

UNIVERSITE Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique
KASDI MERBAH OUARGLA



Mémoire
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et technologies
Filière : Génie électrique
Spécialité : Electrotechnique Industrielle
Présenté par :

GUERROUT Nouredine

Et

GOUAREH Abdelhamid

Thème:

Simulation d'une cellule solaire en couches minces à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$

Soumis au jury composé de :

M'FLOUAZENE Mohamed Lakhdar

MCA

Président

UKM Ouargla

M'BENMIR Abdelkader

MCB

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M'IDER Zahir

MAA

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2020/2021



Dédicace

*Avant tout, je tiens à remercier le dieu, et
l'unique qui m'offre le courage
et la volonté nécessaire pour affronter les
différentes difficultés de la vie.*

Je dédie ce modeste travail

A ma mère.

A mon père.

A mes frères et mes soeurs.

A toute ma famille.

*A mes amis et mes collègues de la promotion
2021 « génie électrique ».*

*A Tous mes chers amis, tous ceux que j'aime et
me sont très chers.*

GUERROUT NOUREDDINE



Remerciement

Nos remerciements vont premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé, et la patience, qu'il nous a données durant toutes ces années d'étude. Nous exprimons nos profondes gratitudes à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont enduré. Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur BENMIR Abdelkader pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continué tout le long de la réalisation de Ce mémoire, et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et remarques. Nos sincères remerciements aux messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail. Nous tenons à remercier vivement toutes les personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidé, de près ou de loin, à accomplir ce travail. Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département de génie électrique qui ont contribué à notre formation Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral.

Résumé

Le but de ce travail est d'optimiser par simulation, moyennant du logiciel SCAPS, l'épaisseur W_p , la composition Y et la densité des atomes de dopage N_a ainsi que, la densité des défauts N_t de la couche absorbeur en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ d'une cellule solaire PV en couches minces. Il est trouvé que L'épaisseur W_p a une valeur optimale de $0.4 \mu m$. Cependant, la composition Y optimale est le plus faible ce qui correspond à un gap minimale $E_g = 1.18 eV$. Tandis que, la concentration des atomes de dopage N_a ne dépasse pas $10^{15} cm^{-3}$. En plus, la couche absorbeur doit être choisie d'une manière à posséder une densité de défauts N_t le plus faible possible. Le rendement maximal correspond à ces valeurs est de 14.37% .

Abstract

The goal of this work is to optimize by simulation, using SCAPS software, the thickness W_p , the composition Y and the doping atoms density N_a as well as the defects density N_t of $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ absorber layer of a thin film PV solar cell. It is found that the thickness W_p has an optimum value of $0.4 \mu m$. However, the optimal Y composition is the lowest, which corresponds to a minimum gap $E_g = 1.18 eV$. While, the doping atoms concentration N_a does not exceed $10^{15} cm^{-3}$. In addition, the absorber layer must be chosen in such a way as to have the lowest possible defects density N_t . The maximum efficiency corresponding to these values is 14.37% .

مُلخَص

إن الهدف من هذا العمل هو التحسين عن طريق المحاكاة باستخدام برنامج SCAPS للسلك W_p والتركيب Y وكثافة ذرات المنشطات N_a وكذلك كثافة العيوب N_t للطبقة الماصة $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ لخلية شمسية كهروضوئية رقيقة. لقد وجد أن له القيمة المثلى للسلك W_p هي $0.4 \mu m$. في حين، أن التركيب Y الأمثل هو الأدنى، والذي يتوافق مع أدنى قيمة للفجوة $E_g = 1.18 eV$. بينما لا يتجاوز تركيز ذرات المنشطات $10^{15} cm^{-3}$. بالإضافة إلى ذلك، يجب اختيار الطبقة الماصة بطريقة تحتوي على أقل كثافة ممكنة من العيوب N_t . المرادود الأقصى المقابل لهذه القيم هو 14.37% .

Liste des figures

N° de figure	Titer	N° de page
I.1	Diagramme de bande de différents types des matériaux	3
I.2	Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semiconducteur silicium (Si) dopé P par du Bohr (B)	4
I.3	Bilan électronique pour un semiconducteur dopé P	5
I.4	Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semiconducteur silicium (Si) dopé N par de l'arsenic (As)	5
I.5	Semiconducteur dopé N. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'état énergétique c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurées)	6
I.6	Jonction PN. a) Charge d'espace, b) Champ électrique, c) Potentiel électrostatique	6
I.7	Cellule solaire PV	7
I.8	Principe de fonctionnement d'une cellule solaire PV	8
I.9	Rendement des différents types des cellules solaires	9
I.10	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale	9
I.11	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle	10
II.1	Structure cristalline orthorhombique d'élément Sb_2S_3 les sphères jaunes représentent les atomes S(Se), les sphères blanches représentent les atomes Sb	18
II.2	Structure schématique d'une couche absorbeur en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$	18
III.1	Structure de la cellule à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$	23
III.2	Effet de l'épaisseur de la couche $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ sur les performances de la cellule PV	25
III.3	Effet de la composition Y de la couche $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ sur les performances de la cellule PV	26
III.4	Effet du dopage N_a de la couche $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ sur les performances de la cellule PV	27
III.5	Effet de la densité de défauts de la couche $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ sur les performances de la cellule PV	28

Liste des symboles

$E(x)$: Champ électrique.

E : Energie.

E_g : Largeur de la bande interdite (gap).

E_c : énergie minimale de la bande de conduction.

E_v : énergie maximale de la bande de valence.

n, p : Concentration des électrons et des trous respectivement.

J_{ph} : Densité de courant de photo génération. I : Courant de sortie.

I_d : Courant de la diode.

I_{sh} : Courant shunt.

J_{sc} : Courant de court-circuit.

\vec{j}_n, \vec{j}_p : Sont des densités de courant d'électrons et de trous respectivement.

$G_{n,p}$: Sont les taux de génération des électrons et des trous.

μ_n, μ_p : Mobilité des électrons et des trous respectivement.

$D_{n,p}$: Constante de diffusion des électrons et des trous respectivement.

$R_{n,p}$: Taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement. Ψ : Le potentiel électrostatique.

n_{ie} : La densité effective intrinsèque.

ϵ, ϵ_0 : permittivité du vide, Permittivité relative et permittivité totale respectivement.

P_i : puissance incidente du rayonnement solaire au sol.

R_s : Résistance Série.

R_{sh} : Résistance parallèle.

V : Tension de sortie de la cellule.

n : le facteur d'idéalité de la diode.

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

FF : Facteur de forme.

η : Rendement de conversion.

P_m : puissance maximale.

SR(λ) : Réponse spectrale.

R(λ) : Coefficient de réflexion.

F(λ) : Flux solaire au sol.

w_p : Epaisseur de la couche $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$

I_s : Courant de saturation inverse.

Sommaire

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralités sur les cellules solaire photovoltaïques

I. 1. Introduction..... 3

I. 2. Matériaux semi-conducteurs 3

I. 2. 1. Semiconducteurs intrinsèques 4

I. 2. 2. Semiconducteurs extrinsèques 4

a). Dopage de type P 4

b). Dopage de type N 5

c). Jonction P-N (Diode)..... 6

I. 3. Rayonnement solaire..... 7

I. 4. Cellules solaires photovoltaïques 7

I. 4. 1. Définition et principe..... 7

I.4.2. Les différents types de cellules solaires 8

I. 4. 3. Modélisation d'une cellule solaire 9

a). Cellule solaire idéale 9

b). Cellule solaire réelle..... 9

I. 4. 4. Différentes caractéristiques d'une cellule solaire..... 10

a). Courant de court-circuit, I_{sc} 11

b). Tension de circuit ouvert, V_{co} 11

c). Réponse spectrale, $SR(\lambda)$ 11

d). Puissance maximale, P_m 11

e). Facteur de forme, FF 11

f). Rendement de conversion, η 12

I. 5. Conclusion 12

Chapitre II : Cellules solaires en couches minces à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$

II. 1. Introduction..... 13

II. 2. Cellules solaires en couches minces	13
a). Avantages de la technologie de type mince.....	13
b). Inconvénients.....	14
II. 3. Comment sont fabriquées les cellules solaires à couche mince ?.....	14
II. 4. Technique de caractérisation des cellules couches minces.....	14
a). Caractérisation structurelle	14
b) Caractérisation optique.....	14
c) Caractérisation électrique	15
II. 5. Dépôts des couches minces.....	15
II. 5. 1. Méthodes physiques.....	15
a). Dépôt physique en phase vapeur (PVD).....	15
b). Vaporisation	16
c). Epitaxie par jet moléculaire (EJT).....	16
d). Pulvérisation.....	16
e). Ablation laser.....	16
II. 5. 2. Méthodes chimiques	17
a. Dépôt chimique en phase vapeur (CVD).....	17
b. dépôts Sol-gel	17
II. 6. Cellule solaire en couches minces à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$	17
II. 7. Propriétés physique des couches minces en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$	18
II. 8. Techniques de synthèse des cellules solaires en couches minces à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$	19
II. 9. Conclusion	19

Chapitre III : Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$

III.1. Introduction	20
III. 2. Equations fondamentales du modèle de simulation	20
III. 2. 1. Equations de continuité	20
III. 2. 2. Équation de poisson.....	21
III. 2. 3. Équations de courants.....	21
III. 3. Présentation du logiciel utilisée.....	21
III. 4. Modèle de simulation	23

III. 5. Résultats et discussion	25
III. 5. 1. 1. Effet de l'épaisseur W_p	25
III. 5. 1. 2. Effet de la composition Y (gap E_g)	26
III. 5. 1. 3. Effet de la concentration des atomes de dopage N_a	27
III. 5. 1. 4. Effet de la densité de défauts N_t	27
III. 6. Conclusion	28
Conclusion générale	30
Références bibliographiques	

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie est sans doute l'élément indispensable au fonctionnement de tous les appareils et les machines d'usage personnel ou publique. Cette énergie provient d'une part, à partir des sources non renouvelables comme le pétrole, le gaz naturel, le charbon et le nucléaire. D'autre part, cette énergie provient de la part des sources renouvelables telle que, le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux.

Parmi eux, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) est l'énergie électrique produite par la conversion directe du rayonnement solaire à l'aide d'un dispositif appelé cellule solaire photovoltaïque. Elle a l'avantage d'être abondante, propre, silencieuse, élégante et sans pièces rotatives. En plus, l'énergie solaire PV est la seule source d'énergie qui peut fournir de l'énergie de l'échelle de milliwatts à plusieurs mégawatts à partir d'une technologie modulaire.

En raison de l'avantage du rendement élevé, du faible coût, de la flexibilité et de la productivité viable, les cellules solaires en couches minces ont attiré une large attention dans le domaine photovoltaïque. Parmi eux, le CdTe et le Cu(InGa)Se₂ ont été déjà commercialisés et les cellules champions ont atteint un rendement de conversion plus de plus de 22% à l'échelle du laboratoire. Cependant, la toxicité du Cd et la rareté des éléments In et Ga entravent le développement de ces cellules.

C'est pourquoi, pour éviter le problème de la toxicité et de la disponibilité de ces matériaux, de nombreux nouveaux matériaux ont été explorés en tant que matériaux photovoltaïques alternatifs

Les composés semiconducteurs binaires ont attiré beaucoup d'attention en raison de leurs propriétés optoélectroniques convenables aux applications des cellules solaires en couches minces. Parmi eux et vu qu'ils sont constitués d'éléments respectueux de l'environnement, moins cher et abondants sur la croûte terrestre, le séléniure de sulfure d'antimoine Sb₂(Se_{1-x}S_x)₃ a été identifié comme un candidat prometteur à utiliser comme matériau absorbeur.

Ce type de matériaux a d'autres caractéristiques intéressantes telles qu'une conductivité de type p, une bande interdite réglable et un coefficient d'absorption relativement élevé.

Vu le développement rapide des outils informatiques, la simulation des cellules solaires est devenue un outil indispensable à l'optimisation de la conception des cellules solaires.

L'optimisation des paramètres des cellules solaires est importante vu qu'elle permet d'améliorer leurs rendements de conversion. C'est le but de ce travail qui consiste à optimiser par simulation l'épaisseur, la largeur de la bande interdite appelé aussi gap et la densité des atomes de dopage ainsi que, la densité des défauts de la couche absorbeur en $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$. La simulation est effectuée à l'aide du logiciel SCAPS.

Ce mémoire est organisé comme suit :

- Dans le premier chapitre nous faisons appel à quelques notions utiles dans le domaine photovoltaïque. Où, nous commençons tout d'abord par un rappel sur les matériaux semiconducteurs, la jonction PN et le rayonnement solaire. La définition d'une cellule solaire PV, son principe de fonctionnement, ainsi que son schéma équivalent et ses caractéristiques PV essentielles, sont ensuite décrits. À la fin, nous donnons une description des différentes générations des cellules PVs.
- Le deuxième chapitre est consacré à la description de la technologie des couches minces et leurs méthodes de dépôts ainsi que les différents éléments constituant d'une cellule solaire PV en $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$.
- Dans le troisième chapitre nous présentons les équations fondamentales du modèle utilisé par le logiciel SCAPS. Ensuite, nous décrivons la méthode de simulation par ce logiciel. Puis, nous optimisons quelques paramètres physiques et géométriques de la couche absorbeur en $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$ d'une cellule solaire en couche mince.
- Enfin, nous terminerons par une conclusion générale et perspective.

Chapitre I

**Généralités sur les cellules solaires
photovoltaïques**

Chapitre I: Généralités sur les cellules solaire photovoltaïques

I. 1. Introduction

Ce premier chapitre présente les concepts clés dans le domaine des cellules solaires photovoltaïques (PV). On commence par un rappel sur les matériaux semiconducteurs, la jonction PN et le rayonnement solaire. Puis, La définition d'une cellule solaire PV, son principe de fonctionnement, ainsi que son schéma équivalent et ses caractéristiques PV essentielles, sont ensuite décrits.

I. 2. Matériaux semi-conducteurs

La plupart des systèmes électroniques reposent sur des matériaux semiconducteurs. Ce sont des corps dont la résistivité se situe à mi-chemin entre celle des conducteurs et celle des isolants. Bien que les semiconducteurs n'aient pas la même conductivité que les matériaux conducteurs, ils ont certaines propriétés très importantes.

Un semiconducteur est l'intermédiaire entre un métal et un isolant. À une température $T=0k$, il se comporte comme un isolant mais il conduit l'électricité dès que la température augmente. Il est possible de faire varier la conductivité des semi-conducteurs sur plusieurs ordres de grandeur ce qui rend ces derniers très intéressants pour réaliser des composants électronique actifs [1].

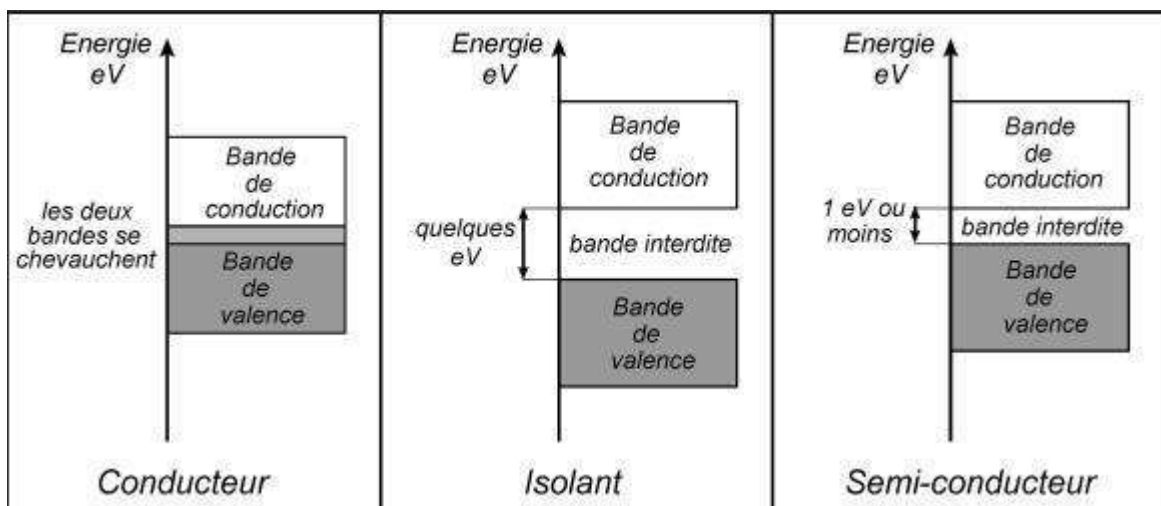


Figure I.1 : Diagramme de bande de différents types des matériaux

I. 2. 1. Semiconducteurs intrinsèques

Un semiconducteur intrinsèque est un matériau semiconducteur dont le comportement électrique ne dépend que de sa structure, et non de l'adjonction d'impuretés comme dans le cas du dopage.

I. 2. 2. Semiconducteurs extrinsèques

Un semiconducteur extrinsèque est un semiconducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques lui conférant des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques (diodes, transistors, etc...) et optoélectroniques (émetteurs et récepteurs de lumière, etc...).

Pour augmenter la conductivité des semiconducteurs, on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin.

a).Dopage de type P

Un semiconducteur type P est un semiconducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type accepteurs (ex : Bohr B). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles acceptent un électron de la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur.

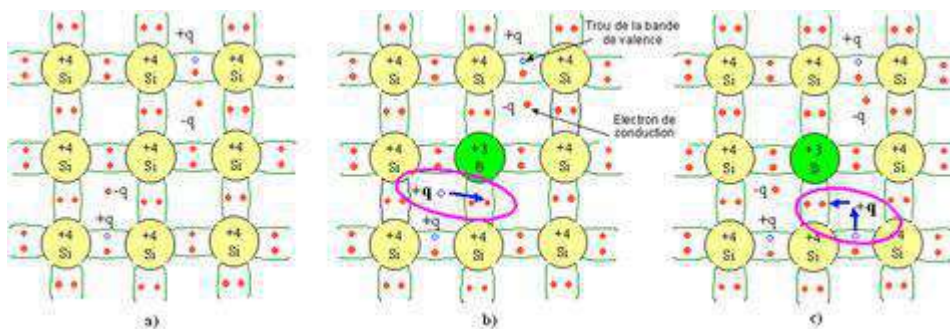


Figure I.2 : Représentation schématique des liaisons électroniques pour Le semiconducteur silicium (Si) dopé P par du Bohr (B)

La figure I.2 met en évidence qu'un semiconducteur dopé P a une densité d'électrons n plus faible et une densité de trous p plus élevée que le même semiconducteur pris dans sa configuration intrinsèque. On dit alors que les électrons sont les porteurs minoritaires et les trous, les porteurs majoritaires.

Pour les semiconducteurs extrinsèques, la densité de dopant est toujours très supérieure à densité de porteurs intrinsèques $N_A \gg n_i$. Dans le cas d'un type P, la densité de trous est donc proche de celle du dopant accepteur N_A .

Ainsi plus la densité d'accepteurs est élevée plus le niveau de Fermi se rapproche de la bande de valence. À la limite si $N_A = N_v$ le niveau de Fermi entre dans la bande de valence, on dit alors que le semiconducteur est dégénéré.

La figure I.3 donne graphiquement le bilan électronique pour un semiconducteur dopé P.

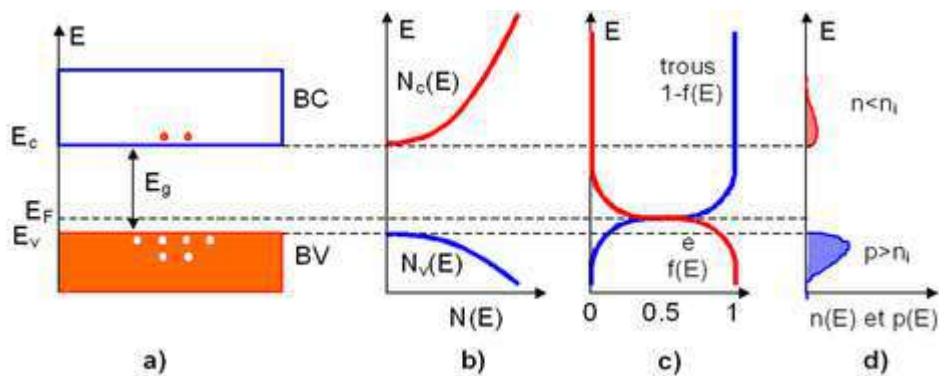


Figure I. 3 : Bilan électronique pour un semiconducteur dopé P

b).Dopage de type N

Un semiconducteur type N est un semiconducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type donneurs (ex : arsenic As). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles donnent un électron à la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semiconducteur.

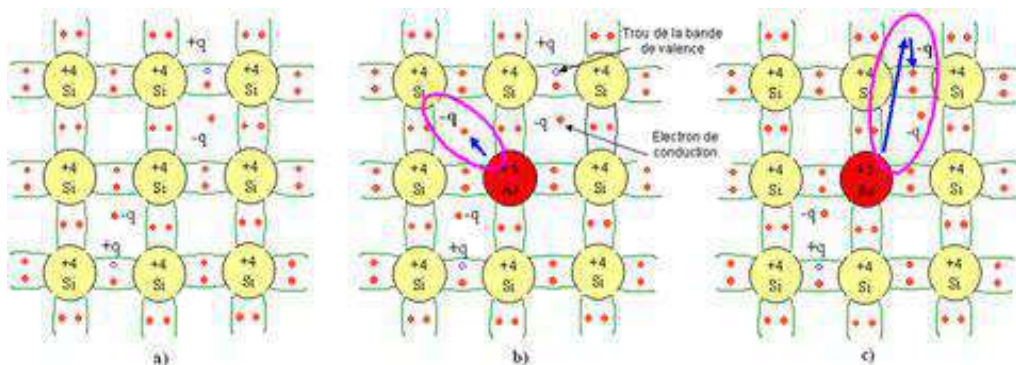


Figure I.4 : Représentation schématique des liaisons électroniques pour Le semiconducteur silicium (Si) dopé N par de l'arsenic (As)

La figure I.4 met en évidence qu'un semiconducteur dopé N a une densité d'électrons n plus élevée et une densité de trous p plus faible que le même semiconducteur pris dans sa

configuration intrinsèque. On dit alors que les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous, les porteurs minoritaires.

Ainsi plus la densité d'accepteurs est élevée plus le niveau de Fermi se rapproche de la bande de conduction. À la limite si $N_D = N_c$ le niveau de Fermi entre dans la bande de conduction, on dit alors que le semiconducteur est dégénéré.

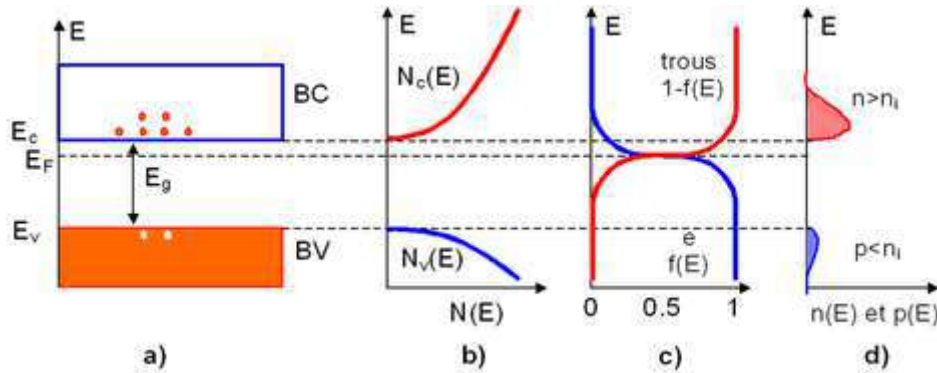


Figure I.5 : Semiconducteur dopé N. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'état énergétique c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurées)

c). Jonction P-N (Diode)

Le contact entre un semiconducteur de type N et un semiconducteur de type P du même cristal est connu sous le nom de jonction PN. La différence de densités donneur et accepteur $N_D - N_A$ passe d'une valeur négative pour la zone P à une valeur positive pour la zone N. Pour une jonction abrupte, la loi d'évolution de cette différence est fournie par deux constantes.

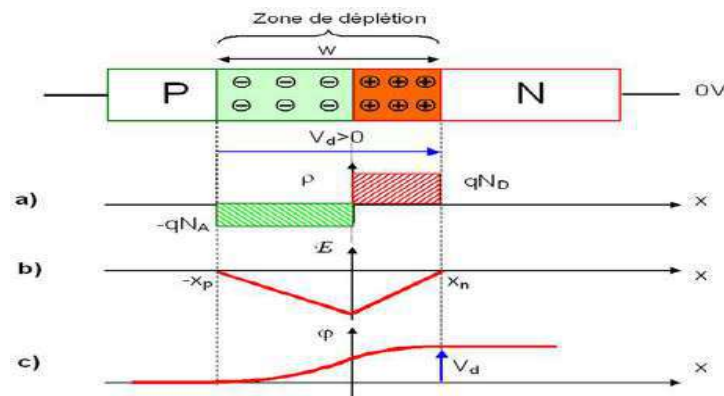


Figure I.6: Jonction PN. a) Charge d'espace, b) Champ électrique, c) Potentiel électrostatique

I. 3. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un ensemble d'ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il s'agit d'un rayonnement à spectre complet, allant de l'ultraviolet lointain (comme les rayons gamma) aux ondes radio et à la lumière visible. Le rayonnement solaire contient également des rayons cosmiques avec des particules animées avec une vitesse et une énergie extrêmement élevées. Une partie de ce rayonnement est filtrée par la couche d'ozone avant d'atteindre la troposphère. Grâce à la photosynthèse, elle est nécessaire à la plupart des espèces vivant sur terre. [2]

Le rayonnement électromagnétique est constitué de "grains " lumineuses appelées photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ .

I. 4. Cellules solaires photovoltaïques

I. 4. 1. Définition et principe

Une cellule solaire PV est un composant semiconducteur convertissant l'éclairement incident en puissance électrique [3], cette phénomène appeler effet photovoltaïque, qui consiste à l'apparition d'une différence de potentiel produite par la génération de porteurs de charge par excitation lumineuse au voisinage d'une jonction PN,

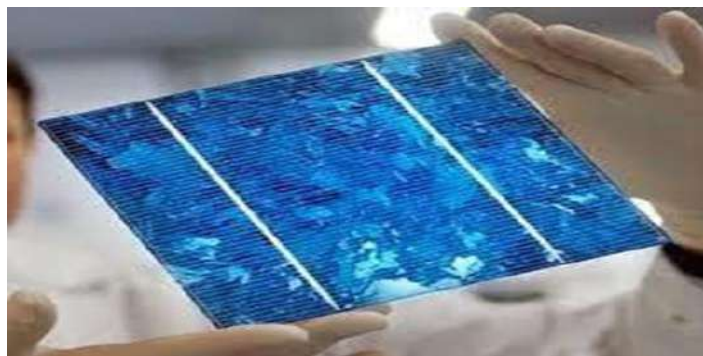


Figure I.7 : Cellule solaire PV

Les étapes suivantes expliquent ce phénomène de conversion :

- 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 semiconducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif [3] ;

La figure suivante illustre le principe de fonctionnement d'une cellule solaire PV.



Figure I.8: Principe de fonctionnement d'une cellule solaire PV

I.4.2. Les différents types de cellules solaires

a). Cellules monocristallines

Ces cellules dites de première génération ont le meilleur rendement mais un coût élevé due à leur fabrication complexe [4].

- Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire).
- Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

b). Cellules polycristallines

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible [4].

- Coût de production moins élevé.
- Procédé nécessitant moins d'énergie.
- Rendement 11-13% (18% en Labo).

c). Cellules amorphes

Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé [4].

- Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo).
- Durée de vie plus faible.


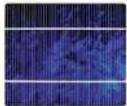

	Technologie	Rendements	Durée de vie	Points forts	Points faibles
	Silicium Mono cristallins	15 à 18%	35 à 40 ans	Rapport Puissance*/Surface : 130 à 165 Wc/m ² Rendement en forte luminosité	Prix au m ² le+ élevé / Moindre production en faible luminosité, perte de productivité lors de fortes températures
	Silicium Poly cristallins	12 à 15%	30 à 35 ans	Rapport Puissance*/Surface : 110 à 144 Wc/m ² Meilleur rapport qualité/prix	Moindre production en faible luminosité mais meilleur que le mono, accepte des orientations sud + /-60° et des inclinaisons entre 10 et 45
	Silicium Amorphe	6 à 11%	30 à 35 ans	Faible rapport puissance/m ² Moins sensible à l'orientation, à l'inclinaison Productivité en faible luminosité	Rapport P _{cc} */Surface : 40 à 70 Wc/m ²

Figure I.9 : Rendement des différents types des cellules solaires

I. 4. 3. Modélisation d'une cellule solaire

a). Cellule solaire idéale

Si la caractéristique de la jonction est de la forme : $I = I_s(e^{\frac{qV}{nKT}} - 1)$. On peut admettre qu'en présence de lumière il y a apparition d'un photocourant supplémentaire, I_{ph} dont le sens est opposé au courant direct. En branchant un circuit extérieur sur la cellule solaire, on recueille ce courant.

Le courant sous lumière vaut [5] :

$$I = I_{ph} - I_s(e^{\frac{qV}{nKT}} - 1) \quad (I.1)$$

La tension V est donnée par :

$$V = \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} - I}{I_s} + 1 \right) \quad (I.2)$$

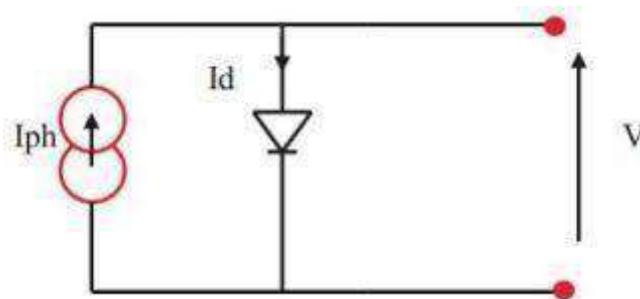


Figure I.10 :Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale

b). Cellule solaire réelle

La figure I.11 présente le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle, où deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma, elles vont influencer sur la caractéristique I(V) de la cellule.

La première est la résistance série R_s . Cette résistance est liée de l'impédance des électrodes et de la base. Il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction.

La deuxième est la résistance shunt R_{sh} qui correspondre aux pertes dans la surface et pertes dues aux défauts dans le matériau. Il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera drainée par cette résistance et il ne pourra être délivré à la charge.

L'équation de la caractéristique I(V) de la cellule photovoltaïque compte tenu des résistances R_s et R_{sh} s'écrit donc [5] :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.3)$$

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (I.4)$$

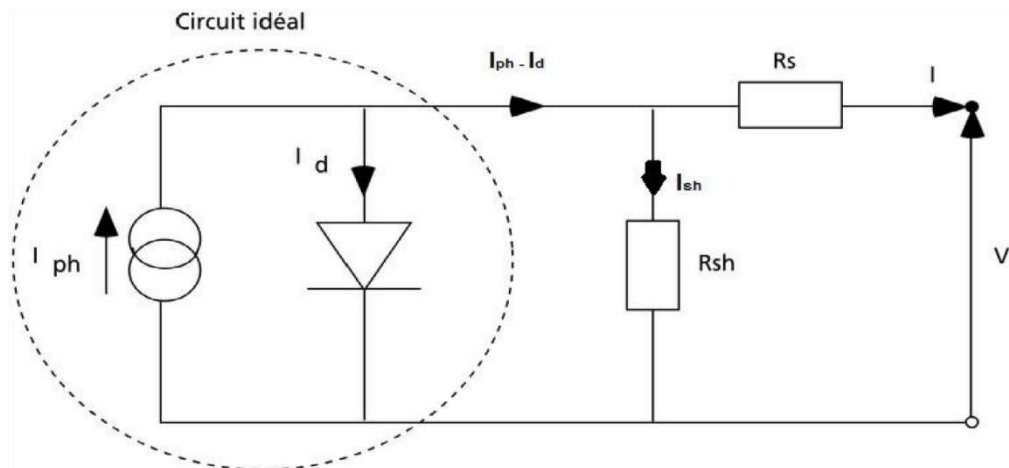


Figure I.11 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

I. 4. 4. Différentes caractéristiques d'une cellule solaire

a). Courant de court-circuit, I_{sc}

Le courant de court-circuit est le courant débuté par la cellule sous éclairage en court-circuitant la sortie. C'est à dire que [6]:

$$I_{sc} = I(V = 0) \quad (I.5)$$

b). Tension de circuit ouvert, V_{co}

La tension de circuit ouvert est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert. C'est à dire [6]:

$$V_{co} = V(I = 0) \quad (I.6)$$

c). Réponse spectrale, $SR(\lambda)$.

Le rapport du courant total généré par la cellule au courant pouvant être généré pour chaque longueur d'onde du spectre incident est appelé réponse spectrale d'une cellule solaire. Il renseigne sur la réaction de la cellule au rayonnement incident et permet de sélectionner la plage de fonctionnement de la cellule [7] :

$$SR(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{qF(\lambda)(1-R(\lambda))} \quad (I.7)$$

d). Puissance maximale, P_m

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand la produit $V \cdot I$ est maximum, Si V_m et I_m sont la tension et le courant pour lesquels on a ce maximum, la puissance maximale est la surface du plus grand rectangle de cotés V_m et I_m :

$$P_m = (V \cdot I)_{max} = I_m \cdot V_m \quad (I.8)$$

e). Facteur de forme, FF

On appelle facteur de forme, le rapport de la puissance maximale au produit $I_{sc} \cdot V_{co}$. Le facteur de forme indique la qualité de la cellule, il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_{sh} [8].

$$FF = \frac{P_m}{I_{soVco}} \quad (I.9)$$

f). Rendement de conversion, η

Le rendement de conversion d'une cellule solaire est le rapport de la puissance maximale pouvant être extraite à la puissance du rayonnement incident [8] :

$$\eta = \frac{P_m}{A.P_i} = \frac{I_{soVco}FF}{A.P_i} \quad (I.10)$$

Où : A est la surface de la cellule

I. 5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le concept de base d'une cellule photovoltaïque, son modèle mathématique, son schéma électrique ainsi que ses différents types des cellules photovoltaïques.

Chapitre II

**Cellules solaires en couches minces
à base de $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$**

Chapitre II : Cellules solaires en couches minces à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$

II. 1. Introduction

Les matériaux semiconducteurs tels que Sb_2S_3 , Sb_2Se_3 et $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ sont devenus des matériaux prometteurs pour les applications de cellules solaires car ils contiennent des éléments abondants de la croûte terrestre, ont un coût de production inférieur à celui des cellules de première génération, contiennent des éléments non toxiques, et ne se dégradent pas en raison de la température et de l'humidité.

Ces types de matériaux ont d'autres caractéristiques intéressantes telles qu'une conductivité de type p, des transitions directes de bande interdite et un coefficient d'absorption relativement élevé.

Bien que les mesures expérimentales disponibles des efficacités de conversion pointent vers $\sim 3,6\%$ - $7,6\%$, une modélisation théorique récente des cellules solaires basée sur $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ montre que des efficacités plus élevées allant jusqu'à 28% peut être atteint par la variation du rapport de composition $S/(S+Se)$.

Dans ce chapitre on commence par quelques notions générales sur la technologie des couches minces, ensuite on donne les différentes méthodes de dépôts des couches minces, puis on termine par les différents éléments constituant d'une cellule solaire PV en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$.

II. 2. Cellules solaires en couches minces

Les cellules à couche mince sont classées comme des cellules de 2^{ème} génération. En général, ce type de cellule est divisé en deux catégories : le silicium a-Si et les semiconducteurs polycristallins tels que le CIGS et le CdTe. Aujourd'hui, diverses méthodes de dépôt (CVD) offrent une grande liberté dans la fabrication de semiconducteurs.

Étant donné que les cellules solaires à couche mince sont constituées de compositions semiconducteurs avec un espace direct et une absorption élevée, le besoin fondamental est que l'épaisseur de la couche mince soit supérieure au coefficient d'absorption, ce qui permet d'absorber une plus grande quantité de lumière [24,25].

a). Avantages de la technologie de type mince

- Des prix bas car la transformation nécessite moins d'énergie et les matériaux sont généralement peu coûteux, ce qui permet une production à grande échelle.
- La capacité de créer et d'utiliser des semi-conducteurs difficiles à produire grâce à la flexibilité des approches de mise en page.

- Il utilise fréquemment des matériaux semi-conducteurs avec une bande interdite directe, ce qui entraîne un coefficient d'absorption élevé.

b).Inconvénients

- La difficulté à générer plusieurs couches qui s'accrochent les unes aux autres.
- Un vaste substrat amplifie les difficultés d'obtention d'une épaisseur, d'une composition et d'une qualité constante.
- Le problème des interfaces défectueuses causées par une inadéquation entre les maillages des matériaux.

II .3. Comment sont fabriquées les cellules solaires à couche mince ?

- **Matériau photovoltaïque** : C'est le principal matériau semiconducteur et c'est celui qui est responsable de la conversion de la lumière solaire en énergie telle que le CdTe, l'a-Si ou le CIGS.
- **Couche conductrice** : Une couche de matériau conducteur tel que l'aluminium est nécessaire pour éviter les pertes d'électricité et améliorer la conductivité.
- **Couche protectrice** : pour prolonger la durée de vie du module solaire, une fine couche de verre de haute qualité en plastique est ajoutée au sommet du système pour améliorer sa durabilité et le protéger de l'environnement.

Peu importe le type de cellule solaire à couche mince que vous fabriquez, car elles sont toutes fabriquées de la même manière. Tout ce que vous avez à faire est de placer le matériau PV principal (a-Si, CdTe ou CGIS) entre une feuille de matériau conducteur et une couche de verre ou de plastique.

II. 4. Technique de caractérisation des cellules couches minces

a). Caractérisation structurelle

Ces techniques dépendent de différents types d'analyse comme la diffraction des rayons X qui donne la structure cristalline des matériaux et de différents types de microscopes comme la microscopie à force atomique (AFM) ou la microscopie Raman qui permet d'obtenir des informations supplémentaires sur les techniques de diffraction et de spectroscopie infrarouge.

b) Caractérisation optique

- **La Spectroscopie visible**

Cette technologie, qui repose sur l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la matière dans le domaine du proche UV et du très proche IR, permet de déterminer les constantes optiques de la matière lors de l'analyse (le taux de transparence, le coefficient d'absorption, le gap optique et coefficient d'extinction).

- **L'ellipsométrie**

L'ellipsométrie est la mesure des épaisseurs et des indices de couches minces. Les types d'ellipsométrie les plus courants, qui sont tous basés sur le même principe de base, sont :

- Ellipso mètre à extinction
- Ellipso mètre à modulation de phase
- Ellipso mètre à élément tournât.

c) **Caractérisation électrique**

Ceux-ci incluent les caractéristiques courant-tension I (V), capacité-tension C (V) pour évaluer la densité d'impuretés, la technique à quatre points (mesure de la résistance) et l'effet Hall pour évaluer la mobilité des porteurs de charge.

II. 5. Dépôts des couches minces

Le dépôt des couches minces peut être composé de deux types : dépôt en phase vapeur physique (PVD) et dépôt en phase vapeur chimique (CVD).

II. 5. 1. Méthodes physiques

a). Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

Le PVD est une méthode de dépôt de matériau sur n'importe quel substrat en utilisant les vapeurs du matériau déposé. Pour transférer les atomes de la cible vers le substrat en évitant la formation de poudre due à la condensation dans une phase homogène, il faut (10^{-5} à 10^{-10} Pa),

et l'avantage de cette technique est que :

- Bonne pouvoir de recouvrement ;
- Faible température de dépôt ;
- Bonne adhérence de dépôt.

Aussi nous citons 3 techniques de ce dépôt les quelles :

- Le mode de la production vapeur ;

- L'état électrique du substrat ;
- La nature du gaz constituant.

b). Vaporisation

Cette méthode consiste à vaporiser ou sublimer sous vide les atomes du matériau qui sont vaporisés et condenser sur le substrat. Les conditions expérimental de vaporisation (le vide, la nature, la forme creuset, la distance creuset, substrat,...). Nous citons aussi les différentes techniques de l'vaporisation mais les plus utilisées :

- Vaporisation résistive ;
- Vaporisation par bombardement électrique ;
- Vaporisation réactive.

c). Epitaxie par jet moléculaire (EJT)

Cette méthode consiste à faire intégrer des flux atomique ou moléculaire dirigé vers un substrat généralement monocristallin porté à une température adéquate, l'EJM est une méthode dite de trois températures particulièrement adopté au dépôt des composés du fait de leur évaporation non congruente.

d). Pulvérisation

La pulvérisation est l'éjection d'atomes de la surface d'un matériau solide appelé la cible, soumis a un bombardement des particules énergétique. L'énergie des ions incidents communique leur énergie aux atomes de la surface du matériau bombardé par transformation de quantité de mouvement.

e). Ablation laser

Cette méthode offre la possibilité de vaporiser la matière d'une surface solide sous l'impact d'une surface d'un faisceau laser pulsé grâce à ses grandes puissances crêtes, Aussi l'ablation laser impulsional peut être classifiée en deux catégories selon le milieu dans laquelle a bien attraction laser-matière sous vide et sous faible pression gazeuse ou en milieu liquide. En 1965 les premier dépôts ablation laser pulsé a été réaliser par Smith et Turner, les deux processus importants qui se produisent l'ablation laser dans les liquides sont les formations des ondes de choc et pulvérisation dynamique de gaz.

II. 5. 2. Méthodes chimiques

a. Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

C'est une procédé exploité industriellement depuis de nombreuses années dans des secteurs d'activité très varié les avantages de ce procédé :

- Offre la possibilité de réaliser des dépôts sélectifs ;
- Très bonne pureté des matériaux déposés ;
- Vitesse de dépôt supérieure à celle de PVD ;
- Facilité de dopage du matériau à l'aide de quantités d'impulsions contrôlées.

Nous citons aussi d'autres techniques CVD par exemple :

- CVD thermique
- OM CVD (Organo –Métallique CVP)
- LCVD (Laser CVD)
- PE CVD (Plasma Enhanced CVD)

b. dépôts Sol-gel

La fixation des particules de TiO_2 en phase liquide sur le substrat peut être réalisée suivant les deux possibilités :

- **PMTP (previously Mode Titanium Powder)**

Dans ce cas les particules de TiO_2 préalablement préparées sont mise en solution colloïdale pour être ensuite déposées sur le substrat.

- **Préparation in-situ**

Dans ce cas le dépôt est basé sur la méthode dit sol-gel. C'est la méthode la plus utilisé en ce mode de fixation, La processuelle de cette fixation est comme suite :

- Tirage de la plaque du substrat ;
- Evaporation du solvant organique ;
- Calcination de la couche déposée sur substrat ;

II. 6. Cellule solaire en couches minces à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$

Une cellule solaire PV en couches minces à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ est composée d'un substrat (verre ou glasse), couche de contact en FTO, couche fenêtre en ZnO, couche tampon en CdS et couche absorbeur $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ possédant une énergie de gap (E_g) de 1 à 1.7 eV [7]. Les films minces de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ sont déposées par des différentes couches d'isolation d'électrons. La méthode est faite par vaporisation thermique de poudre mixée, d'autre part la couche tampon en CdS est réalisée comme une couche d'isolation d'électrons qui systématiquement étudié le développement de rendement grâce à l'amélioration de contient soufre du film d'alliage de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$.

II. 7. Propriétés physique des couches minces en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$

Les éléments Sb_2S_3 et Sb_2Se_3 sont isomorphisme et elles ont la même structure orthorhombique cristalline (Figure II.1). L'atome S est remplacé par l'atome Se pour créer le $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$. Une caractéristique très important de la couche $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ est le gap des cellules à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ qui peuvent être variée à partir du rapport $S/(S+Se)$, où le gap de Sb_2Se_3 et Sb_2S_3 sont environ de 1.1 et 1.7 eV respectivement (Figure II.2) [9]

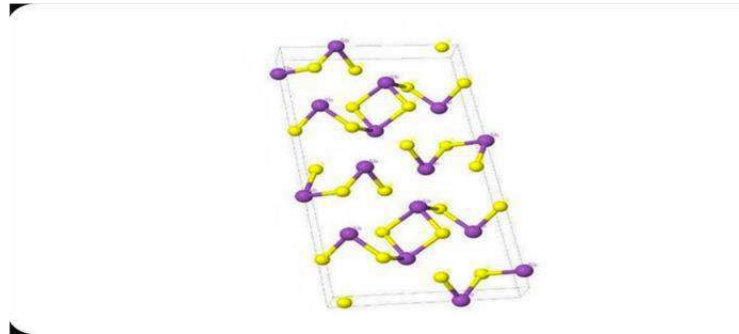


Figure II.1 : Structure cristalline orthorhombique d'élément $Sb_2S(Se)_3$ les sphères jaunes représentent les atomes S(Se), les sphères blanches représentent les atomes Sb

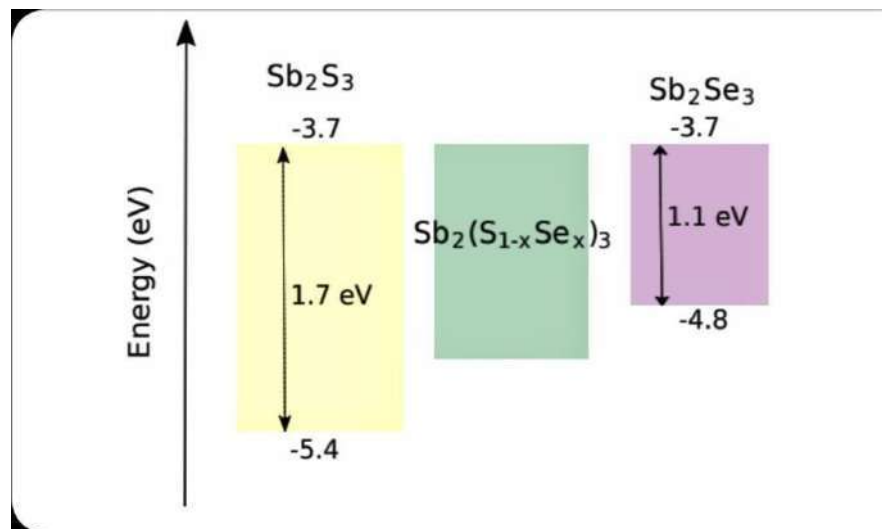


Figure II.2 : Structure schématique d'une couche absorbeur en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$

II. 8. Techniques de synthèse des cellules solaires en couches minces à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$

La synthèse des composés Sb_2S_3 et Sb_2Se_3 pour les cellules solaires PVs ont été signalés employant principalement les techniques: dépôt chimique en bain (CBD),

thermique et évaporation thermique rapide revêtement par rotation, dépôt vapeur de transport, et dépôt de pulvérisation magnétron.

La première méthode utilisée pour produire le matériau de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ est présentée par Deng et al. Ils synthétisent pour la première fois les nanotubes de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ en utilisant une technique synthétique colloïdale, il a aussi découvert une relation quadratique entre la bande gap et son rapport de composition soufre / sélénium.

Cette méthode change la concentration des atomes S de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$. Cela conduit à augmenter le gap donc la nouvelle expression de $E_g(x)$ est :

$$E_g(x) = 0.0344 \cdot x^2 + 0.0481 \cdot x + 1.18 \text{ eV} \quad (\text{II. 1})$$

Il y a une autre méthode pour obtenir une grande efficacité graduelle du gap de $Sb_2(S_{1-x}Se_x)_3$ à partir d'un dépôt séquentiel de TiO_2 . Tel que la meilleure cellule produite par ce groupe pourrait atteindre un rendement de conversion de 6,6%.

Aussi La préparation de cellules solaires à hétérojonction planaires à base de $Sb_2(S_{1-x}Se_x)_3$ a été rapportée par Zhang et al [10].

II. 9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait un rappel sur les couches minces et les différentes techniques de dépôt et nous avons présenté le matériau $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ qui constitue la partie essentielle pour la cellule photovoltaïque que nous allons étudier dans ce qui suit ainsi que la description d'une cellule à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$.

Chapitre III

**Simulation d'une cellule solaire
photovoltaïque à base de $\text{Sb}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_3$**

Chapitre III : Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$

III.1. Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre les équations fondamentales du modèle utilisé par le logiciel SCAPS. Ensuite, nous décrirons la méthode de simulation par ce logiciel. Puis, nous allons étudier l'effet de l'épaisseur W_p , la composition Y et la densité des atomes de dopage N_a ainsi que, la densité des défauts N_t de la couche absorbeur en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ sur la densité de courant de court circuit (J_{sc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion (η) de la cellule. Ce qui nous a permis de déduire les valeurs optimales donnant le meilleur rendement.

III. 2. Equations fondamentales du modèle de simulation

La résolution de l'équation de continuité en combinaison avec l'équation de Poisson et les équations des densités de courants permet de calculer la densité de photocourant de la cellule. Ces équations sont résolues via des logiciels de simulation des dispositifs à base de semiconducteurs.

III. 2. 1. Equations de continuité

Les équations de continuité traduisent la conservation des porteurs de charges libres, elles permettent de déterminer en tout point et à chaque instant la concentration des porteurs de charges. Elles s'écrivent pour les électrons et pour les trous [11] :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n(x)}{\partial x} + (G_n - R_n) \quad (\text{III.1})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p(x)}{\partial x} + (G_p - R_p) \quad (\text{III.2})$$

Où : q est la valeur absolue de la charge électronique élémentaire, n et p sont les concentrations d'électrons et de trous respectivement, J_n et J_p , sont les densités de courant d'électrons et de trous respectivement, G_n et G_p sont les taux de génération des électrons et des trous respectivement, R_n et R_p sont les taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement.

III. 2. 2. Équation de poisson

Le déplacement des porteurs libres peut entraîner la création d'une charge d'espace locale ρ , qui est liée au champ électrique E interne dans le semiconducteur par l'équation de Poisson. L'équation de Poisson est définie par [11] :

$$\text{div}E = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (\text{III.3})$$

Où : $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$ est la constante diélectrique totale (permittivité) du semiconducteur.

ϵ_r et ϵ_0 sont la permittivité relative et la permittivité du vide respectivement. ρ est la densité locale de charge d'espace donnée par :

$$\rho = q(N_d - N_a + p - n) \quad (\text{III.4})$$

III. 2. 3. Équations de courants

Les courants dans le semiconducteur résultent du déplacement des porteurs de charge, électrons et trous, sous l'action d'une force. L'origine de la force peut être un champ électrique ou un gradient de concentration. Dans le premier cas, le courant est dit de conduction ou de dérive (drift), dans le second il est dit de diffusion [11] :

La densité de courant totale de dérive-diffusion des électrons dans la bande de conduction, et dont la concentration vaut n , est donnée par [11] :

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (\text{III.5})$$

De façon similaire, la densité de courant totale de dérive-diffusion des trous dans la bande de valence, et dont la concentration vaut p , est donnée par [11] :

$$J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (\text{III.6})$$

Les constantes D_n et D_p sont appelées constantes de diffusion des électrons et des trous respectivement calculées à partir de la relation dite d'Einstein : $D_{n,p} = \frac{KT}{q} \mu_{n,p}$ et $\mu_{n,p}$ est la mobilité d'électrons indice n ou trous indice p .

III.3. guerrou.nouredine30@gmail.com Présentation du logiciel utilisée

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes

électroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de ce logiciel : Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degrave [12].

SCAPS est originalement développé pour les structures de cellules de famille $CuInSe_2$ et $CdTe$. Cependant, plusieurs extensions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour les cellules solaires cristallines (de la famille Si et GaAs), ainsi que les cellules solaires amorphes (a-Si et les micro-morphes Si). Un aperçu de ses principales caractéristiques est donné ci-dessous :

- Jusqu'à 7 couches semiconducteurs;
- Mécanismes de recombinaison : bande-à-bande (directe), Auger, SRH ;
- Les niveaux des défauts : en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux ;
- Les niveaux des défauts, type de charge : pas de charge (neutre), monovalent (un seul donneur, accepteur), bivalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur) ;
- Les niveaux des défauts, distribution énergétique : niveau discret, uniforme, Gauss, sous forme de queue ou bien une combinaison ;
- Les niveaux des défauts, propriété optique : Excitation directe par la lumière est possible (connu par effet de l'impureté photovoltaïque, IPV) ;
- Les niveaux des défauts, transitions métastables entre les niveaux ;
- Contacts : Travail de sortie du métal ou régime de bande plate ;
- Propriété optique (Réflexion ou transmission) du filtre ;
- Génération : à partir d'un calcul interne ou bien d'un fichier $g(x)$ fourni par l'utilisateur ;
- Illumination : plusieurs types de spectre sont disponibles (AM0, AM1.5D, AM1.5G, AM1.5G, Monochromatique, Blanc, etc.) ;
- Illumination: du côté p ou n.

III. 4. Modèle de simulation

La structure de base de la cellule solaire SbSSe étudiée est la suivante : SLG/Mo/p-SbSSe/n-CdS/n-ZnO/Al comme illustré sur la Figure III.1 avec les couches de matériaux suivantes : 0.4 μ m SbSSe, 50 nm CdS et 370 nm ZnO un Mo sur substrat de verre. Telque, le verre sodocalcique (SLG) est considéré comme un substrat, le molybdène (Mo) sur SLG comme contact arrière, le film SbSSe comme couche absorbante de type p, le sulfure de cadmium (CdS) comme couche tampon de type n, Al ZnO dopé (ZnO:Al) en tant que couche d'oxyde conducteur transparent, et enfin Al en tant que couche de métal de contact avant, respectivement.

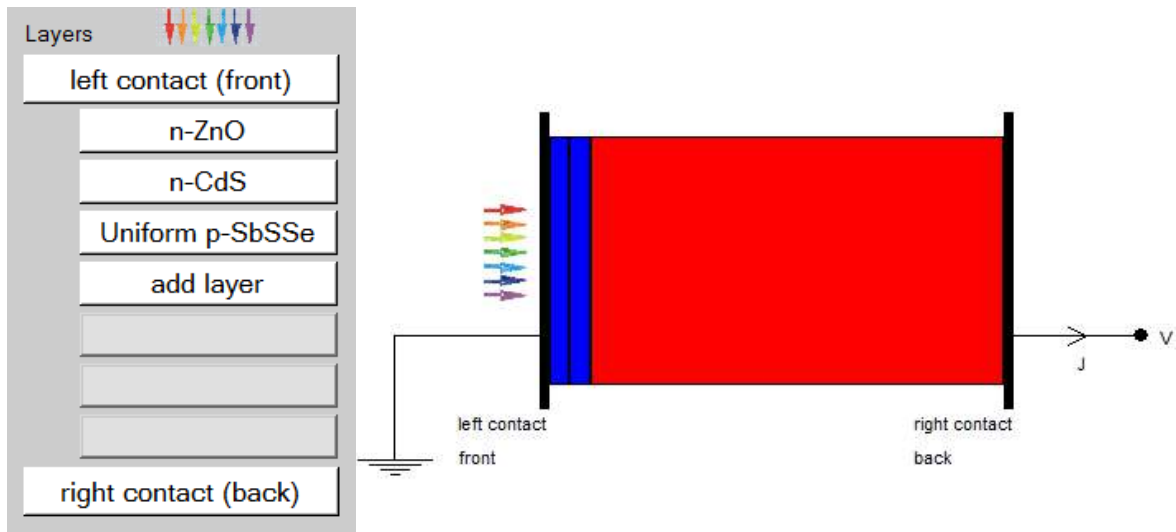


Figure III.1. Structure de la cellule à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$

A l'aide du logiciel SCAPS, nous allons optimiser l'épaisseur W_p , la composition Y et la densité des atomes de dopage N_a ainsi que, la densité des défauts N_t de la couche absorbeur en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$. Ce qui nous a permet de déduire les valeurs optimales donnant le meilleur rendement.

Le tableau III.1 illustre les valeurs des paramètres de chaque couche de la cellule utilisés dans la simulation :

Matériau	p- $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$		n-CdS	ZnO
	Pur A(y=0)	Pur B(y=1)		
Semiconducteur Propriété P du matériau pur				
Épaisseur de la couche (μm)	0.4	0.4	0.05	0.37
Affinité électronique χ (eV)	4.15	3.7	4.2	4.45
Permittivité relative, ϵ_r	15.1	22	10	9
Mobilité des électrons μ_n (cm/V.s)	15	9.8	100	100
Mobilité des trous μ_p (cm/V.s)	42	10	25	25
Concentration des atomes accepteurs, N_A (cm ⁻³)	10^{15}	10^{15}	-	-
Concentration des atomes donneurs, N_D (cm ⁻³)	-	-	10^{18}	10^{20}
Energie du gap, E_g (eV)	1.18	1.634	2.4	3.3
Densité effective des états dans la bande de conduction, N_C (cm ⁻³)	10^{19}	2×10^{19}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}
Densité effective des états dans la bande de valence, N_V (cm ⁻³)	10^{19}	10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
Vitesse thermique des électrons, (cm/s)	10^7	10^7	10^7	10^7
Vitesse thermique des trous, (cm/s)	10^7	10^7	10^7	10^7

Tableau III.1 : Paramètres de chaque couche de la cellule utilisés dans la simulation

III. 5. Résultats et discussion

La simulation de la cellule se fait pour un profil uniforme de la composition Y de la couche absorbeur, $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$. Tel que $Y = X = \frac{[S]}{[S]+[Se]}$; $0 \leq Y = X \leq 1$

III. 5. 1. 1. Effet de l'épaisseur W_p

la figure III.2 ci-dessous montrent la variation des performances de la cellule en fonction de l'épaisseur W_p de la couche absorbeur en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ de type P pour : $Y=0 \rightarrow E_g = 1.18 \text{ eV}$ et $N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ et $N_t=5.10^{12} \text{ cm}^{-3}$:

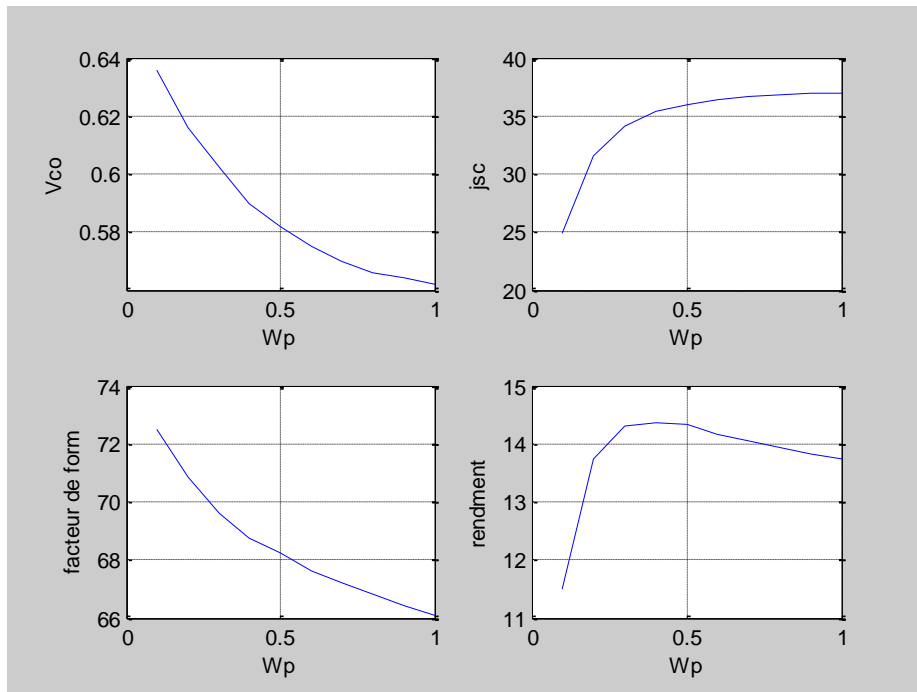


Figure III.2 : Effet de l'épaisseur de la couche $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ sur les performances de la cellule PV

Il est clair que, lorsque l'épaisseur W_p augmente l'absorption et par conséquent la génération des porteurs de charge augmente aussi. Ce qui augmente le courant. Mais, la tension et le facteur de forme diminué. Le compromis est une valeur optimale de l'épaisseur de l'ordre de $0.4 \mu\text{m}$ qui donne un rendement, maximal de 14.37 %.

III. 5. 1. 2. Effet de la composition Y (gap E_g)

La figure III.3 ci-dessous illustre la variation des performances de la cellule en fonction de la composition Y de la couche absorbeur en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ de type P pour : $W_p = 0.4\mu m$ et $N_a = 10^{15} cm^{-3}$ et $N_t = 5.10^{12} cm^{-3}$.

La largeur de la bande interdite E_g dépend de Y par une équation quadratique : donnée par :

$$E_g(Y) = 0.3096.Y^2 + 0.1443.Y + 1.18 \text{ (eV)} \quad (III.1)$$

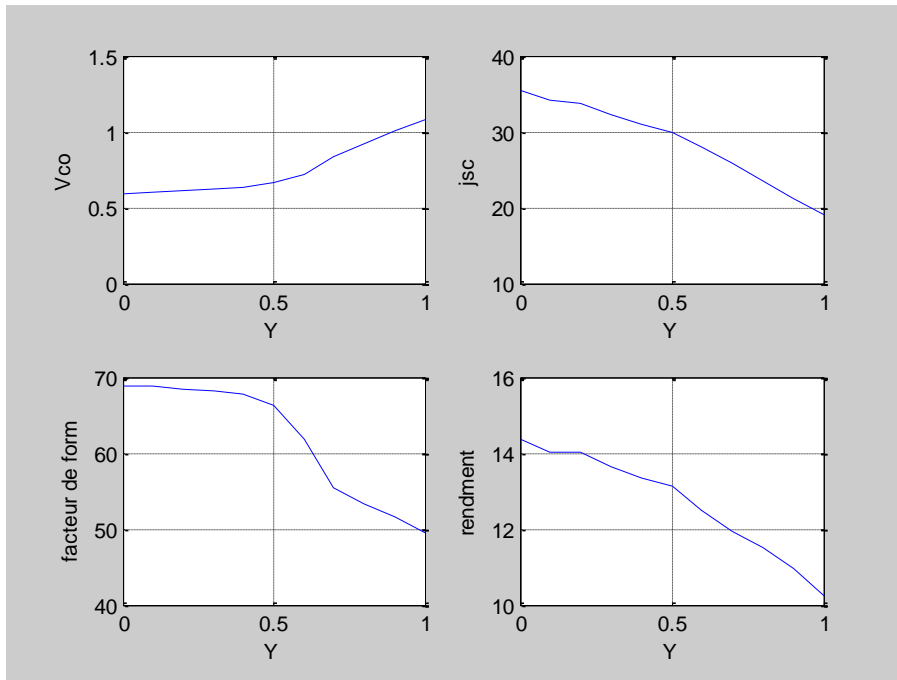


Figure III.3 : Effet de la composition Y de la couche $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ sur les performances de la cellule PV

D'après la figure III.3, on remarque que si Y (le gap E_g) augmente le nombre de porteurs photogénérés diminue d'où, la diminution du courant. Ce qui en résulte, une valeur optimale de la composition Y est $Y = 0$ qui correspond à un gap $E_g = 1.18$ eV. Le rendement maximal est $\eta = 14.37\%$.

III. 5. 1. 3. Effet de la concentration des atomes de dopage N_a

la figure III.4 ci-dessous montrent la variation des performances de la cellule en fonction du dopage N_a de la couche absorbeur en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ de type P pour : $W_p = 0.4\mu m$ et $N_t = 5.10^{12} cm^{-3}$ et $Y = 0$.

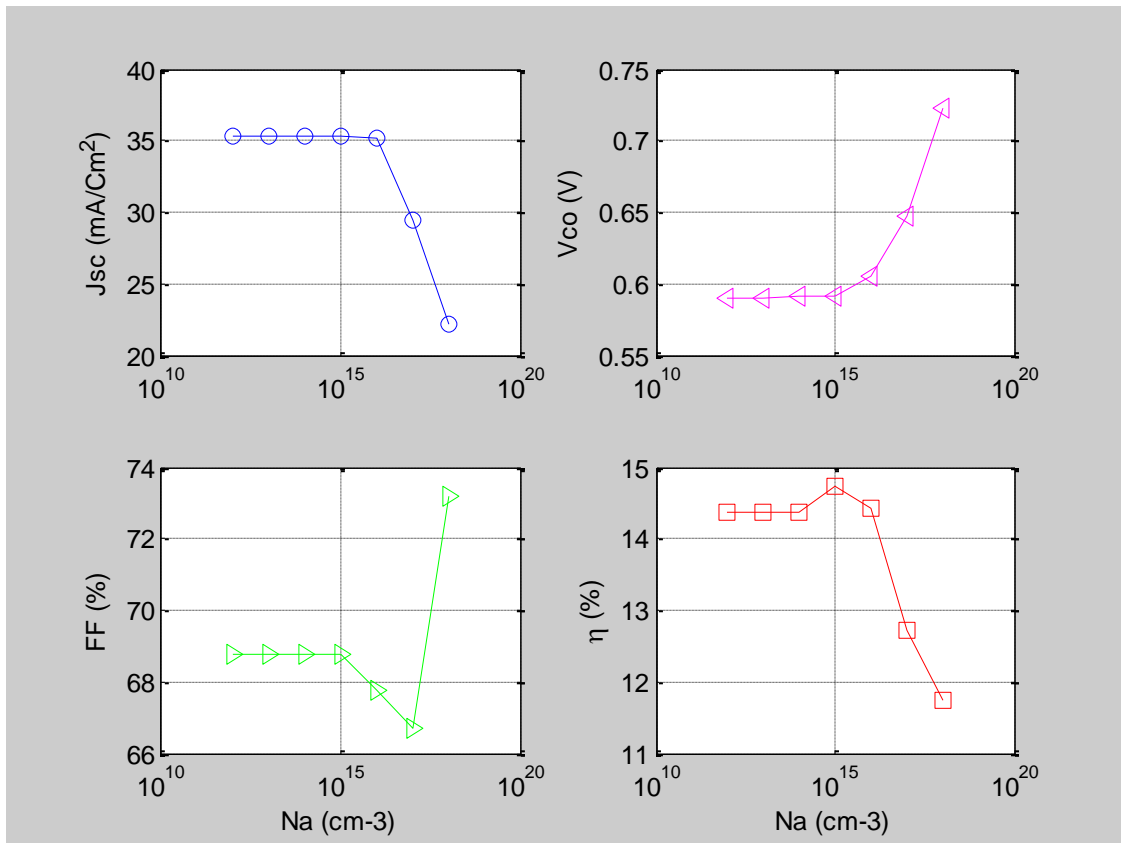


Figure III.4 : Effet du dopage N_a de la couche $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ sur les performances de la cellule PV

Comme il est indiqué sur la figure III.4, les performances de la cellule sont presque invariables tant que le dopage N_a est inférieur à 10^{15} cm^{-3} . Mais dès qu'il dépasse cette valeur, une chute des performances est observée. Ce qui nous a permis de conclure que la valeur optimale du dopage N_a ne doit pas dépasser 10^{15} cm^{-3} . Le rendement correspondant est $\eta = 14.37 \%$.

III. 5. 1. 4. Effet de la densité de défauts N_t

La figure III.5 ci-dessous illustre la variation des performances de la cellule en fonction de la densité de défauts de la couche absorbant en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ de type P pour : $W_p = 0.4 \mu\text{m}$ et $N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ et $Y=0$.

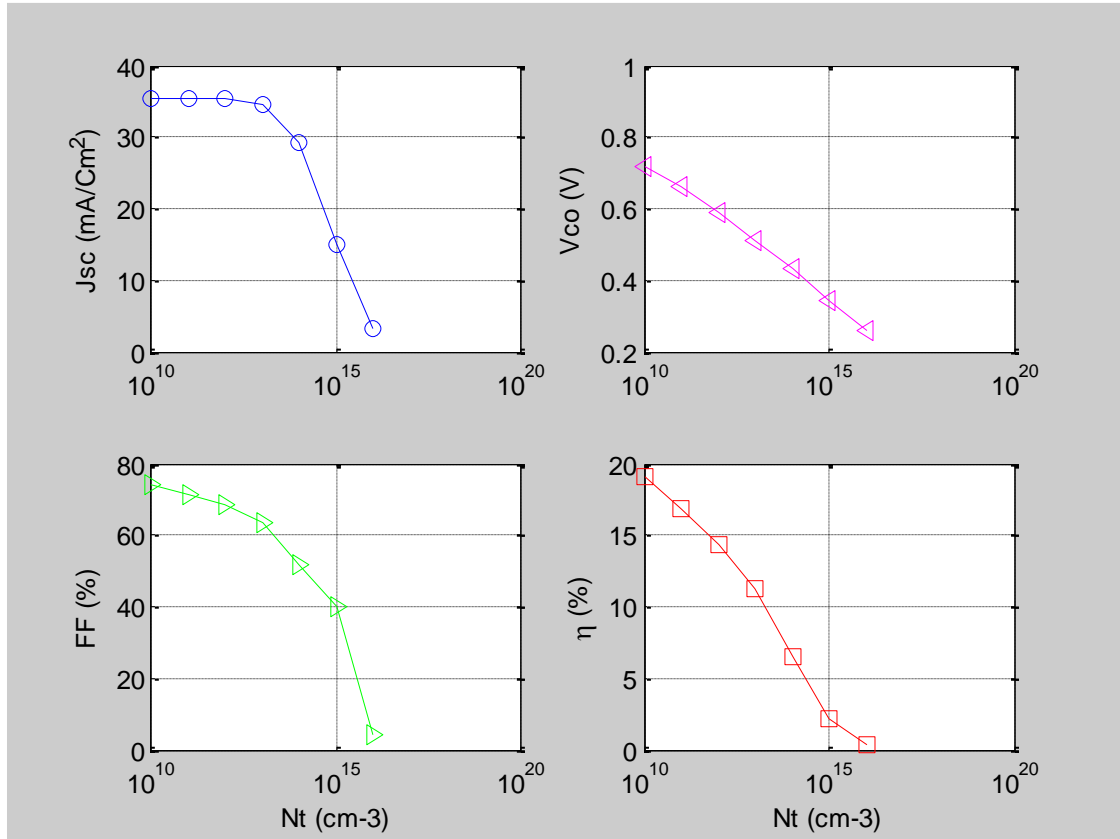


Figure III.5 : Effet de la densité de défauts de la couche $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ sur les performances de la cellule PV

D'après la figure III.5, on remarque que pour avoir un bon rendement de la cellule, il faut que la couche absorbeur en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ doit posséder une densité de défauts N_t le plus faible possible.

III. 6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons trouver les valeurs optimales des paramètres physiques et géométrique de la couche absorbeurs en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ d'une cellule PV. L'optimisation est faite moyennant du logiciel de simulation SCAPS.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail de mémoire nous avons optimiser par simulation, à l'aide du logiciel SCAPS, l'épaisseur W_p , la composition Y et la densité des atomes de dopage N_a ainsi que, la densité des défauts N_t de la couche absorbeur en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ d'une cellule solaire PV en couches minces.

Les résultats obtenus ont montré que :

- ✓ L'épaisseur W_p de la couche absorbeur en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ doit avoir une valeur optimale de l'ordre de $0.4 \mu m$;
- ✓ Le meilleur rendement est obtenu pour une valeur optimale de la plus faible composition $Y = 0$ qui correspond à un gap minimale $E_g = 1.18 eV$;
- ✓ la valeur optimale du dopage N_a ne doit pas dépasser $10^{15} cm^{-3}$;
- ✓ la couche absorbeur en $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ doit posséder une densité de défauts N_t le plus faible possible ;

Tous ces valeurs optimales donne un rendement maximal $\eta = 14.37 \%$.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] :Bernard EQUER « **Energie solaire photovoltaïque** », volume 1, publié par Ellipses Editions Marketing et l'UNESCO 1993.
- [2] S. Mostefa Kara, « Etude et simulation de cellules photovoltaïques a couches minces a base de CIS et CIGS », Mémoire de Magister, Tlemcen, 2012.
- [3] Kahina OUALI << Influence des factures météorologiques sur le rayonnement solaire >>Mémoire de magister, 2011.
- [4] Achou Yacine et Rachedi Abdallah, Mémoire de master ,«**Réalisation d'une carte de mesure et d'affichage à based'Arduino Mega2560 : application aux systèmesphotovoltaïque**»Université de ouargla 2016.
- [5] Dahmane Abderrahmane, << Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p)>> Mémoire MASTER ACADEMIQUE, 2016.
- [6] Houari Mohamed Laid << Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque en couches minces à basedeCZTSSe avec une bande interdite graduelle>>.
- [7] S. M. Sze, Physics of semiconductor Devices, 2nd ed. John Wiley& Sons Inc, 1981.
- [8] Benchellouia Mohammed Fethi et BelmadaniMaaradj,«**Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque en couches minces à base de Sb₂(S_{1-x}Se_x)₃ avec un profil graduel**»Université de ouargla 2020.
- [9] Les cellules photovoltaïques, Professeur accompagnateur : M. Dietschy.
- [10]LASLADJ Meriem, “Simulation numérique des cellules solaires de troisième générationpour des applications spatiales”, Mémoire de Magister en Electronique, UniversitéFERHAT Abbas de Setif-1, (Algérie), 2014.
- [11] Thalía Jiménez and al, State of the Art on Sb₂(S_{1-x}, Se_x)₃ Thin Film Solar Cells.
- [12] Fatima HADJHERS, investigation de propriétés structurales, optique, et électrique des films TTO élaborés par pulvérisation cathodique RF Effet de recuit, Mémoire de magister soutenu le 14/02/2011.