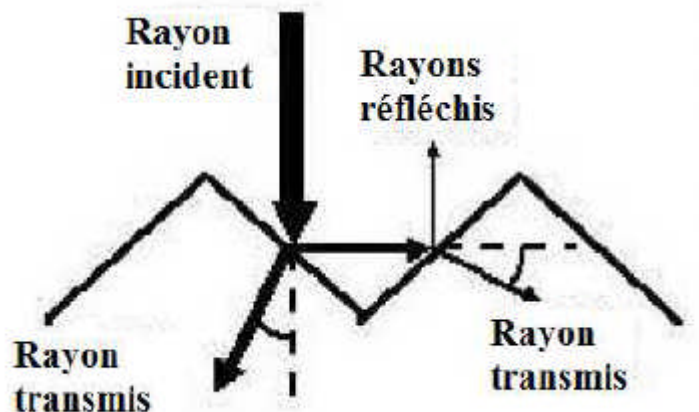


Figure II.4 : Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée [34].

4.4.2. La couche antireflet

La texturation de la surface de la cellule permet de limiter les réflexions en face avant. Pour réduire encore plus la réflexion, une couche antireflet est ajoutée. L'indice et l'épaisseur de cette couche sont ajustés pour obtenir une lame quarte d'onde, l'objectif étant de minimiser le coefficient de réflexion de la cellule en créant des interférences destructives.

5. Fonctionnement des cellules solaires

Une cellule solaire 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 par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- Collection des particules générées dans le dispositif [35].

5.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une cellule solaire repose sur l'effet photoélectrique, découvert par A. Becquerel en 1835 et expliqué par A. Einstein en 1905 [36]. Il s'agit de l'absorption de photons par un matériau, qui convertit cette énergie lumineuse en énergie électrique.

Les photons absorbés créent des paires électron-trou, les porteurs de charges ainsi photo-générés sont ensuite séparés et collectés vers un circuit extérieur.

Dans la cellule solaire, la séparation des porteurs de charges se fait grâce à la jonction PN (Figure II.5). Il s'agit de la juxtaposition de semi-conducteur avec un excès de trous (ou un défaut d'électrons) dû au dopage, le semi-conducteur type p, avec du semi-conducteur de type n, qui comporte un excès d'électrons. Ces deux zones forment respectivement la base et l'émetteur de la cellule. La juxtaposition des zones p et n forme un champ électrique, qui repousse les électrons vers la zone n et les trous vers la zone de type p.

A la jonction de ces deux parties, il y a alors une déplétion en porteurs de charge, c'est la zone de charge d'espace (ZCE). Lors de l'absorption d'un photon, un électron de la bande de valence du semi-conducteur va être excité et se retrouver en bande de conduction, laissant un défaut d'électron dans la bande de valence. Deux porteurs de charge mobiles sont donc générés, l'électron et le trou. Si cela se produit hors de la ZCE, les porteurs minoritaires (électrons dans le type p et trous dans le type n) vont diffuser dans le matériau jusqu'à se recombiner ou arriver à la ZCE. Si un porteur se trouve dans la ZCE, que ce soit parce qu'il y a été généré ou qu'il s'est déplacé jusque-là, le champ électrique le poussera vers la zone où il sera majoritaire : les électrons vers la zone n et les trous vers la zone p. Les charges sont ensuite collectées par des contacts métalliques sur les faces avant et arrière de la cellule. Un courant est ainsi généré par la cellule.

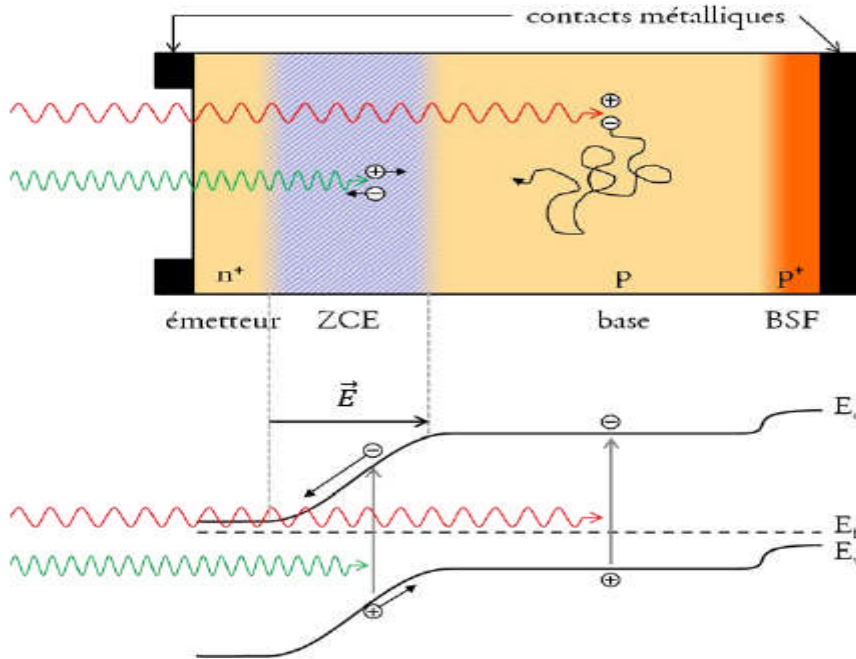


Figure II.5 : Schéma d'une cellule solaire (haut) et schéma de la structure de bandes correspondant (bas) [37].

- Le premier phénomène est donc l'absorption optique de photons par un matériau semi-conducteur approprié dans la partie la plus intense du spectre solaire [38].

Si l'on prend un semi-conducteur à grand gap, l'absorption sera limitée aux petites longueurs d'onde, dans l'ultra-violet, alors que la partie la plus importante du spectre solaire se situe dans le visible et le proche infrarouge. Pour absorber un maximum de photons, il faudrait donc un semi-conducteur possédant un petit gap. Mais alors la tension de sortie, proportionnelle au gap, et donc la puissance de la photopile ($P = I \cdot V$), seraient trop faibles pour exploiter cette pile. La valeur optimale du gap du matériau utilisé comme absorbeur se situe vers 1,5 eV [réf].

- Le second, c'est la séparation rapide des électrons et des trous avant leur recombinaison.
- Quant au troisième, c'est l'entraînement des électrons et des trous vers les électrodes collectrices (collecte des porteurs).

5.2 Modélisation électrique

Le circuit équivalent d'un système électrique est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, etc.).

A l'obscurité; une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s . Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité, la caractéristique I-V peut être représentée par la relation suivante :

$$I_{obs} = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

Où

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

n : le facteur d'idéalité de la diode; sans dimension.

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

T : la température absolue en Kelvin (K).

q : la charge d'un électron en Coulomb (1.60281×10^{-19} C).

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs et des fuites vers les bords; sont pris en considération et l'équation de la caractéristique I-V devient alors :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{q(V + I.R_s)}{nkT}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \right) \quad (2)$$

Et par conséquent le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle est représenté sur la figure suivante (figure II.6) par un générateur de courant (I_{ph}), une diode et deux résistances (R_s) et (R_{sh}) [39].

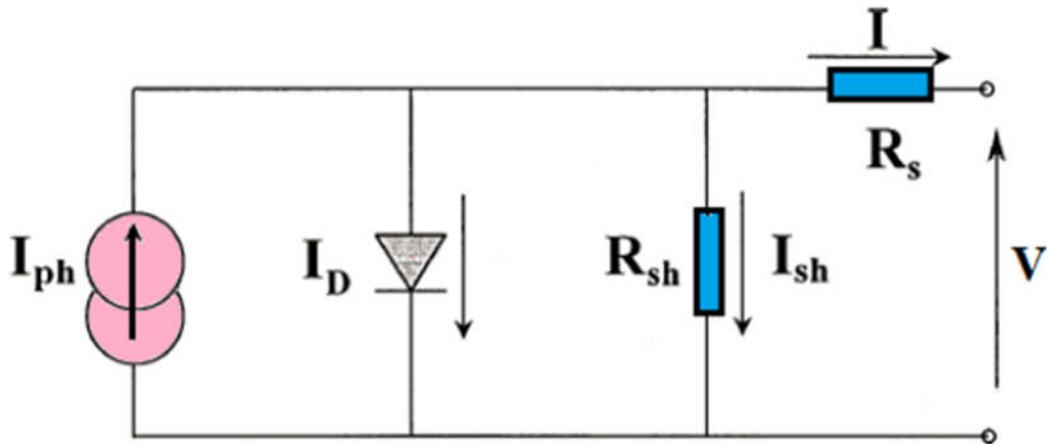


Figure II.6: Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire à jonction P-N [34].

- Le générateur du courant (I_{ph}) : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photo-généré.
- La diode (D) : modélise la jonction P-N.
- La résistance série R_s : modélise les pertes résistives au sein de la photopile.
- La résistance parallèle R_{sh} (résistance shunt) : correspond à la présence de courants de fuite dus aux recombinaisons.

5.3 Paramètres Photovoltaïques

La caractéristique $J(V)$ est représentée sur la figure suivante (figure II.7) :

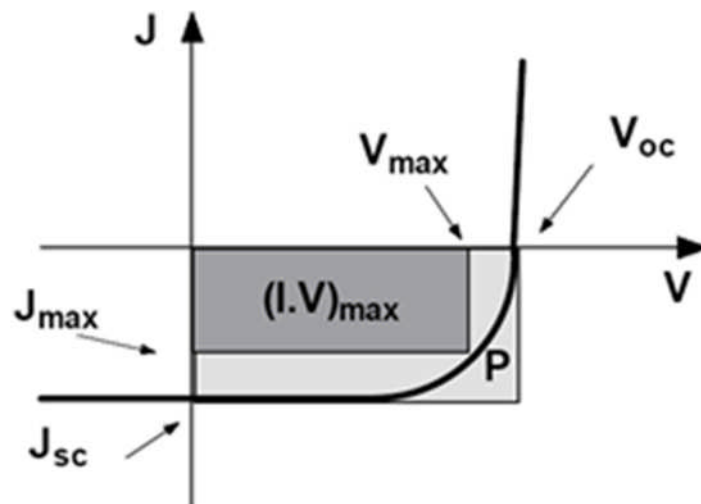


Figure II.7 : Caractéristique $J(V)$ d'une cellule solaire définissant les paramètres photovoltaïques.

Les paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire sont :

- Le courant de court-circuit I_{cc} ;
- La tension du circuit ouvert V_{co} ;
- Le facteur de forme FF ;
- La puissance maximale P_{max} ;
- Le rendement η .

5.3.1. Le courant de court-circuit I_{cc} :

On appelle courant de court-circuit le courant qui circule dans une cellule solaire soumise à un flux de photons sans application de tension. On le mesure en branchant les bornes de la cellule directement à un ampèremètre.

5.3.2. La tension du circuit-ouvert V_{co} :

Elle est obtenue en mesurant la tension aux bornes de la photopile placée sous une source lumineuse sans aucun récepteur. Elle est de l'ordre de 0.5 à 0.7 V pour une cellule élémentaire et elle dépend des matériaux, des structures et des technologies d'élaboration de la cellule. Elle varie avec l'éclairement et la température. On obtient cette tension en annulant le courant I dans l'expression de la caractéristique $I(V)$. V_{CO} est donnée par la relation :

$$V_{CO} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_S} \right) \quad (3)$$

5.3.3. La puissance maximale P_{max} :

La puissance maximale est désignée par le courant et la tension max, c'est le point de charge idéal de la cellule, (rectangle gris foncé), exprimée par la relation :

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \quad (4)$$

5.3.4. Le facteur de forme FF :

Le facteur de forme (facteur de remplissage) est un paramètre qui caractérise la qualité de la cellule, défini par le rapport de puissance maximale (P_{max}) à la puissance optimisée, c'est donc le rapport des aires de ces deux rectangles gris (figure II.7), exprimé par la relation :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (5)$$

5.3.5. Le rendement η :

Le rendement est un paramètre important pour comparer les performances d'une cellule solaire et sa productivité, définit par le rapport de la puissance maximale fournie sur la puissance solaire incidente, souvent exprimé en pourcent :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{co} \times I_{cc}}{P_{in}} \cdot FF \quad (6)$$

6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, ensuite nous avons décrit la structure le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque en définissant ses paramètres photovoltaïques.

Bibliographie de chapitre 1 :

[31] A. E. Becquerel, Compt. Rend. Acad. Sci.,161 (1839) 145.

[32] Emery, K.; Burdick, J.; Caiyem, Y.; Dunlavy, D.; Field, H.; Kroposki, B.; Moriarty, T.; Ottoson, L.; Rummel, S.; Strand, T.; Wanlass, M.W.; Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems Photovoltaic Specialists Conference, 1996, Conference Record of the Twenty Fifth IEEE, 13-17 May 1996 Page(s):1275 - 1278

[33] M. PETIBON Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » 2009

[34] LASLADJ.M « simulation numérique des cellules solaires de troisième génération pour les applications spatiales », mémoire de magister, université FARHAT ABBAS de Setif-1 ,2014.

[35] GreeNMA « solar cells Ed.university of new south wales » 336P.1992

[36] A. Einstein, “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt,” Annalen der Physik, vol. 322, p. 132–148, 1905

[37] Mailys Grau. Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres, INSA de Lyon, 2012.

[38] N. Oleksiy, “ Simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïque à contacts arrières interdigités’’, thèse de doctorat, Institue nationale des sciences appliquées, Lyon, 2005.

[39] BENSALEM.S « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires » mémoire magister, université FERHAT ABBAS Setif, 2011

Chapitre 3

**Etude des cellules solaires à
hétérojonctions de type CdTe/CdS**

1. Introduction

De très nombreux efforts de recherche ont été réalisés sur un grand nombre de matériaux depuis une quarantaine d'années, afin d'arriver à des cellules photovoltaïques qui possèdent un bon rendement de conversion avec un faible coût.

Historiquement, deux matériaux ont été particulièrement étudiés et ont fait l'objet d'une industrialisation : le silicium amorphe et le tellure de cadmium (CdTe). Malgré les efforts entrepris, le rendement maximum de ce type de cellules, pour des tailles significatives, reste malheureusement limité. Ceci est dû à la difficulté d'obtenir ce type de matériau avec une faible densité de défauts et de bonnes propriétés électroniques. La présence du cadmium, un métal lourd de toxicité comparable à celle de mercure, rend le CdTe relativement inapproprié à une application de grande surface.

2. Fonctionnement physique d'une hétérojonction à l'équilibre thermodynamique

Considérons l'hétérojonction formée en mettant deux semiconducteurs de type et de gap différents. Supposons que chacun de ces deux morceaux semiconducteurs est homogène.

Soient N_a et N_d les concentrations d'accepteurs et de donneurs dans les semiconducteurs de type p et n, respectivement.

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

Les électrons qui arrivent du côté p se recombinent avec des trous justes après la jonction.

Ainsi, dans une région proche de la jonction, les trous libres disparaissent et il reste des accepteurs ionisés (charges négatives). De la même manière, les électrons libres disparaissent du côté n près de la jonction, et il reste des donneurs ionisés (charges positives).

On obtient finalement une zone avec des charges fixes (les impuretés ionisées) non compensées autour de la jonction. Cette zone s'appelle la zone de déplétion. Plus loin de la

jonction, le semiconducteur garde ses propriétés non perturbées et reste en particulier électriquement neutre.

Un champ électrique apparaît, dirigé des charges (+) vers les charges (-), c'est-à-dire du semiconducteur n vers le semiconducteur p. Ce champ électrique doit donc être localisé près de la jonction : il ne peut pas exister dans les régions où il y a des charges libres.

Au fur et à mesure que la diffusion progresse, le champ électrique autour de la jonction augmente. Comme il s'oppose au passage des trous de p vers n et des électrons de n vers p, il en résulte une diminution de l'intensité du courant de diffusion.

Un électron libre qui, suite à la génération d'une paire électron-trou, arriverait dans la partie p près de la jonction (porteur minoritaire) sera accéléré vers n par le champ électrique. De la même manière, un trou arrivant près de la zone de déplétion dans la région n, sera accéléré vers la région p. Il en résulte un courant de porteurs minoritaires (qui s'ajoutent aux porteurs majoritaires une fois qu'ils ont traversé la jonction), appelé courant de dérive. Ce courant circule dans le sens opposé au courant de diffusion.

Le courant de dérive est relativement indépendant du champ électrique à l'interface. En effet, il est limité par la génération de porteurs minoritaires et atteint donc la valeur de saturation pour des champs relativement faibles.

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

3. La cellule solaire CdTe/CdS

3.1 Définition

La filière au CdS/CdTe représentait l'approche la plus prometteuse pour les cellules de nouvelle génération. Le matériau CdTe paraissait être très prometteur pour les cellules solaires en films minces pour au moins trois raisons :

- le gap d'énergie est de type direct, le coefficient d'absorption est élevé, et la couche absorbante ne nécessite pas plus de quelques micromètres pour absorber 90 % du spectre solaire, autorisant par conséquent l'utilisation de matériaux relativement impurs dont la longueur de diffusion des porteurs minoritaires ne dépasse pas quelques micromètres.

- la valeur du gap $E_g = 1.44$ eV est idéale pour la conversion photovoltaïque du spectre solaire.
- de nombreuses méthodes existent pour déposer le CdTe avec une vitesse de dépôt très élevée tout en gardant une qualité raisonnable.

La structure cristalline du CdS/CdTe est une structure tétragonale de chalcopyrite, qui est dérivée de la structure Zinc blend.

La longueur de diffusion des électrons est de l'ordre de quelques microns et la mobilité des électrons dans le cristal unique atteint jusqu'à $1100 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$.

Toutefois, l'inconvénient majeur actuel repose sur la toxicité reconnue du Cadmium, qui freine les tentatives de développement de cette filière, bien qu'il a été démontré que les risques environnementaux liés aux cellules PV en CdTe sont minimales [45].

3.2 Structure de la cellule solaire CdTe/CdS

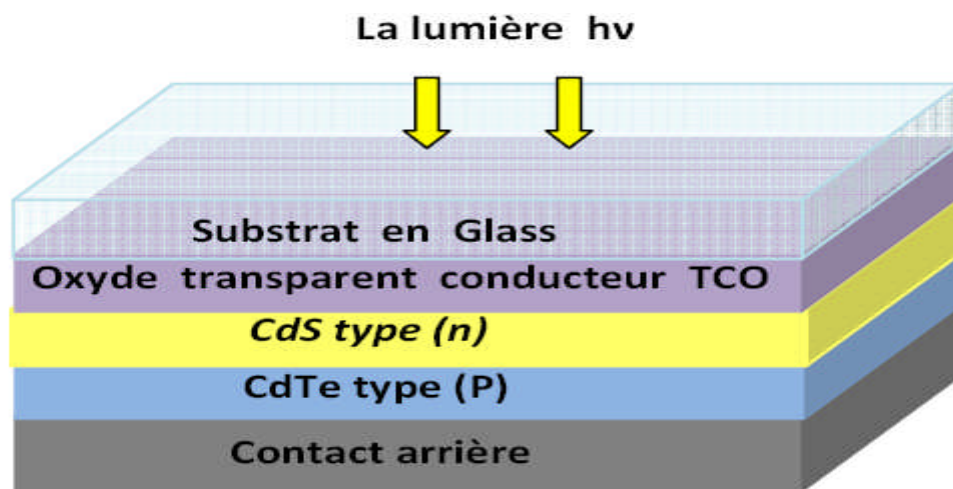


Figure III.2 : La structure de la cellule solaire CdS/CdTe [44]

Comme illustré sur la figure III.2, la cellule solaire CdTe/CdS est composée des couches suivantes :

- **Le substrat :**
Généralement la cellule de CdTe/CdS est constituée d'un substrat en verre.

- **La couche de TCO (TCO oxyde transparent conducteur) :**

C'est une couche qui constitue le contact face avant qui doit être transparente, antireflet et conductrice. Dans cette couche on utilise différents matériaux comme SnO₂ dopé par les matériaux suivants (F, Sb, Cl), le ZnO dopé par les matériaux suivants (Al, In, B, Ga, F) et In₂O₃ dopé par (Sn) et on peut aussi utiliser Cd₂SnO₄, ZnSnO₃, Zn₂SnO₄, SnO₂, ITO, ZTO et TiN [46].

- **La couche tampon de CdS :**

Ce matériau le plus utilisé comme une fenêtre grâce à sa bonne affinité électronique. On dépose une couche transparent de CdS de types n et on ajoute parfois le zinc sur la couche TCO qui doit être très mince 250 nm d'épaisseur possible et avant le dépôt de la couche CdTe on peut faire un traitement thermique par chlorure de cadmium CdCl₂ et l'oxygène pour améliorer le dopage et la qualité de la couche CdTe.

- **La couche de CdTe :**

C'est une couche absorbante à grand coefficient d'absorption optique dans le visible, et à une mobilité des porteurs très élevée. On dépose la couche de CdTe sur la couche de CdS. La couche de CdTe doit être mince, on peut la déposer sur différents substrats en raison de sa grande plasticité, ces couches présentent une bonne résistance mécanique.

- **Le contact face arrière :**

C'est un contact ohmique et métallique de grand travail de sortie. Dans cette couche, on utilise plusieurs métaux comme (Al, Mo, Cu, Au) déposés par évaporation sur la couche de CdTe.

4. L'hétérojonction CdS/CdTe

La plupart des cellules au CdTe utilisent une couche de CdS de type n, dont le gap très élevé, de 2.4 eV, lui permettant d'agir comme fenêtre d'entrée de la lumière et comme barrière de potentiel (hétérojonction CdS-CdTe). En tant que partenaire de type n du CdTe de type p, le CdS a été utilisé dès 1970 dans les premières cellules solaires.

Le procédé de fabrication nécessite qu'au moins une étape se fasse à plus de 400 °C, qu'il s'agisse du dépôt de CdTe ou du recuit postérieur indispensable. Au-dessus de 450 °C, le composé est un solide extrêmement stable [44]. En effet, la matière condense de façon stœchiométrique tant que le substrat est maintenu au-dessus de cette température.

Les matériaux CdS et CdTe puissent être déposés en utilisant les mêmes techniques. La dernière étape est la formation de l'électrode arrière.

5 Diagramme des bandes d'énergie de l'hétérojonction CdS/CdTe

La figure ci-dessous III.4 illustre un diagramme des bandes d'énergie d'une cellule solaire à base du CdS/CdTe.

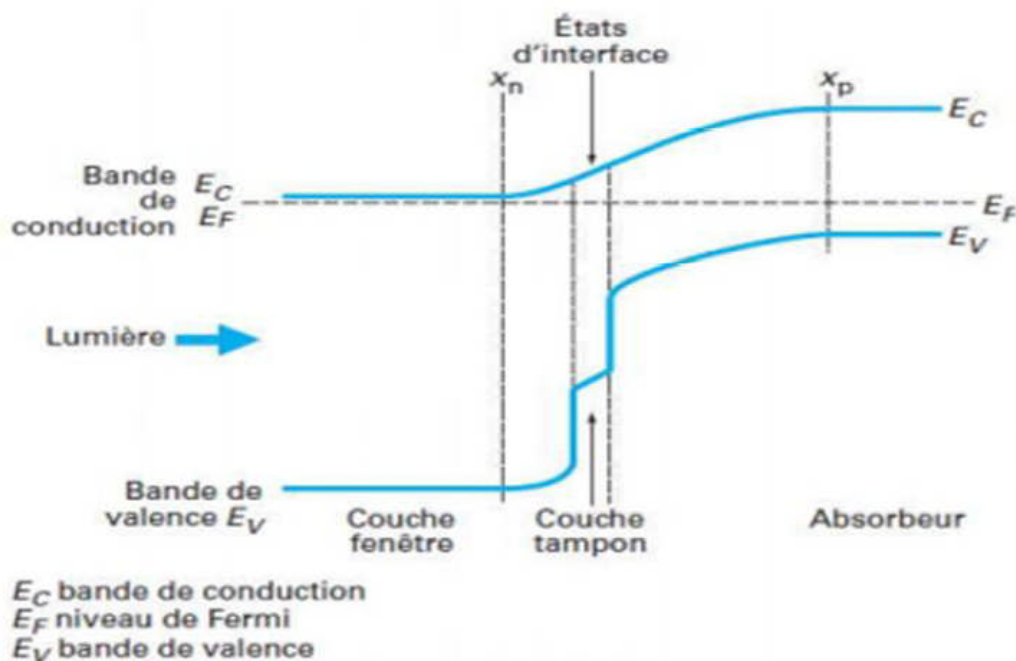


Figure III.4 : Schéma des bandes d'énergie dans l'hétérojonction CdS-CdTe [48]

Sous illumination, les porteurs sont surtout générés dans la zone de charge d'espace du CdTe de type p. Donc la collecte des porteurs se fait par le champ plutôt que par la diffusion.

Comme il n'y a presque pas de zone de charge d'espace dans le CdS qui est fortement dopée et parce que la durée de vie des porteurs minoritaires y est très courte, la couche CdS est en

fait une couche morte du point de vue photovoltaïque. Il est souhaitable de minimiser son épaisseur pour réduire les pertes d'absorption optique.

6. Méthodes de dépôt des couches

L'étape la plus importante est la formation de la couche absorbante en CdTe. De nombreuses techniques permettent de préparer des couches de type P de bonne cristallinité et de grande mobilité des électrons : sublimation/condensation (S), une modification de ce processus à savoir sublimation en espace clos (CSS), vaporisation chimique (CS), électrodéposition (ED), sérigraphie (SP), déposition de vapeur chimique (CVD) et pulvérisation. Chacune des méthodes citées ci-dessus présente des avantages et des inconvénients qui n'ont pas la même valeur suivant que l'on soit chercheur de laboratoire ou ingénieur d'un centre de production.

Bien qu'elles ne donnent pas les plus beaux cristaux, ce sont les méthodes qui présentent les plus grandes vitesses de dépôt (jusqu'à $1\mu\text{m/s}$ chez First Solar) et donc sont les plus intéressantes pour un investissement de production industrielle.

7. Procédé par électrodéposition

Le verre est recouvert d'un TCO oxyde d'étain (SnO_2), oxyde de zinc (ZnO) ou oxyde d'indium dopé étain (ITO) déposé par CVD en très grande série dans un four CVD. La couche de CdS est déposée chimiquement par CBD à partir d'une solution aqueuse contenant de l'ammoniaque, qui complexe les ions Cd^{2+} et de la thio-urée comme source des ions soufre. Les paramètres du dépôt sont faciles à contrôler [44].

L'absorbeur est une couche de CdTe beaucoup plus lente et plus difficile à déposer. C'est une voie électrochimique contenant les ions Cd^{2+} et, nécessitant une injection de courant de façon suffisamment homogène sur toute la surface pendant une durée relativement longue (6h environ pour une couche de $2\mu\text{m}$) et suivie d'un recuit à $400\text{ }^\circ\text{C}$.

La figure III.3 montre comment la réponse spectrale dépend des méthodes de dépôt. Les meilleurs résultats obtenus à ce jour l'ont été pour l'équipe de T. L. Chu et Sh. S. Chu de l'université de « South Florida » qui ont déposé le CdS par CBD et le CdTe par CSS. Ils ont en outre ajouté un film de MgF_2 agissant comme un revêtement antireflet sur la surface du verre. Ils ont obtenu :

- une densité de courant de saturation $J_s = 2 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$
- une tension de circuit ouvert $V_{co} = 0,843 \text{ V}$
- une densité de courant de court-circuit $J_{cc} = 25,1 \text{ mA/cm}^2$
- un facteur de forme $FF = 0,745$
- un rendement de 15,8 % sous un spectre AM 1.5

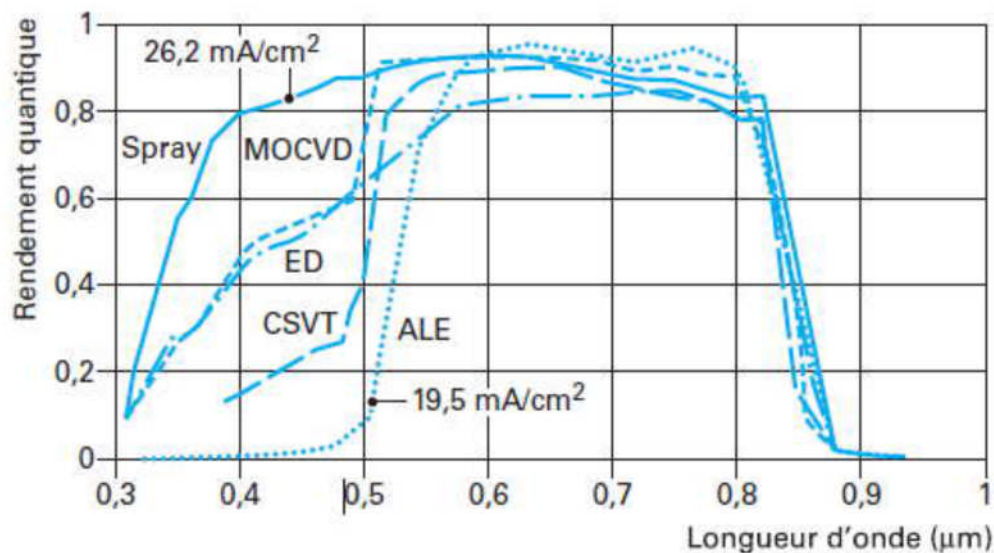


Figure III.3 : Réponses spectrales de cellules CdTe mesurées au NREL et dépendant des méthodes de dépôt [44].

Malgré des rendements dépassant les 15% des cellules solaires CdTe/CdS, des problèmes non négligeables se posent:

- La difficulté de réaliser des contacts électriques ohmiques stables ;
- La diffusion du sodium de verre ne semble pas profiter au CdTe ;
- La sensibilité de cette cellule à la vapeur d'eau ;
- L'agressivité pour l'environnement, du fait de la présence du cadmium qui est toxique et polluant [47].

8. conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude des cellules solaires à couches minces, et en particulier la cellule CdTe/CdS : sa structure, le fonctionnement de l'hétérojonction, ses bandes d'énergie, ainsi que les différentes méthodes de dépôt de ses couches.

Conclusion générale

L'amélioration de la compétitivité de l'électricité photovoltaïque vis-à-vis des autres sources d'énergie traditionnelles passe obligatoirement par l'augmentation du 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/coût de production est une nécessité.

Au cours de ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude et optimisation des cellules solaires en couches minces de type p-CdTe/n-CdS. La simulation numérique nous a permis d'optimiser l'épaisseur et le dopage de l'absorbeur CdTe, composant de base de la cellule solaire CdTe/CdS, et d'évaluer l'effet de l'introduction d'un TCO sur la face avant pour de meilleures performances photovoltaïques.

Nous avons démontré que l'hétérojonction CdTe/CdS avec un revêtement antireflet (ITO ou ZnO) constitue un convertisseur photovoltaïque réellement efficace, conduisant à des rendements de 10 %. Des améliorations sont encore possibles par une optimisation du dopage de l'absorbeur CdTe pouvant amener les rendements de ces cellules à des valeurs dépassant les 16 % qui sont des valeurs conformes à celles publiées dans la littérature.

En perspectives, il reste à envisager la réalisation en couches minces de ce type de cellules solaires.

Annexe A

Influence de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe :

Epaisseur CdTe (μm)	50	100	150	200	250	300	350	400
V _{co} (mV)	484.9	507.5	519.7	528.4	535.4	540.6	545.8	549.3
J _{cc} (mA/cm ²)	14.02	17.62	20.36	21.63	22.53	23.2	23.71	24.13
FF	63.26	70.55	72.4	72.88	73.82	74.39	74.59	74.81
η (%)	4.301	6.308	7.635	8.331	8.904	9.328	9.655	9.914

Annexe B

Influence du dopage de l'absorbeur CdTe :

Dopage de CdTe (cm ⁻³)	6.10^{14}	6.10^{15}	6.10^{16}	6.10^{17}	6.10^{18}	6.10^{19}
V _{co} (mV)	479.7	535.4	596.3	657.3	716.5	777.4
J _{cc} (mA/cm ²)	22.29	22.53	23.88	25.33	26.17	26.5
FF	62.09	73.82	72.72	81.8	83.93	84.08
η (%)	6.638	8.904	10.35	13.62	15.73	17.32

Liste des tableaux

Tableau1 : éléments chimiques du tableau Mendeleïev des colonnes II et VI	2
Tableau 2 : les propriétés électriques du CdTe	5
Tableau 3 : les propriétés optiques du CdTe	6
Tableau 4 : les propriétés électriques du CdS	10
Tableau 5 : paramètres de la couche d'Al	43
Tableau6 : paramètres de la couche CdTe	44
Tableau7 : paramètres de la couche CdS	44
Tableau8 : paramètres de la couche ITO	45
Tableau9 : paramètres de la couche ZnO	45
Tableau10 : les paramètres de la cellule CdTe/CdS pour les différents cas	62

Liste des figures

Figure I.1 : Maille élémentaire de la structure cubique de CdTe. Les sphères claires représentent les atomes de cadmium et les sphères foncées ceux de tellure	4
Figure I.2 : Représentation schématique des diagrammes d'énergie dans les cas d'un matériau intrinsèque (a), dopé n (b) et dopé p (c)	5
Figure I.3: (a) structure hexagonale (wurtzite) et (b) structure cubique (zinc blende) des composés II-VI. Le cercle rond en noir indique le site occupé par l'atome métallique	7
Figure I.4 : structure GRRENOCKITE	7
Figure I.5 : structure HAWLEYITE	8
Figure I.6: Dopage de type n	12
Figure I.7: Dopage de type p	13
Figure I.8 : Diffusion dans un four à partir de sources gazeuses. Les gaz dopants sont entraînés par un gaz porteur neutre, tel que l'azote	15
Figure II.1 : les longueurs d'onde de la lumière	18
Figure II.2 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique	21
Figure II.3 : Schéma de principe d'une cellule solaire	22
Figure II.4 : Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée	23
Figure II.5 : Schéma d'une cellule solaire (haut) et schéma de la structure de bandes correspondant (bas). 25	
Figure II.6: Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire à jonction P-N.	
Figure II.7 : caractéristique $J(V)$ d'une cellule solaire définitions les paramètres photovoltaïques. 28	
Figure III.1: Schéma de la première cellule solaire à simple hétérojonction de l'entreprise Sanyo.	
Figure III.2 : La structure de CdS/CdTe	
Figure III.3 : Schéma des bandes d'énergie dans l'hétérojonction CdS-CdTe	
Figure III.4 : Réponses spectrales de cellules CdTe mesurées au NREL et dépendant des méthodes de dépôt	
Figure IV.1 : les zones principales de l'AFORS-HET	

Figure IV.2 : définition de la structure

Figure IV.3 : définition des paramètres

Figure IV.4 : choix des conditions de travail

Figure IV.5 : structure de la cellule CdTe/CdS dans le cas d'absence d'une couche antireflet

Figure IV.6 : structure de la cellule CdTe/CdS dans le cas d'utilisation d'une couche antireflet ITO.

Figure IV.7 : structure de la cellule CdTe/CdS dans le cas d'utilisation d'une couche antireflet ZnO.

Figure IV.8 : Variation de la tension du circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe pour une cellule avec ITO.

Figure IV.9 : Variation de la tension du circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe pour une cellule avec ZnO.

Figure IV.10 : Variation du courant de court-circuit J_{cc} en fonction de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe pour une cellule avec ITO.

Figure IV.11 : Variation du courant de court-circuit J_{cc} en fonction de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe pour une cellule avec ZnO.

Figure IV.12 : Variation du facteur de forme FF en fonction de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe pour une cellule avec ITO.

Figure IV.13 : Variation du facteur de forme FF en fonction de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe pour une cellule avec ZnO.

Figure IV.14 : Variation du rendement η en fonction de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe pour une cellule avec ITO.

Figure IV.15 : Variation du rendement η en fonction de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe pour une cellule avec ZnO.

Figure IV.16 : Variation de la tension du circuit ouvert V_{co} en fonction du dopage de l'absorbeur CdTe pour une cellule avec ITO.

Figure IV.17 : Variation de la tension du circuit ouvert V_{co} en fonction du dopage de l'absorbeur CdTe pour une cellule avec ZnO.

Figure IV.18 : Variation du courant de court-circuit J_{cc} en fonction du dopage de l'absorbeur CdTe pour une cellule avec ITO.

Figure IV.19 : Variation du courant de court-circuit J_{cc} en fonction du dopage de l'absorbeur CdTe pour une cellule avec ZnO.

Figure IV.20 : Variation du facteur de forme FF en fonction du dopage de l'absorbeur CdTe pour une couche avec ITO.

Figure IV.21 : Variation du facteur de forme FF en fonction du dopage de l'absorbeur CdTe pour une couche avec ZnO.

Figure IV.22 : Variation du rendement η en fonction du dopage de l'absorbeur CdTe pour une couche avec ITO.

Figure IV.23 : Variation du rendement η en fonction du dopage de l'absorbeur CdTe pour une couche avec ZnO.

Figure IV.24 : diagrammes des bandes d'énergie pour une cellule CdTe/CdS sans couche antireflet.

Figure IV.25 : diagrammes des bandes d'énergie pour une cellule CdTe/CdS avec couche antireflet ITO.

Figure IV.26 : diagrammes des bandes d'énergie pour une cellule CdTe/CdS avec couche antireflet ZnO.

Figure IV.27 : la caractéristique courant-tension $I(V)$ pour une cellule CdTe/CdS sans couche antireflet.

Figure IV.28 : la caractéristique courant-tension $I(V)$ pour une cellule CdTe/CdS avec couche antireflet ITO.

Figure IV.29 : la caractéristique courant-tension $I(V)$ pour une cellule CdTe/CdS avec couche antireflet ZnO.

Figure IV.30 : la caractéristique courant-tension $I(V)$ pour une cellule CdTe/CdS avec et sans couche antireflet.

Références

- [1] Elaboration et caractérisation de couches minces CdS par bain chimique CBD pour application photovoltaïque, Thèse de doctorat présentée par Mme BENGHABRIT Siham le 24/06/ 2015 Pour l'obtention du diplôme de doctorat LMD en physique, université « Mohamed BOUDIAF » d'Oran.
- [2] J. C. Phillips, Rev. Mod. Phys. 42, 317 (1970).
- [3] Characterization of the Energy Band Diagram of Fabricated SnO₂/CdS/CdTe Thin Film Solar Cells, Rasha A. Abdullah, Mohammed. A. Razooqi, and Adwan N. H. Al-Ajili
- [4] http://www.unilim.fr/theses/2003/sciences/2003limo0056/these_notes.html.
- [5] Elaboration et caractérisation de nanocristaux de sulfure de cadmium - dépôt en couches minces nanostructurées, le 8 novembre 2012, Thèse de doctorat présentée par Mathieu FREGNAUX en vue d'obtenir le grade de Docteur de l'Université de Lorraine.
- [6] « élaboration et caractérisation de couches minces de sulfure de cadmium (cds) », thèse présentée pour obtenir le diplôme de doctorat en sciences par Hassiba MOUALKIA le 23/05/2010.
- [7] A.Kergommeaux, Synthèse de nouveaux types de nanocristaux semi-conducteurs pour application cellule solaire, Grenoble: Université de Grenoble, (2013).
- [8] G. Hodes, « Chemical Solution Deposition of Semiconductor Film » Marcel Dekker.Inc. 2002.
- [9] T. Nakanishi, and K. ITO, Technical Digest of the International PVSEC, 7 (Nagoya, Japan, PP 11- 12, (1993) 431.
- [10] R. Castro- Rodriguez, A. I. Oliva, V. Sosa, F. Caballero- Briones, J. L. Pena- Appl. Surf. Sci. 161, (2000) 340.
- [11] Y. Liu, T. Tang, B. Wang, R. Zhai, X. Song, E. Li, H. Wang, H. Yan, Journal of Colloid and Interface Science 320 (2008) 540.
- [12] Jae-Hyeong Lee. Thin Solid Films 515 (2007) 6089.
- [13] Peter. C. Reike and Susan, B. Bentjen. Chem. Mater. 5, (1993) 43.

- [14] A. Mondal, T. K. Chandhuri, P. Pramanik, Sol. Energy Mater. 7, (1983) 431.
- [15] Natalia S. Kozhenikova, Andrey A. Rempel, Frank Hergert, Andreas Magerl. Thin Solid Films 517 (2009) 2586.
- [16] J Emerson-Reynolds. J. Chem. Soc. 45 (1884) 162.
- [17] M. S. Aida. Cours post graduation (2005).
- [18] [http://fr.Pulsed/Laser/Deposition \(PLD\)5.mht](http://fr.Pulsed/Laser/Deposition (PLD)5.mht).
- [19] http://fr.wikipedia.org/wiki/Ablation_laser.
- [20] J.-H. Lee, Thin Solid Films 515, p. 6089. (2007).
- [21] C. D. Gutierrez, Journal of the Electrochemical Society, pp. D 158- D 162, (2008).
- [22] J.L. SANTAILLER «Croissance de monocristaux de ZnO: état de l'art », Journée thématique INP Grenoble - Minatec, (2007).
- [23] K.DJERIOUAT, « Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions : GaInP/GaAs », Thèse de Magister, Université Tlemcen, (2010).
- [24] K.DJERIOUAT, «Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions : GaInP/GaAs », Thèse de Magister, Université Tlemcen, (2010).
- [25] Rolf Enderlein, NommJ. M. Horing, "Fundamentals of Semiconductor Physics and Devices", World Scientific Publishing (1997) ISBN 981-02-2387-0.
- [26] J.H. Chang, J.S. Song, K. Godo, M.Y. Shen, T. Goto, T. Yao, Appl. Phys. Lett. 78 (2001) 566-568.
- [27] M. Klude, G. Alexe, C. Kruse, T. Passow, H. Heinke, D. Hommel, Phys. Stat. Sol. (b) 229 (2002) 935-942.
- [28] C. Walkons, B. Guralnick, B. M. Candless and R. Birkmire, IEEE, 1567 (2014).
- [29] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta and E. D. Dunlop, Prog. Photovolt: Res. Appl. 23, 1 (2015).
- [30] C. S. Ferekides, U. Balasubramanian, R. Mamazza, V. Viswanathan, H. Zhao, D. L. Morel, Solar Energy 77, 823 (2004).

[31] A. E. Becquerel, Compt. Rend. Acad. Sci.,161 (1839) 145.

[32] Emery, K.; Burdick, J.; Caiyem, Y.; Dunlavy, D.; Field, H.; Kroposki, B.; Moriarty, T.; Ottoson, L.; Rummel, S.; Strand, T.; Wanlass, M.W.; Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems Photovoltaic Specialists Conference, 1996, Conference Record of the Twenty Fifth IEEE, 13-17 May 1996 Page(s):1275 - 1278

[33] M. PETIBON Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » 2009

[34] LASLADJ.M « simulation numérique des cellules solaires de troisième génération pour les applications spatiales », mémoire de magister, université FARHAT ABBAS de Setif-1 ,2014.

[35] GreeNMA « solar cells Ed.university of new south wales » 336P.1992

[36] A. Einstein, “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt,” Annalen der Physik, vol. 322, p. 132–148, 1905

[37] Mailys Grau. Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres, INSA de Lyon, 2012.

[38] N. Oleksiy, “ Simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïque à contacts arrières interdigités”, thèse de doctorat, Institut nationale des sciences appliquées, Lyon, 2005.

[39] BENSALÉM.S « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires » mémoire magister, université FERHAT ABBAS Setif, 2011

[40] W. Fuhs, K. Niemann, and J. Stuke. ‘ *Heterojunctions of amorphous silicon and silicon single crystals*’. Bull. Am. Phys. Soc., 19 :345–349, (1974).

[41] H. Sakata, T. Nakai, T. Baba, M. Taguchi, S. Tsuge, K. Uchihashi, and Seiichi Kiyama. ‘ *20.7% Highest Efficiency Large Area (100.5 cm²) HITTM Cell* ‘. Proc. of the 28th IEEE PSC, pages 7–12, (2000).

[42] Trends in photovoltaic applications, (1992-2005). Technical report, IEA Photovoltaic Power Systems Programme, (September 2006).

- [43]. M. S. Shur, « *GaN and related materials for high power applications, in Symposium Proceedings of Material Research Society, Symposium E, Fall* »1997.
- [44]. Alain Ricaud, « Module Photovoltaïques, Filières Technologiques», Techniques de l'ingénieur D 3940, 2005.
- [45] M. V. Fthenakis, « Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 8, 2004, pp. 303.
- [46] G.Gorden, Criteria for choosing transparent conductors, MRS Bulletin, august 2000. les oxydes transparents conducteurs sont des matériaux de grand gap.
- [47] Malika Madani, « Réalisations des Couches Antireflets Dans Les Cellules Solaires A Couches Mincees » Mémoire de Magister à l'Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2006.
- [48] S.Chun et al «The analysis of CdS thin film at the processes of manufacturing CdS/CdTe solar cells », Journal of Crystal Growth 326, (2011), 152–156.

Conclusion générale

Conclusion générale

Améliorer la compétitivité de l'électricité solaire vis-à-vis des autres sources d'énergie traditionnelles, c'est augmenter le rendement de conversion des cellules solaires tout en réduisant leur coûts de production. Les chercheurs ont donc besoin de miser sur la recherche et le développement de nouvelles structures permettant d'atteindre un meilleur rapport rendement de conversion/coût de production. Au cours de ce travail, nous avons effectué une étude comparative entre les performances de différentes structures de cellules solaires avec jonctions simple et multiple.

Avec le logiciel AFORS-HET, nous avons réalisé une simulation de la cellule solaire CdTe/CdS sans couche antireflet, en utilisant une couche antireflet ITO et ZnO en gardant les mêmes paramètres et jouant sur l'épaisseur et le dopage de l'absorbeur CdTe.

Les résultats obtenus indiquent que le rendement de la cellule est beaucoup amélioré en déposant une couche antireflet ou il est passé de 6% à 8% à une épaisseur de CdTe=250 μ m et un dopage de 6.10^{15} , et qu'il est sensible à l'épaisseur et au dopage de la couche d'absorption CdTe, on a vu son augmentation à 17.32% en utilisant le ZnO et 17.28% en utilisant le ITO pour un dopage de 6.10^{16} .

Résumé

Les cellules solaires en couches minces intégrant le tellure de cadmium (CdTe) et le Sulfure de Cadmium (CdS) suscitent un intérêt croissant de la part des scientifiques et industriels motivés par la réduction des coûts de fabrication. De plus cette technologie offre la possibilité d'utiliser une grande variété de substrats peu coûteux comme le verre ainsi que des substrats flexibles.

Ce travail porte sur l'étude et optimisation des cellules solaires en couches minces CdTe/CdS.

Dans une première partie, nous nous sommes intéressés à la simulation des cellules solaires en couches minces CdTe/CdS en évaluant l'effet de l'introduction d'un TCO sur la face avant pour de meilleures performances photovoltaïques. Nous avons alors démontré que l'hétérojonction CdTe/CdS avec un revêtement antireflet (ITO ou ZnO) constitue un convertisseur photovoltaïque réellement efficace, conduisant à des rendements de 10 %.

Dans une deuxième partie, nous nous sommes intéressés à l'optimisation des cellules solaires CdTe/CdS par une optimisation du dopage de l'absorbeur CdTe, ce qui a permis d'améliorer d'avantage les rendements de ces cellules solaires à des valeurs dépassant les 16 % qui sont conformes à celles publiées dans la littérature. Il reste à envisager la réalisation en couches minces de ce type de cellules solaires.

Mots clés : Tellure de cadmium, Sulfure de Cadmium, optimisation, cellule solaire, simulation, rendement.