



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهر وميكانيك

Département de d'automatique et d'électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Energies renouvelables en électrotechnique

Thème

Contribution à l'étude des cellules solaires photovoltaïques à base des couches minces

Présenté par :

BEDA Oualid

SOUFRANI Mebkhout

Soutenu(e) publiquement le: 15/9/2024

Devant le jury :

BOUKHARI Hamed	MCB	Univ. Ghardaïa	Président
BONAUDINA Belkhir	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
AZZAOUI Mohammed	MCB	Univ. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2023/2024



N° d'enregistrement

...../...../.....

ملخص

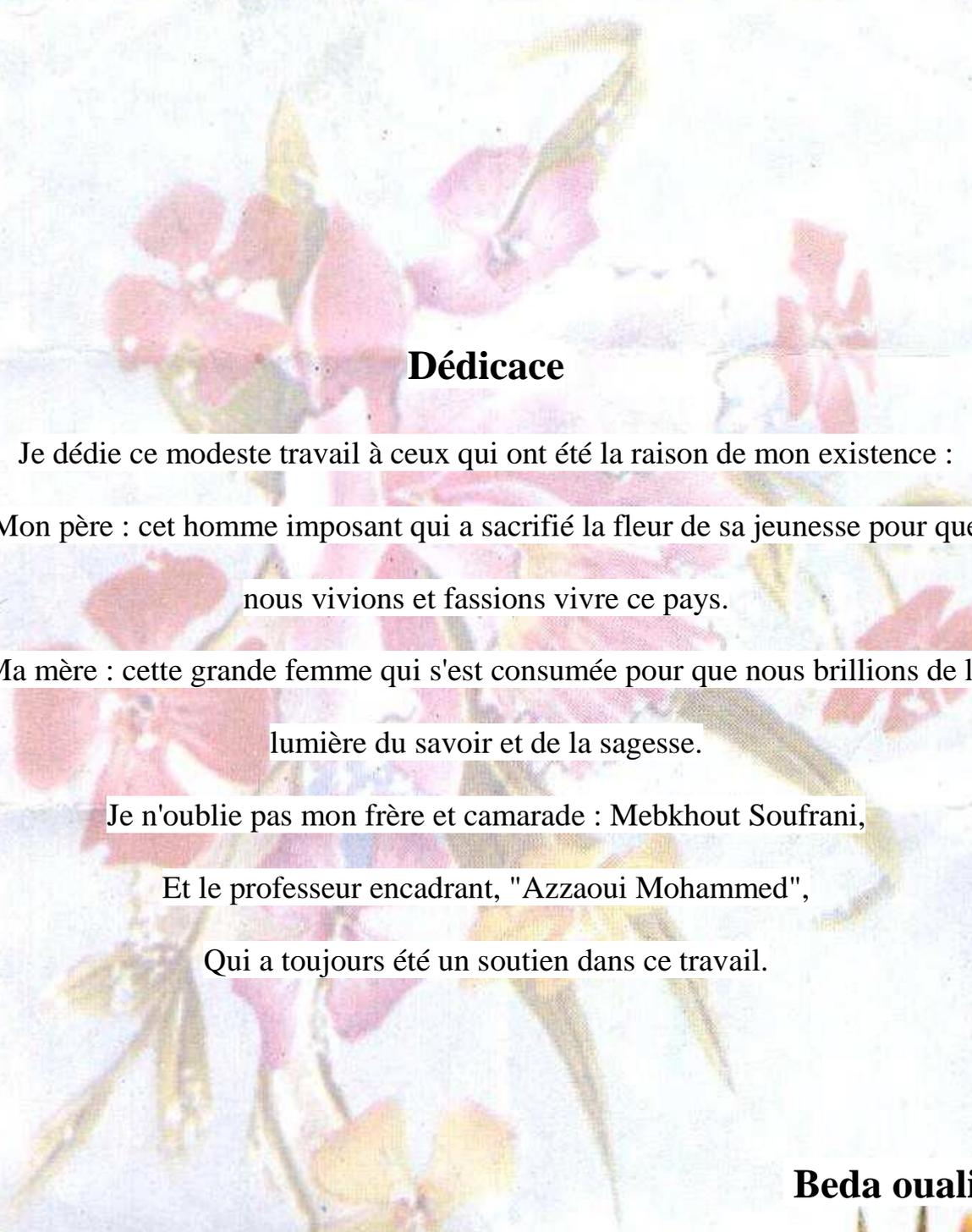
في هذا العمل قمنا بدراسة الخلايا الشمسية الكهروضوئية ذات الأغشية الرقيقة. لقد قمنا بإجراء دراسة ببيولوجرافية عن الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة وخصائصها الرئيسية. اخترنا بعد ذلك بنيتين من الخلايا الشمسية الكهروضوئية: أحدهما بدون طبقة عازلة (p-i-n: nc-Si: H/a-Si: H/a-Si: H) ، والثانية بطبقة عازلة (p-p'-i-n: nc-Si: H/ nc-Si: H/a-Si: H/a-Si: H). قمنا بعد ذلك بمحاكاة هاتين الخليتين باستخدام برنامج SCAPS لاستخراج خصائص الإخراج Voc و Icc و FF و η لهاتين الخليتين وكذلك لتحليل التغيرات في الطاقة وكثافة التيار. بالمقارنة بين نتائج الخليتين وجدنا أن الطبقة العازلة المضافة في الخلية p-p-i-n تحسن خصائص الخلية الكهروضوئية وتزيد من مردودها يمكن أن نستنتج أن السمك 10 نانومتر هو الأفضل للطبقة العازلة.

Résumé

Dans ce travail nous avons étudié les cellules solaires photovoltaïques à couches minces. Nous avons fait une étude bibliographique sur les cellules solaires à couches minces et leurs principales caractéristiques. Nous avons ensuite choisi deux structures de cellules solaires photovoltaïques : l'une sans couche tampon (p-i-n :nc-Si : H/a-Si : H/a-Si : H, et l'autre avec une couche tampon (p-p'-i-n :nc-Si : H/ nc-Si : H /a-Si : H/a-Si : H). Nous avons ensuite simulé ces deux cellules par le logiciel SCAPS pour extraire les caractéristiques de sortie Voc, Icc, FF, η de ces deux cellules ainsi que pour analyser les variations d'énergie et de densité de courant. La comparaison des résultats de ces deux cellules, nous avons constaté que la couche tampon ajoutée dans la cellule p-p-i-n améliore les propriétés de la cellule photovoltaïque et augmente son rendement. Nous pouvons conclure que l'épaisseur de 10 nm est la meilleure pour la couche tampon.

Summary

In this work we studied thin-film photovoltaic solar cells. We made a bibliographic study on thin-film solar cells and their main characteristics. We then chose two structures of photovoltaic solar cells: one without buffer layer (p-i-n:nc-Si:H/a-Si:H/a-Si:H, and the other with a buffer layer (p-p'-i-n:nc-Si:H/nc-Si:H/a-Si:H/a-Si:H). We then simulated these two cells by SCAPS software to extract the output characteristics Voc, Icc, FF, η of these two cells as well as to analyze the variations of energy and current density. Comparing the results of these two cells, we found that the buffer layer added in the p-p-i-n cell improves the properties of the photovoltaic cell and increases its efficiency. We can conclude that the thickness of 10 nm is the best for the buffer layer.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui ont été la raison de mon existence :

Mon père : cet homme imposant qui a sacrifié la fleur de sa jeunesse pour que nous vivions et fassions vivre ce pays.

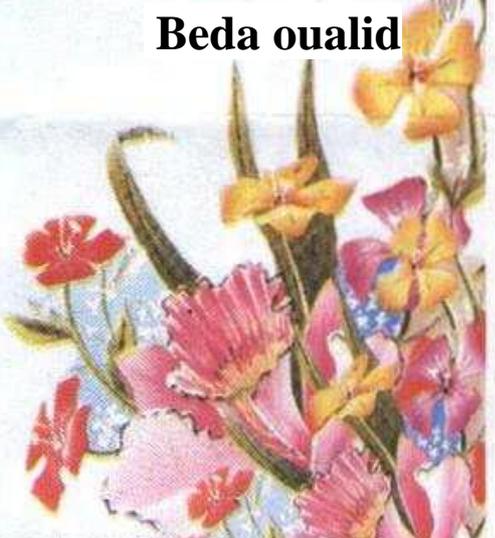
Ma mère : cette grande femme qui s'est consumée pour que nous brillions de la lumière du savoir et de la sagesse.

Je n'oublie pas mon frère et camarade : Mebkhout Soufrani,

Et le professeur encadrant, "Azzaoui Mohammed",

Qui a toujours été un soutien dans ce travail.

Beda oualid





Dédicace

C'est avec fierté que je dédie les fruits de mes années d'études à :

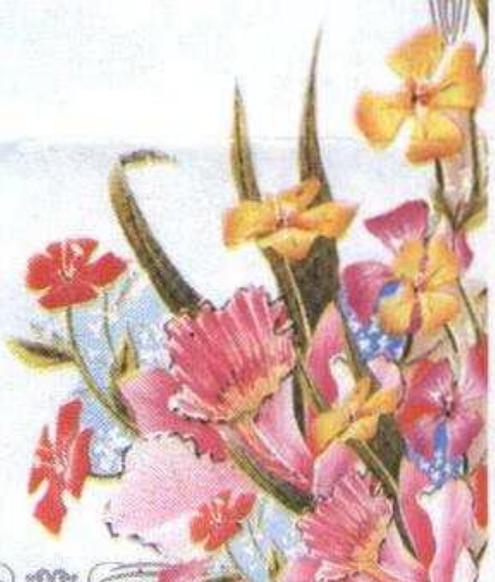
Mon père, que Dieu ait son âme : qui a été un soutien et un pilier pour moi en
toutes circonstances,

Ma chère mère : la plus précieuse des perles et le joyau le plus cher avec lequel
je me pare.

À mes frères et sœurs et toute ma famille qui ont été présents à chaque instant de
ma vie,

À tous mes amis, collègues et à toute personne qui nous témoigne des
sentiments d'amour et de respect.

Soufrani mebkhout



REMERCIEMENTS

Nous remercions Allah Tout-Puissant de nous avoir permis de compléter ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude envers M. Azzaoui Mohammed, chef du département de génie civil à la Faculté des sciences et de la technologie de l'Université de Ghardaïa, pour avoir proposé ce mémoire, pour ses directives et son assistance qui nous ont permis de comprendre ce sujet et de l'enrichir des informations nécessaires.

Il a été à nos côtés du début à la fin de ce travail.

Enfin, nous tenons à remercier chaleureusement tous les membres du comité d'évaluation, en leur souhaitant réussite et prospérité dans leur vie.

Nous n'oublions pas de remercier tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin, ainsi que tous ceux qui nous ont soutenus et priés pour nous.

Nous remercions également tous nos collègues du département, ainsi que tous les étudiants, enseignants et personnel de l'Université de Ghardaïa.

MERCI...

Sommaire

Résumé	
Dédicace	
Remerciement	
Sommaire	I
Liste des figures	V
Liste des Tableaux	VII
Liste d'abréviations.....	IX
Introduction générale	1

SOMMAIRE

Chapitre I : Propriétés optiques, et électriques

1	Introduction	4
1.1	Le silicium	4
1.2	La méthode de Czochralski	4
1.3	La méthode de la zone flottante	5
1.4	Matières semi- conducteur	5
3.1.1.	Type de matière	5
3.1.2.	Diagramme des bandes d'énergie	6
3.1.3.	Semi-conducteur gap direct et indirect	6
3.1.4.	Semi-conducteurs intrinsèques	7
3.1.5.	Semi-conducteurs extrinsèques	7
1.5	Techniques de dopage des semi-conducteurs	8
3.2.1.	Dopage de type N	8
3.2.2.	Dopage de type P	8
3.2.3.	Jonction PN	9
2	Diffusion et recombinaison des porteurs	9
2.1	Recombinaisons en volume	10
3	Défauts cristallographiques	10
3.1	Les impuretés	10
3.2	Défaut accepteur	11
3.3	Défaut donneur	11
3.4	Défaut amphotère	12
4	Les recombinaisons volumiques	12
4.1	Recombinaisons Shockley-Read-Hall (SRH)	12
4.2	Recombinaison radiatives	13
4.3	Recombinaisons Auger	13
4.4	Recombinaisons en surface	14
5	Structure du silicium amorphe hydrogéné	14
5.1	Propriétés électriques du silicium amorphe	14
5.2	Propriétés optiques du silicium amorphe	15

Sommaire

6 Le Silicium nanocristallin	15
6.1 Propriétés optiques silicium nanocristallin	16
6.2 Propriétés électrique le silicium nanocristallin	16
7 Silicium cristallin	17
7.1 Structure silicium cristallin	17
8 Paramètres d'entrées	18
8.1 Gap d'énergie	18
8.2 Affinité électronique	18
8.3 Permittivité diélectrique relative	18
8.4 Mobilité d'électrons	19
8.5 Dopage en accepteurs et donneur	19
8.6 Densité effective de la bande de conduction et de valence	19
9 Conclusion	19
Chapitre II : Etude bibliographique sur les cellules photovoltaïques	
1 Introduction	22
2 Historique des cellules photovoltaïques	22
3 Définition Energies solaire photovoltaïque	23
4 Spectre solaire	23
5 Cellule photovoltaïque	24
5.1 Définition de la cellule Solaire photovoltaïque	24
5.2 Structure d'une cellule solaire photovoltaïque	24
5.3 L'émetteur	25
5.4 Les contacts	25
6.Principe général du fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque	25
7.Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque à jonction p-n	26
7.1Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale	26
7.2 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle	27
7.3 Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque à jonction p-i-n	28
8 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire photovoltaïque	29
8.1Tension en circuit ouvert (V_{co})	29
8.2 Courant de court-circuit (I_{cc})	30
8.3 Facteur de forme (FF)	30
8.4 Rendement photovoltaïque	30
9 Cellules solaires a couches minces	31
10 Méthodes d'élaboration des couches minces	31
10.1 Dépôt physique en phase vapeur	31
10.2 Dépôt chimique en phase vapeur	31
11 Etapes pour déposer une couche mince	32
12 Les avantages et les inconvénients de la technologie de couche mince	32
12.1 Les avantages de la technologie de couche mince	32
12.2 Les inconvénients de la technologie de couche mince	32
13 Les propriétés optiques et électriques	33

Sommaire

13.1 Cellules au silicium monocristallin	33
13.2 Cellules au silicium amorphe	34
13.3 Silicium amorphe hydrogéné	34
14 Différentes types cellules photovoltaïques	35
14.1 Les cellules multi-jonctions	35
15 Avantages et inconvénients du solaire photovoltaïque	35
15.1 Avantage	35
15.2 Inconvénients	35
16 Conclusion	36

Chapitre III : Résultats et discussions

1 Introduction	39
2 Définition du logiciel SCAPS	39
.1 Support de la communauté scientifique et industrielle	40
3 Fonctionnement du SCAPS-1D	40
3.1 Sélectionnez le point de travail	40
3.2 Choix de spectre solaire approprié	41
3.3 Définir le problème	41
3.4 Définir les couches et les matériaux	41
3.5 Choix de direction de la lumière et de courant	43
3.6 Entrer les paramètres des couches choisies	43
3.7 Sélectionnez les courbes souhaitées	44
4 Paramètre entrée	44
4.1 Coefficient d'absorption de matériaux a-Si:H et nc-Si : H	44
5 Résultat de simulation	46
5.1. Caractéristiques de sortie correspondants au modèle d'absorption SCAPS et au fichier d'absorption SCAPS	46
5.2. Diagrammes des bandes d'énergies de la structure	47
Diagrammes des bandes d'énergies de la structure	47
Variation des densités de courant	48
La densité de courant en fonction tension	50
Rendement quantique (QE)	51
6 Influence de la température de fonctionnement sur les caractéristiques les cellules solaires sans tampon et avec tampon	52
6.1 La simulation Influence de la température de fonctionnement sur les caractéristiques les cellules solaires (sans tampon et avec tampon)	52
7 Influence de l'épaisseur de la couches tampon p'nc-Si :H	53
8 Conclusion	55
Conclusion général	65
Références	67

Liste des figures

Liste des figures :

Figure I.1:Diagramme des bands d'énergie simplifié.	5
Figure I.2:Structure de bande à gap direct, Structure de bande à gap indirect .	7
Figure I.3:Semi-conducteurs intrinsèque	7
Figure I.4:Dopage de type N.	8
Figure I.5:Dopage de type P.	9
Figure I.6:Jonction P-N.	9
Figure I.7:Défauts de dopage (donneur et accepteur)	11
Figure I.10:Mécanisme de recombinaison volumique de type Auger.	13
Figure I.11:Silicium amorphe hydrogéné.	14
Figure I.12: structure du silicium nano cristallin.	16
Figure I.13 :le silicium cristallin	18
Figure II. 1:Analyse spectrale du rayonnement solaire .	24
Figure II. 2:composition d'une cellule photovoltaïque .	24
Figure II. 3:Principe de fonctionnement d'une cellule PV.	26
Figure II. 4:Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale sous éclairement .	27
Figure II. 5:Schéma équivalent d'une cellule solaire real .	28
Figure II. 6:Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque p-i-n .	29
Figure II. 7:Caractéristique I-V d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclairement .	29
Figure II.8: Cristèle de silicium Figure II. 9:Cellule au silicium monocristallin .	33
Figure II. 10:Cellule au Silicium Polycristallin .	34
Figure II. 11:Cellule au Silicium amorphe .	34
Figure II. 12:Les cellules multi-jonction .	35
Figure III. 1:Logiciel SCAPS	40
Figure III. 2:Schéma simplifié d'une cellule solaire (a) p ⁺ in en silicium sans la couche tampon p ['] (nc-Si:H), (b) p ⁺ p ['] in en silicium avec la couche tampon p ['] .	41
Figure III. 3:Schéma représentatif des deux cellules simulées, (a) sans couche tampon. (b) avec couche tampon .	42
Figure III4 .:coefficient d'absorption de a-Si:H du modèle SCAPS	
Error! Bookmark not defined.	
Figure III. 5:Coefficient d'absorption de a-Si:H de fichier extraie de travail A- Rachid	44
Figure III6 .:coefficient d'absorption de a-Si:H du modèle SCAPS	45
Figure III.7: Coefficient d'absorption de a-Si:H de fichier extraie de travail A- Rachid.	45
Figure III. 8:Le diagramme des bandes d'énergies de la cellule (sans tampon)	47
Figure III. 9:Le diagramme des bandes d'énergies de la cellule (avec tampon)	47
Figure III. 10:Variation des densités de courant (sans tampon)	48
Figure III. 11:Variation des densités de courant (avec tampon)	49
Figure III. 12:la variation de courent (J) on fonction tension(v) les cellules solaires sans tampon et avec tampon.	50
Figure III. 13:variation de rendement en fonction longueur d'onde des deux cellules	51
Figure III. 14:La variation de Voc en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (p ['] nc-Si : H)	53
Figure III. 15:La variation de courant court-circuit en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (p ['] nc-Si : H)	54
Figure III. 16:La variation de facteur forme en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (p ['] nc-Si : H)	54
Figure III. 17:La variation de rendement en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (p ['] nc-Si : H)	54

Liste des figures

Liste des Tableaux

Liste de tableaux

Tableau III 1:Paramètres de sortie expérimentales pour les des deux cellules solaires[43].....	42
Tableau III 2:Paramètres d'entrées	43
Tableau III.3:Comparaison des propriétés externes des deux cellules par simulation dans les deux cas ; le modèle d'absorption SCAPS et fichiers d'absorption SCAPS	46
Tableau III.4:Influence de variation de température sur les caractéristiques de cellules (sans tampon).....	52
Tableau III.5:Influence de variation de température sur les caractéristiques de cellules solaire (Avec tampon).....	52

Liste d'abréviations

Liste d'abréviations

Rsh: résistance shunt

Rs : résistance en série

RC : la résistance de charge

Icc : Courant de court-circuit

Voc : tension circuit ouvert

FF : Facteur forme

K_B : Constante de Boltzmann

PVD: Physical Vapor Déposition

CVD : chimique en phase vapeur

MOCVD: Dépôt chimique en phase vapeur d'organométallique

PECVD: Plasma Enhanced chemical Vapor Déposition

PLD: la déposition assistée par la serpulsé

PDS: Photo Thermal Deflection Spectroscopy

DOS: en anglais densité of states

PCBM:phényl-C61-butanoate de méthyle

MOS: Métal-oxyde-semi-conducteur

AM0 : Air Mass (Les spectres solaires hors atmosphère)

SCAPS : Solar Cell Capacitance Simulator

Eg : Energie gap

a-Si:H: Silicium amorphe hydrogéné

nc-Si : silicium nano cristallin

ZF : Float-zone en français la zone flottante

**INTRODUCTION
GENERALE**

Introduction générale

Les cellules solaires photovoltaïques à couche mince sont l'une des technologies modernes dans le domaine de l'énergie solaire. Cette technologie repose sur l'utilisation d'une couche mince de matériaux semi-conducteurs au lieu du silicium traditionnel dans la fabrication des cellules solaires. Les cellules solaires à couche mince sont plus efficaces dans la conversion de la lumière en électricité, et se distinguent par leur coût de production plus bas, leur poids plus léger et leur facilité d'installation.

Les cellules solaires à couche mince sont généralement composées d'une ou plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs tels que le tellure de cadmium (CdTe), le cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS) ou le sulfure de zinc (Zn). Ces matériaux sont utilisés pour absorber la lumière et générer du courant électrique lorsqu'ils sont exposés au rayonnement solaire.

Les cellules solaires à couche mince sont efficaces pour une utilisation sur de grandes surfaces, et peuvent être flexibles et transparentes, ce qui permet leur utilisation dans diverses applications telles que les bâtiments, les voitures et les appareils électroniques.

Malgré ses avantages, les cellules solaires à couche mince rencontrent certains défis techniques, tels que leur résistance aux températures élevées et à l'humidité, ainsi que leur susceptibilité à la corrosion. Par conséquent, le développement de cette technologie nécessite davantage de recherches et d'innovations pour améliorer son efficacité et sa durabilité.

Ce travail est divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous aborderons l'énergie solaire photovoltaïque et le rayonnement solaire qui est l'élément important et fondamental dans la production d'électricité. Nous découvrirons le plus petit composant de ce système, la cellule solaire, sa structure et son principe de fonctionnement, ainsi que ses différents types et certaines de ses caractéristiques distinctives.

Le matériau principal constituant la structure des cellules solaires est le silicium, et nous aborderons les différentes méthodes d'extraction du silicium.

Et nous examinerons des études contribuant à la compréhension et à l'analyse des caractéristiques des cellules solaires à base de silicium. Nous explorerons davantage leur composition, leur fonctionnement et discuterons également des effets des matériaux utilisés dans leur fabrication sur leurs performances.

Dans le deuxième domaine, nous présenterons différentes méthodes de fabrication des couches minces, ainsi que les étapes de dépôt de ces couches. Nous nous familiariserons avec les différents types de matériaux, en mettant l'accent sur le dernier type qui est essentiel dans

Introduction générale

les systèmes à couches minces. Nous avons mentionné certaines des avantages et inconvénients de cette technologie.

Nous avons classé les matériaux les plus importants à partir desquels les couches minces sont formées, notamment le silicium amorphe hydrogéné et le silicium cristallin et le silicium nanocristallin.

Dans ce mémoire, nous examinerons des études contribuant à la compréhension et à l'analyse des caractéristiques des cellules solaires à couche mince. Nous explorerons davantage leur composition, leur fonctionnement et discuterons également des effets des matériaux utilisés dans leur fabrication sur leurs performances. Nous passerons également en revue les avancées technologiques dans ce domaine et les défis auxquels cette technologie est confrontée.

En général, les cellules solaires à couche mince constituent une contribution importante au domaine de la production d'énergie à partir de sources renouvelables. Cette technologie peut contribuer à répondre à nos besoins durables en énergie, améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources naturelles et réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Chapitre I :
Propriétés optiques, et
électriques

1 Introduction

Les semi-conducteurs sont des éléments essentiels dans le monde de la technologie moderne, jouant un rôle vital dans la conversion de l'énergie électrique en énergie lumineuse et vice versa. Cette conversion photovoltaïque repose entièrement sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs, qui se distinguent par leur capacité à conduire l'électricité dans certaines conditions, ce qui les rend idéaux pour une variété d'applications, allant des cellules solaires aux appareils électroniques avancés.

Chaque type de semi-conducteur possède ses propres caractéristiques électriques qui le distinguent des autres.

Dans cette section, nous mettrons en lumière les semi-conducteurs en essayant de fournir une définition spécifique pour chacun d'eux, ainsi que leur structure et leurs méthodes d'extraction. Nous expliquerons également où se trouvent les différences entre eux, ainsi que les méthodes de dopage de chacun. Il est également évident que chaque semi-conducteur a des défauts et des impuretés qui le distinguent des autres, et nous tenterons de mentionner chacune d'elles [1].

1.1 Le silicium

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale de panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de par la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication [1].

Il existe deux méthodes de fabrication :

1.2 La méthode de Czochralski

La technique, développée par Jan Czochralski en 1916, consiste à faire fondre du silicium poly cristallin dans un creuset en quartz à une température de 1450°C. Par la suite, des dopants tels que le bore et le phosphore peuvent être introduits dans le silicium afin de créer des matériaux de type p ou de type n. Un germe de silicium monocristallin présentant une orientation cristallographique spécifique, telle que le plan (100), est positionné en contact direct avec la surface du bain fondu. Au fur et à mesure que le silicium se solidifie et est progressivement tiré vers le haut, il acquiert l'alignement cristallographique de la graine ; par la suite, la vitesse d'étirage est augmentée jusqu'à atteindre la vitesse précise à laquelle le cristal peut se dilater pour atteindre le diamètre souhaité. Le lingot obtenu peut avoir des dimensions allant jusqu'à 30 cm de diamètre et 2 m de long. Dans le domaine du

photovoltaïque, les diamètres ultimes des cellules solaires, dérivées de ces lingots, se situent généralement entre 12,5 et 15,6 cm [2].

1.3 La méthode de la zone flottante

La méthode de la zone flottante (ZF : Float-zone) donne des puretés de matériau bien supérieures car elle est conduite sous vide (pas de pollution par l'oxygène) et que le procédé s'affranchit de la présence du creuset et donc des impuretés métalliques qu'il est susceptible d'introduire dans le monocristal. Cette technologie souffre de rendements médiocres en lumière faible et les coûts de production extrêmement élevés [1].

1.4 Matières semi- conducteur

3.1.1. Type de matière

On peut classer les matériaux suivant ses propriétés électriques en trois types, conducteur, isolant et semi-conducteur.

Un conducteur d'électricité est un corps capable de laisser passer un courant électrique. À l'opposé, un isolant électrique est un corps qui ne laisse pas passer le courant électrique. En physique de l'état solide, la théorie des bandes est une modélisation des valeurs d'énergie que peuvent prendre les électrons d'un solide à l'intérieur de celui-ci. De façon générale, ces électrons n'ont la possibilité de prendre que des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles, lesquels sont séparés par des bandes d'énergie interdites. Selon la façon dont ces bandes sont réparties, il est possible d'expliquer au moins schématiquement les différences de comportement électrique entre un isolant, un semi-conducteur et un conducteur.

Dans la (Figure I.1)est illustré une bonne schématisation de la structure des bandes dans le Conducteur, l'isolant et le semi-conducteur [3].

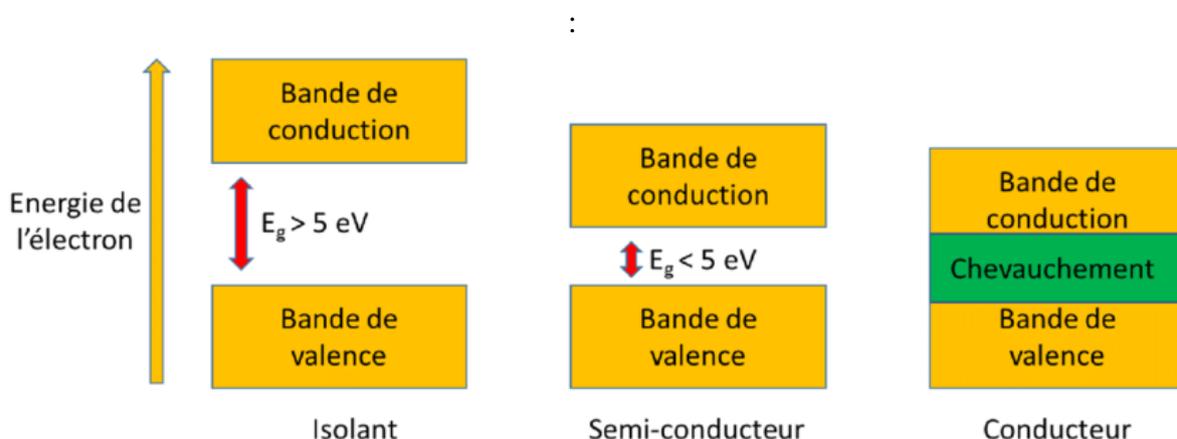


Figure I.1:Diagramme des bands d'énergie simplifié [3].

Effectivement, à température zéro absolue, la conduction est impossible en raison de la bande interdite qui empêche le mouvement des électrons.

La largeur de cette bande interdite est ce qui distingue un isolant d'un semi-conducteur, les matériaux isolants deviennent plus ou moins conducteurs à mesure que la température augmente. En pratique, les matériaux dont l'énergie d'activation intrinsèque ou "gap" est supérieure à 5 eV sont classés comme isolants.

Les semi-conducteurs ont l'énergie d'activation intrinsèque ou "gap" faible (≈ 1 eV). La conduction d'un semi-conducteur est faible et varie beaucoup avec la température. Le silicium et le germanium sont de bons exemples de semi-conducteur [3].

3.1.2. Diagramme des bandes d'énergie

Le diagramme E (énergie) - k (nombre d'onde) est un à la représentation de la dispersion énergétique d'un semi-conducteur permet de définir spatialement les extrema des bandes de conduction et de valence. Ces extrema représentent, dans un semi-conducteur à l'équilibre, des domaines énergétiques où la densité de porteurs type p pour la bande de valence et type n pour la bande de conduction sont importantes.

3.1.3. Semi-conducteur gap direct et indirect

La notion de gap direct et indirect est liée au diagramme des bandes d'énergie d'un semi-conducteur. Lorsque les deux extrémités correspondent au même vecteur d'onde, on parle d'écart direct, tandis que lorsque les vecteurs d'onde des deux extrémités sont différents, on parle d'écart indirect. Du point de vue optoélectronique, les matériaux à bande interdite directe et les matériaux à bande interdite indirecte se comportent différemment. Les porteurs de charge des matériaux à bande interdite directe peuvent se déplacer d'une bande d'énergie à une autre en échangeant simplement des photons, sans modifier significativement leur impulsion. En revanche, les porteurs dans les matériaux à bande interdite indirecte doivent interagir avec les photons et les phonons pour modifier leurs vecteurs d'onde, rendant les transitions moins probables. De nombreux semi-conducteurs III-V, tels que l'arséniure de gallium (GaAs) et l'arséniure d'indium (InAs), ont une bande interdite directe, tandis que d'autres, comme l'antimonure d'aluminium (AlSb), ont une bande interdite indirecte [4].

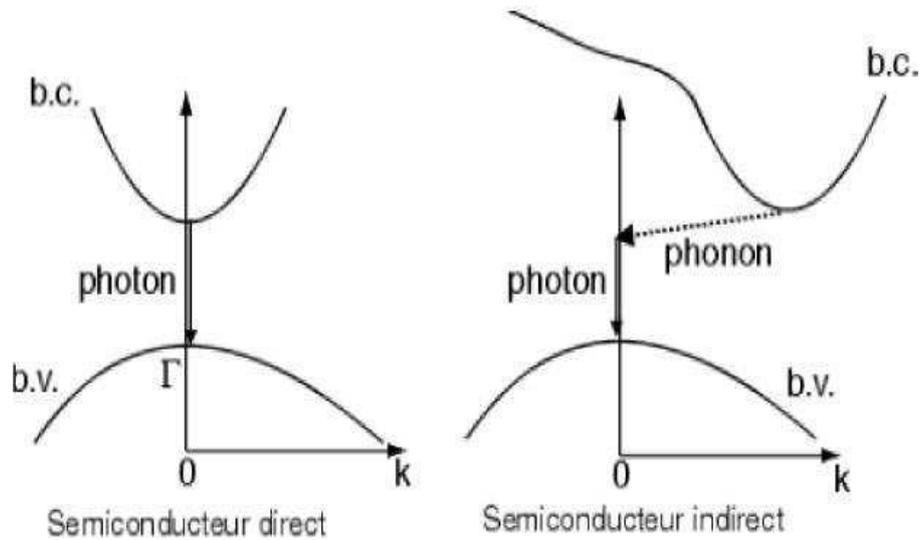


Figure I.2: Structure de bande à gap direct, Structure de bande à gap indirect [5].

3.1.4. Semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur non dopé, ce qui signifie qu'il ne contient que des atomes du matériau de base sans impuretés intentionnellement ajoutées. Dans un semi-conducteur intrinsèque, le nombre de trous et d'électrons générés par la chaleur est équilibré, de sorte qu'il y a une densité égale de porteurs de charge positifs (trous) et négatifs (électrons).

Par exemple, le silicium (Si) est un semi-conducteur intrinsèque couramment utilisé en électronique.

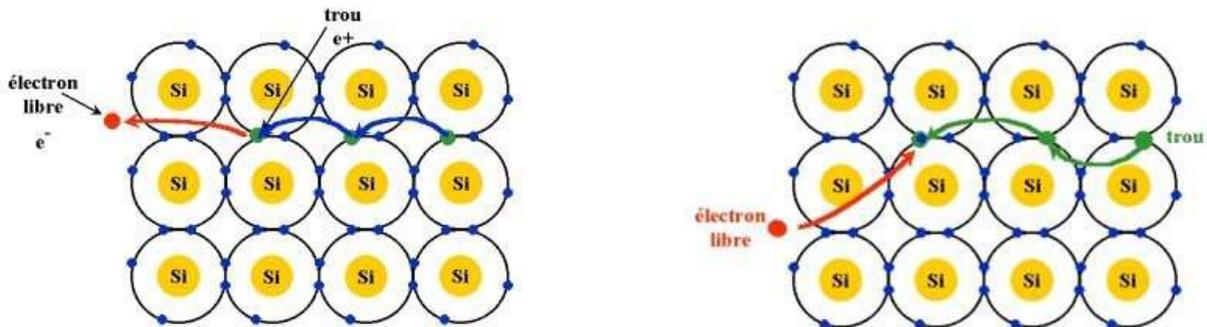


Figure I.3: Semi-conducteurs intrinsèques

3.1.5. Semi-conducteurs extrinsèques

Les semi-conducteurs extrinsèques sont des semi-conducteurs intrinsèques auxquels on ajoute intentionnellement des impuretés pour modifier leurs propriétés électriques. Ces impuretés, appelées dopants, peuvent être de type n ou p, ce qui signifie qu'ils ajoutent respectivement des électrons supplémentaires ou des trous de charge dans la structure du matériau. En dopant un semi-conducteur intrinsèque, on peut contrôler sa conductivité et créer des composants électroniques tels que des diodes, des transistors, etc. Les semi-conducteurs extrinsèques

dopés sont largement utilisés dans l'industrie électronique et optoélectronique pour fabriquer des dispositifs électroniques et optiques performants [6].

1.5 Techniques de dopage des semi-conducteurs

Le dopage des semi-conducteurs se réalise en substituant un atome du réseau cristallin par un autre atome, donneur ou accepteur, en fonction du type de dopage souhaité (N ou P). Cette substitution est effectuée lors de la fabrication du semi-conducteur, assurant ainsi une distribution homogène dans tout le volume du matériau. Cependant, pour obtenir un dopage limité à une zone spécifique, il est nécessaire d'utiliser des méthodes de dopage post-croissance. Ces méthodes permettent de créer des zones de dopage localisées en utilisant des fenêtres obtenues par masquage ou usinage ionique. Deux techniques de dopage post-croissance couramment utilisées sont l'implantation ionique et la diffusion thermique [7].

3.2.1. Dopage de type N

Les atomes pentavalents de la colonne V du tableau périodique des éléments sont incorporés dans le matériau pour faciliter la conduction électronique, généralement en petites quantités.

Illustré sur la fig. II.8 est une matrice de silicium dopée au phosphore, qui possède 5 électrons de valence, dont quatre entretiennent des liaisons avec des atomes de silicium adjacents. Lors de la réception d'une faible quantité d'énergie (0,04 eV), par exemple à une température Kelvin non nulle, le cinquième électron peut être libéré. Cet électron excédentaire, qui n'intervient pas dans la liaison, est ensuite enveloppé par le champ électrique positif de l'ion phosphore, se transformant en électron libre. Par conséquent, l'atome pentavalent est désigné comme « atome donneur » [7].

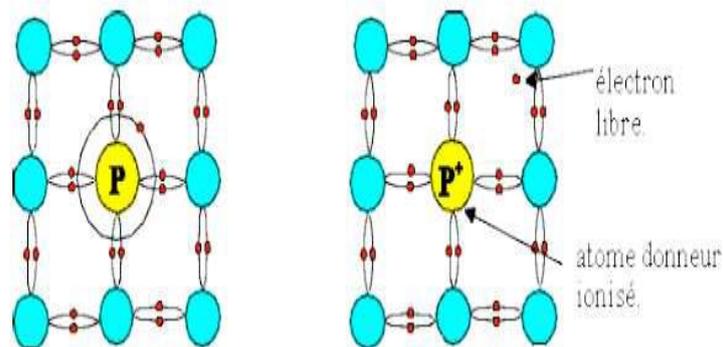


Figure I.4:Dopage de type N [8].

3.2.2. Dopage de type P

Les atomes de la colonne III du tableau périodique des éléments, réputés pour leurs propriétés d'accepteur d'électrons, sont délibérément incorporés dans la matrice de silicium. Les éléments les plus fréquemment sélectionnés pour le dopage avec des caractéristiques d'accepteur sont le bore (B) et le gallium (Ga). La matrice de silicium représentée sur la fig.

II.9 illustre l'introduction du bore en tant que dopant. Avec seulement trois électrons de valence, l'atome de bore manque de stabilité, ce qui nécessite une interaction avec ses quatre homologues en silicium pour obtenir une enveloppe externe complète de sept électrons, ce qui entraîne une charge négative (B^-). Cette configuration particulière permet à l'atome de bore d'attirer un électron provenant d'un atome adjacent, créant ainsi une position vacante qui peut migrer à l'intérieur du matériau. Grâce au processus de dopage de la matrice de silicium avec des atomes de type accepteur, la formation de trous mobiles appelés trous libres est encouragée, améliorant ainsi la capacité de conduction électrique du matériau [7].

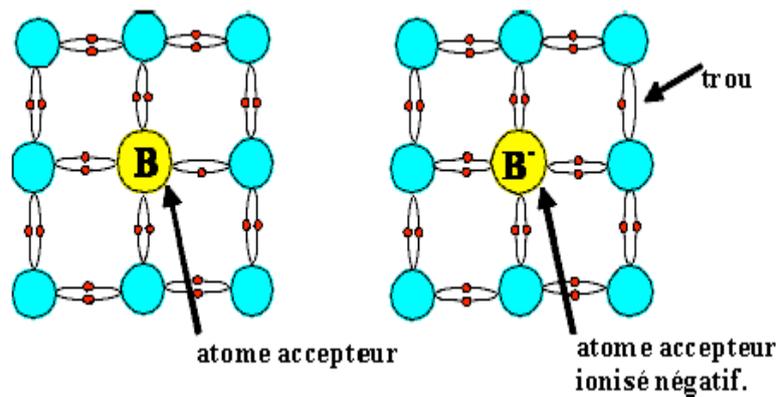


Figure I.5:Dopage de type P [8].

3.2.3. Jonction PN

Une jonction PN représente la mise en contact d'une surface de cristal de semi-conducteur dopé P avec une surface de cristal de semi-conducteur dopé N. Cette structure permet de réaliser des composants électroniques utilisés au quotidien : diodes, transistors, laser à semi-conducteur, cellules solaires, mémoires etc... [9].

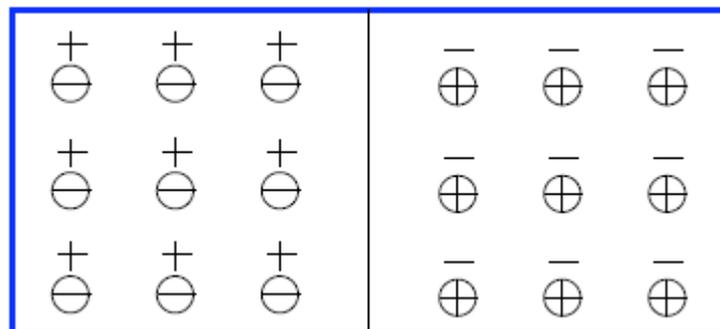


Figure I.6:Jonction P-N [9].

2 Diffusion et recombinaison des porteurs

La recombinaison est un processus de désexcitation. Il s'agit du retour de l'électron de l'état excité à l'état initial, dans la bande de valence. Un électron ne peut rester plus de 10s dans

l'état excité. Le Phénomène de recombinaison peut se faire selon les trois mécanismes suivants:

2.1 Recombinaisons en volume

Afin d'évaluer l'efficacité des matériaux destinés aux applications de cellules solaires, le paramètre connu sous le nom de longueur de diffusion (L_d) des porteurs de charge est couramment utilisé, souvent indiqué en micromètres. Cette métrique est préférée aux mesures sur la durée de vie en raison de sa capacité à caractériser plus précisément les mécanismes sous-jacents au transport de charge qui contribuent au photocourant. La valeur de L_d dépend principalement de la qualité du matériau utilisé, ainsi que de facteurs tels que la mobilité et le type de support [10].

$$L_d = \sqrt{D_{n,p}t} \quad (\text{I.1})$$

L_d : Longueur de diffusion ;

$D_{n,p}$: Coefficient de diffusion des électrons ou des trous ($cm^2.s^{-1}$) ;

t : Durée de vie des porteurs dans le matériau (s) ;

Avec

$$D_{n,p} = \frac{K_B T}{q} \mu_{n,p} \quad (\text{I.2})$$

K_B : Constante de Boltzmann ($K_B = 1,38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$) ;

T : température en Kelvin ;

q : charge électronique ($1,6.10^{-19}$) ;

$\mu_{n,p}$: Mobilité des porteurs (électrons ou trous) ($cm^2.V^{-1}.S^{-1}$).

3 Défauts cristallographiques

On appelle défauts les déviations par rapport à une structure idéalisée. Le défaut cristallin est défini aussi par la perturbation dans l'agencement périodique et régulier des atomes dans un silicium cristallin. Les défauts cristallographiques sont [11].

3.1 Les impuretés

Les éléments d'impuretés dans les matériaux de silicium cristallin comprennent principalement des impuretés non métalliques telles que le carbone, l'oxygène, le bore et le phosphore, et des impuretés métalliques telles que le fer, l'aluminium, le cuivre, le nickel et le titane.

Les impuretés métalliques existent généralement dans des états interstitiels, des états de substitution, des complexes ou des précipitations dans le silicium cristallin, qui introduisent souvent des électrons ou des trous supplémentaires, entraînant des modifications de la concentration de porteurs dans le silicium et une introduction directe dans les centres de niveau d'énergie profond. Devenez le centre de recombinaison des électrons et des trous, réduisez considérablement la durée de vie des porteurs minoritaires, augmentez le courant de fuite de la jonction p-n, réduire l'efficacité de l'émetteur des appareils bipolaires provoquer la dégradation de la couche d'oxyde des dispositifs MOS, etc., entraînant une réduction des performances des dispositifs au silicium.

3.2 Défaut accepteur

Le défaut accepteur est un type de défaut ponctuel dans un matériau semi-conducteur ou un cristal ionique qui crée des niveaux d'énergie supplémentaires dans la bande interdite, permettant ainsi de capter des électrons et de favoriser la conduction électrique. Contrairement aux défauts donneurs, les défauts accepteurs sont généralement associés à des atomes ou ions qui ont plus d'électrons de valence que le matériau hôte.

3.3 Défaut donneur

Le défaut donneur est un type de défaut ponctuel dans un matériau semi-conducteur ou un cristal ionique qui introduit des niveaux d'énergie supplémentaires dans la bande interdite, permettant ainsi la conduction électrique. Ces défauts sont généralement associés à des atomes ou ions qui remplacent un cation ou un anion dans le réseau cristallin.

Ils ont les mêmes caractéristiques que les accepteurs de défauts.

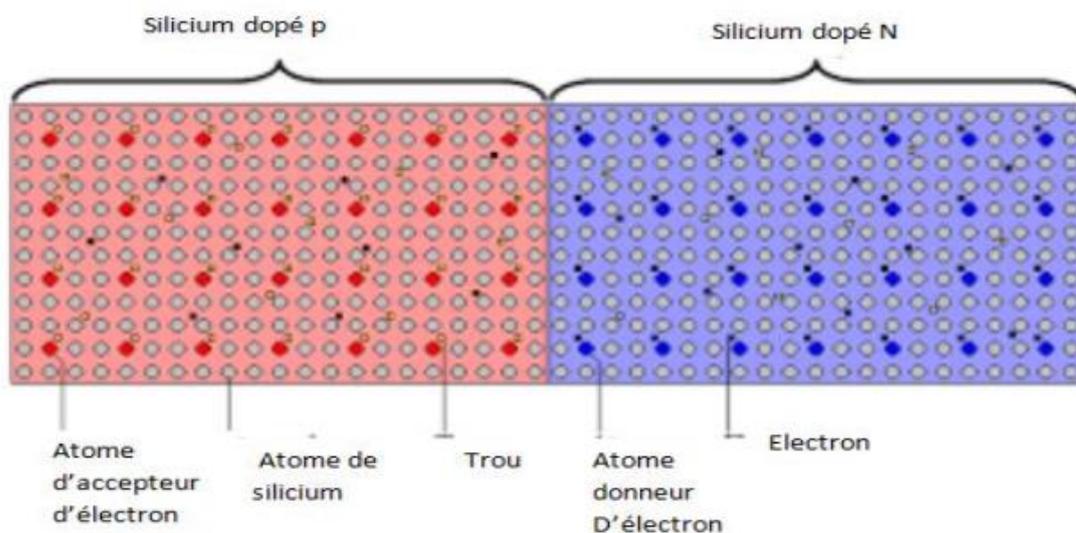


Figure I.7: Défauts de dopage (donneur et accepteur)

3.4 Défaut amphotère

Un défaut amphotère fait référence à un type de défaut ponctuel dans les matériaux solides, en particulier dans les cristaux ioniques. Il peut se comporter comme une vacance de cation ou d'anion, selon les conditions environnantes et la nature du défaut lui-même.

Dans les composés ioniques, des défauts peuvent survenir en raison de l'absence d'ions (vacances) ou de la présence d'ions supplémentaires (interstitiels). Les défauts amphotères peuvent stabiliser la structure en compensant les déséquilibres de charge, permettant au matériau de maintenir une neutralité électrique.

En résumé, les défauts amphotères sont des défauts polyvalents dans les solides ioniques qui peuvent agir comme des vacances cationiques ou anioniques, contribuant aux propriétés globales du matériau.

Par conséquent, la détection de la principale teneur en impuretés métalliques dans les matériaux de silicium cristallin est particulièrement importante dans le développement et l'utilisation des dispositifs [12].

4 Les recombinaisons volumiques se divisent en trois types

4.1 Recombinaisons Shockley-Read-Hall (SRH)

Si des défauts cristallographiques ou des impuretés sont présents dans un matériau, ils ont la capacité de générer des niveaux d'énergie situés profondément dans la bande interdite. Ces niveaux particuliers servent de centres de recombinaison et sont donc responsables de la diminution de la durée de vie des porteurs. La facilitation de ces recombinaisons est facilitée par les phonons. Les niveaux profonds se distinguent par leur densité (N_R), leur placement dans l'espace (E_R), leurs sections efficaces de capture pour les électrons σ_n (cm^{-3}/s) et les trous σ_p (cm^{-3}/s), ainsi que par les taux d'émission des électrons et des trous e_n et e_p (s^{-1}) [10].

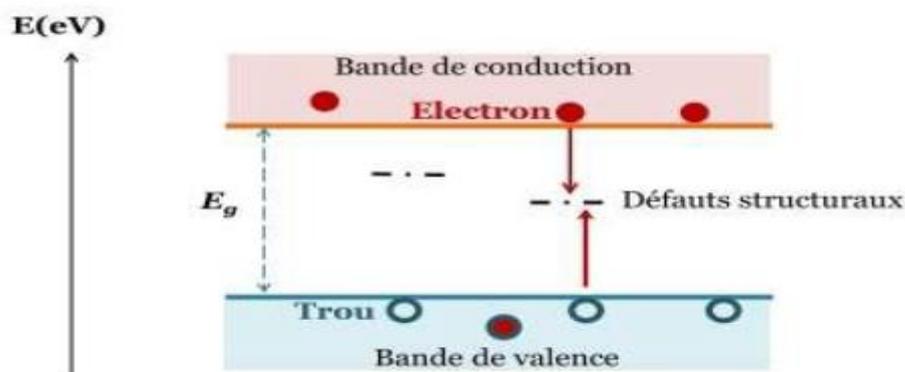


Figure I.8: Mécanisme de recombinaison volumique de type SRH [13].

4.2 Recombinaison radiatives

La recombinaison radiative par le biais de transitions inter-bandes, également appelées transitions bande à bande, implique le mouvement d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence accompagné de l'émission d'un photon, comme le montre la Figure I-9. L'énergie du photon libérée au cours de ce processus est égale à l'énergie de la bande interdite, également appelée bande d'énergie interdite du matériau [13].

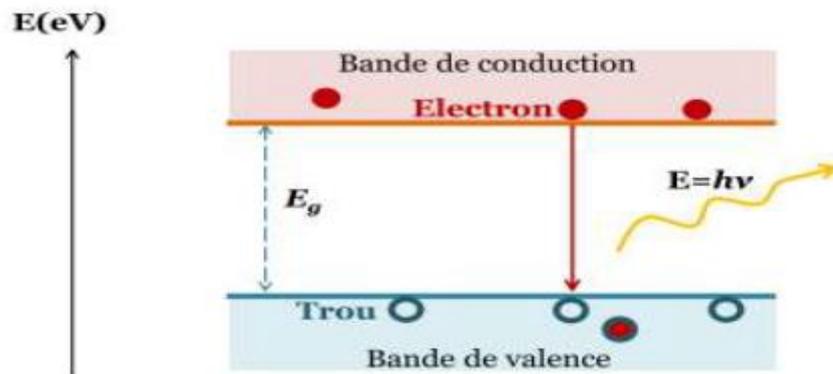


Figure I.9: Mécanisme de recombinaison volumique de type radiative [13].

4.3 Recombinaisons Auger

Le mécanisme de recombinaison Auger illustré à la figure I.10 est une forme de recombinaison bande à bande. Contrairement à la recombinaison radiative, l'énergie libérée au cours de ce processus est transférée à un support supplémentaire qui est excité à un état élevé dans la bande de conduction. Par la suite, le troisième support a la capacité de subir une thermalisation en libérant un ou plusieurs phonons. Il est important de souligner que cette occurrence particulière est également observée avec des lacunes dans la bande de valence [13].

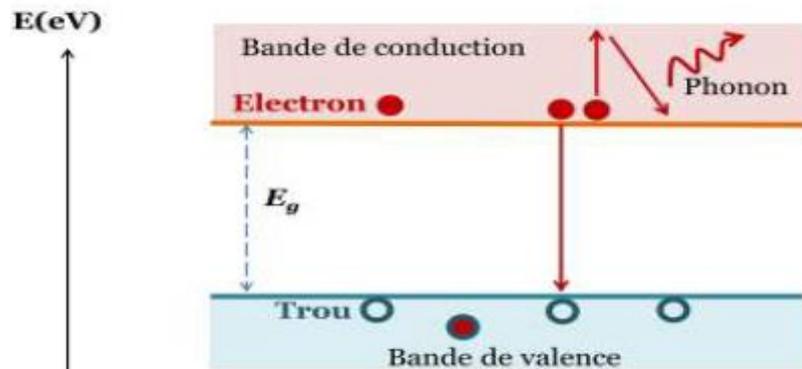


Figure I.10: Mécanisme de recombinaison volumique de type Auger [13].

4.4 Recombinaisons en surface

La technologie d'un composant comporte des étapes de découpages et de traitement chimiques des matériaux. En surface, il y'a rupture de la continuité du réseau et donc des liaisons non saturées, dites liaisons pendantes.

Ces liaisons créent, dans la bande interdite, des niveaux d'énergies qui peuvent participer aux recombinaisons. L'état de la surface d'un semi-conducteur peut voir des effets, critiques sur les paramètres d'une cellule photovoltaïque. Un paramètre qui peut rendre compte de la qualité de la surface est la de recombinaison de surface. Comme il est le cas de la durée de vie, pour caractériser le volume [10].

5 Structure du silicium amorphe hydrogéné

Le silicium amorphe présente une structure tétraédrique, mais avec des distorsions aléatoires, entraînant la disparition de l'ordre après quelques distances interatomiques. Par conséquent, certaines liaisons sont rompues, donnant naissance à des liaisons pendantes, dans lesquelles des atomes de silicium se trouvent avec des électrons non appariés. Ce phénomène a un impact significatif sur les propriétés électroniques du matériau car un seul électron peut créer un centre chargé négativement en se liant à celui-ci. La liaison pendante agit alors comme un piège à électrons. Inversement, dans différentes circonstances, l'électron unique peut s'éloigner de l'atome, ce qui entraîne un centre chargé positivement, la connexion pendante servant de piège à trous. La liaison rompue se caractérise par sa nature amphotère [14].

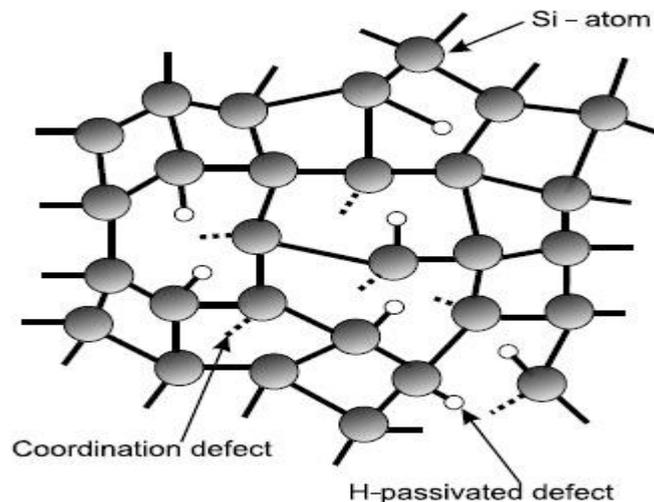


Figure I.11:Silicium amorphe hydrogéné[14].

5.1 Propriétés électriques du silicium amorphe

Du point de vue électrique, les caractéristiques du silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) sont inférieures à celles du silicium cristallin. Dans la forme intrinsèque du silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), la mobilité des électrons varie de 10 à $20(\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1})$, tandis que celle

des lacunes varie de 1 à $5(cm^2V^{-1}.s^{-1})$, tandis que celle des lacunes varie de 1 à 5. Les longueurs de diffusion sont limitées à un micron, et l'attribut métastable du matériau à la lumière, connu sous le nom d'effet Staebler-Wronski, entraîne des altérations structurales et photoélectriques entraînant une réduction de la conductivité électrique. Cet effet, qui est réversible, peut être corrigé par recuit à 150 °C. Dans le contexte des cellules photovoltaïques utilisant (a-Si:H:H), le rendement est classé comme initial ou stabilisé selon que la cellule est évaluée avant ou après la dégradation induite par l'effet Staebler-Wronski.

Les caractéristiques électriques de l'a-Si:H sont généralement définies par des paramètres tels que la mobilité, la durée de vie, la conductivité dans l'obscurité et la photoconductivité. La méthode de grillage de porteurs de charge photo généré en régime permanent (SSPG) est couramment utilisée pour déterminer la longueur de diffusion ambipolaire ($\mu*\tau$) dans le silicium amorphe. La conductivité à l'obscurité des dispositifs a-Si:H intrinsèques de haute qualité est nettement inférieure. De plus, la photoconductivité des dispositifs a-Si:H non dopés de qualité supérieure démontre des performances améliorées [15].

5.2 Propriétés optiques du silicium amorphe

Le coefficient d'absorption du silicium amorphe hydrogéné peut être corrélé à la distribution exponentielle des états locaux, par conséquent, on peut anticiper la variabilité du coefficient d'absorption en fonction de la couche analysée dans l'illustration. Une comparaison est faite entre le coefficient d'absorption d'une couche de silicium amorphe standard à 300 Kelvin (avec une bande interdite de 1,7 eV) et le coefficient d'absorption du silicium cristallin.

Les propriétés optiques de a-Si:H sont généralement définies par la valeur de la bande interdite optique, le coefficient d'absorption. La largeur du gap optique du silicium amorphe intrinsèque est $E_{GOPT} < 1,80$ eV. Le coefficient d'absorption à 600 nm est $\alpha_{600} > 3.5 \times 10^4 cm^{-1}$ et à 400 nm il est $\alpha_{400} > 5 \times 10^5 cm^{-1}$ [15].

6 Le Silicium nanocristallin

Le silicium nanostructure, également connu sous le nom de silicium nanocristallin, a été identifié et synthétisé pour la première fois par Arthur Uhlir en 1950 aux laboratoires Bell. Cette forme particulière de silicium, caractérisée par des dimensions inférieures à 100 nm, présente un large éventail de propriétés, notamment des propriétés électriques, optiques, chimiques, mécaniques, magnétiques et biologiques susceptibles d'être modifiées en fonction de la taille du nano cristal.

L'utilisation du silicium nanocristallin dans les cellules photovoltaïques est attribuée à ses caractéristiques électriques et optiques supérieures, améliorant ainsi l'efficacité globale [16].

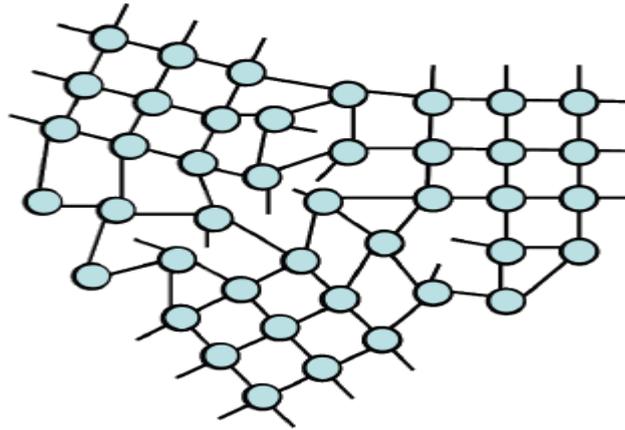


Figure I.12: structure du silicium nano cristallin [16].

6.1 Propriétés optiques silicium nanocristallin

Le coefficient d'absorption lumineuse $\alpha(E)$ est un paramètre optique important caractérisant les semi-conducteurs. En fait, lors du calcul de ce paramètre, nous pouvons déterminer d'autres propriétés physiques telles que les espaces, la densité d'états électroniques (DOS) avec $\mu\text{-Si:H}$, a-Si:H et le coefficient d'absorption optique $\alpha(E)$ mesuré par c-Si ces mesures ont été évaluées à partir de la spectroscopie PDS (Photo Thermal Deflection Spectroscopy) Dans la gamme des faibles absorptions (0.7-1.1 eV), le $\mu\text{-Si:H}$ a un coefficient d'absorption optique plus élevé que celui de a-Si:H . Cette propriété est liée à la structure hétérogène de ce matériau. Dans la gamme des fortes absorptions optiques (au-dessus de 1.4 eV), le a-Si:H possède un coefficient d'absorption optique plus approprié par rapport à celui de c-Si [17].

6.2 Propriétés électrique le silicium nanocristallin

La composition diversifiée de cette substance a un impact significatif sur ses caractéristiques électriques. Plus précisément, l'existence d'une partie cristalline importante dans des couches nano-Si:H ou même dans des couches $\mu\text{-Si:H}$ entraîne une passivation limitée par les atomes d'hydrogène. Par conséquent, les caractéristiques électriques et de transport de ces substances subiront des modifications. Diverses méthodologies ont été utilisées pour évaluer les propriétés de transport du $\mu\text{-Si:H}$, soit localement, parallèlement au substrat, soit le long de l'axe de croissance de la couche mince. Cette substance présente une énergie d'activation comprise entre 0,6 eV et 0,2 eV, même dans des couches non dopées à dessein, qui diminue à mesure que la partie cristalline de la substance augmente.

La conductivité électrique des couches de $\mu\text{-Si} : \text{H}$ est de l'ordre de quelque $10^{-7} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ et peut augmenter de plusieurs ordres de grandeur à partir de valeurs caractéristiques du silicium amorphe lorsque la fraction cristalline dépasse 40 %,

L'augmentation se produit en même temps que l'augmentation de la partie cristalline de la substance, suivie d'une baisse rapide lors de l'apparition de joints de grains. Ce phénomène est attribué à la restriction du transport dans le silicium microcristallin le long de la direction parallèle du substrat par des barrières inter grains plutôt qu'au décalage entre les minuscules entités cristallines [17].

7 Silicium cristallin

Le silicium est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène (O). Il constitue 26% de son poids. Dans le tableau périodique des éléments, il est situé dans la colonne IV ; entre le carbone (C) et le germanium (Ge) et la troisième ligne ; entre l'aluminium (Al) et le phosphore (P). C'est un semi-conducteur à gap indirect de 1.12 eV à la température ambiante (Figure I-13). Sa densité intrinsèque des porteurs est de $8.56 \times 10^9 \text{cm}^{-3}$ à la même température

7.1 Structure silicium cristallin

Le silicium cristallin est le matériau semi-conducteur préféré pour la production de modules photovoltaïques, dominant le marché avec une part de marché allant de 95 % au cours de la période 2021 alors que le marché a connu une expansion de plus de 50 fois. L'année 2015 a vu production d'environ 59 GW de modules photovoltaïques au silicium.

La technologie des modules à base de silicium cristallin implique un processus de fabrication sophistiqué par rapport aux cellules à couche mince utilisant du silicium amorphe hydrogéné ou des semi-conducteurs composites, mais elle offre des avantages significatifs.

Le silicium se distingue comme le seul semi-conducteur élémentaire, constitué d'un élément chimique unique, dont la bande interdite s'aligne bien avec le spectre solaire, en particulier pour les cellules à jonction unique. En outre, le silicium s'avère être une ressource abondante, largement distribuée dans la croûte terrestre, facilement accessible, et a connu des avancées considérables au fil du temps, grâce à l'industrie électronique. Ces efforts collectifs ont abouti à la disponibilité de matériaux purs et d'une qualité exceptionnelle, adaptés à une application directe dans le domaine du photovoltaïque, permettant ainsi d'atteindre des rendements de conversion de cellules remarquables.

La fabrication de modules en silicium cristallin comporte une série d'étapes, à commencer par l'acquisition de silicium métallurgique par carboréduction du quartz. Ensuite, le silicium est

soumis à une purification et à une cristallisation pour former des lingots, puis à un découpage de fines tranches de silicium. Les étapes suivantes concernent la fabrication de cellules et l'intégration de ces cellules dans un module [18].

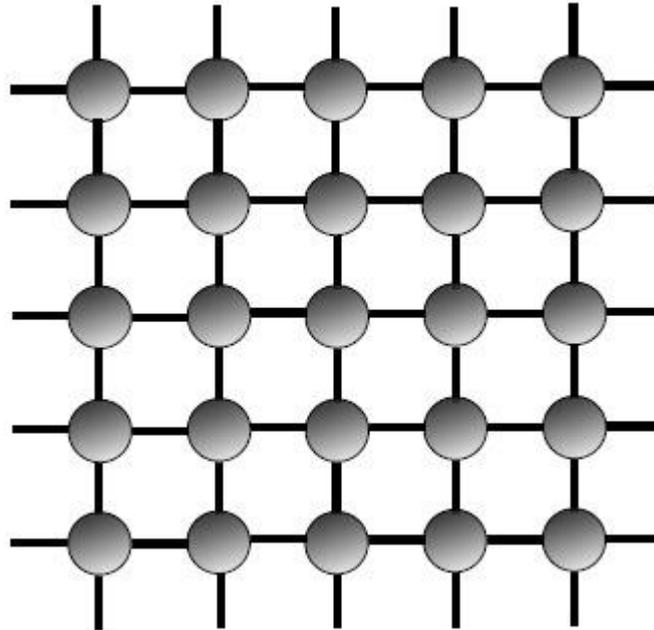


Figure I.13 :le silicium cristallin [18].

8 Paramètres d'entrées

8.1 Gap d'énergie

En physique des semi-conducteurs, on appelle gap la largeur de la bande interdite, laquelle est l'intervalle d'énergies situé entre l'état de plus basse énergie de la bande de conduction et l'état de plus haute énergie de la bande de valence.

8.2 Affinité électronique

L'affinité électronique d'un atome est l'énergie libérée lorsqu'un électron est ajouté à un atome neutre à l'état gazeux pour former un ion négatif, par mole d'atomes [19].

8.3 Permittivité diélectrique relative

La permittivité relative d'un matériau est l'expression du rapport entre sa permittivité absolue et la permittivité d'un milieu de référence, le vide. Cette propriété est aussi connue sous le terme de constante diélectrique exprimées par le symbole K , et caractérise le facteur par lequel le champ électrique, créé par le couplage entre deux électrodes métalliques (condensateur), est réduit. Plus le matériau est isolant et plus les pertes diélectriques, exprimée par l'angle de perte $\tan \delta$, qui pourraient résulter de cet état de soumission à un champ magnétique seront minimales [20].

8.4 Mobilité d'électrons

La mobilité électronique est la capacité d'un électron à traverser un métal ou un semi-conducteur en présence d'un champ électrique appliqué. Cependant, lorsqu'une tension ou un champ électrique est appliqué aux bornes du semi-conducteur, chaque électron libre commence à se déplacer plus rapidement dans une certaine direction [21].

8.5 Dopage en accepteurs et donneur

Le dopage est réalisé par l'introduction d'impuretés dans le cristal d'un semi-conducteur dans le but d'augmenter le nombre de porteurs libres. Cette insertion est réalisée par diffusion ou par transmutation.

Il existe deux types de dopage :

- **le dopage de type N** : qui consiste à insérer des atomes de type donneur d'électrons afin d'obtenir une plus forte densité d'électrons libres, qui sont **négativement** chargés ;
- **le dopage de type P** : qui consiste à insérer des atomes de type accepteur d'électrons afin d'obtenir une plus faible densité d'électrons libres, donc un excès de trous, considérés comme **positivement** chargés [22].

8.6 Densité effective de la bande de conduction et de valence

Cette grandeur, dépendante de l'énergie électronique E , correspond à la place disponible pour les électrons dans la bande de conduction $N_c(E)$ et à la place disponible pour les trous dans la bande de valence $N_v(E)$. Pour des énergies proches des extrémités de ces deux bandes, son tracé est parabolique [23].

9 Conclusion

Les couches minces représentent une technologie essentielle dans de nombreux domaines, de l'optique à l'électronique en passant par les revêtements de surface. Leur capacité à contrôler avec précision les propriétés des matériaux à l'échelle nanométrique ou micrométrique ouvre la voie à une multitude d'applications innovantes. Leur importance dans les dispositifs électroniques, les capteurs, les écrans, les revêtements optiques et bien d'autres domaines ne peut être surestimée. En investissant dans la recherche et le développement des couches minces, nous sommes en mesure de créer des produits plus performants, plus efficaces et plus durables, contribuant ainsi à façonner un avenir technologique prometteur.

Chapitre II :

Etude bibliographique sur les cellules photovoltaïques

1 .Introduction

Les cellules photovoltaïques, sont des dispositifs de nature électronique qui transforment la lumière du soleil en énergie électrique. Considérées comme une composante fondamentale des technologies liées aux énergies renouvelables, elles jouent un rôle important dans la transition vers une société plus durable et plus respectueuse de l'environnement. Au cours des décennies qui se sont écoulées depuis leur création, les cellules photovoltaïques ont connu un développement notable, impactant à la fois leur efficacité et leurs dépenses de fabrication. À l'heure actuelle, ces cellules trouvent des applications dans un large éventail de paramètres, allant des installations solaires résidentielles et commerciales aux vastes installations d'énergie solaire.

L'objectif de ce chapitre est d'approfondir les principes fondamentaux régissant les cellules photovoltaïques, leurs avantages et leurs contraintes, ainsi que les perspectives d'avenir de cette technologie prometteuse.

Les couches minces sont des matériaux dont l'une des dimensions est significativement plus petite que les deux autres. Cette caractéristique entraîne des modifications des propriétés physiques du matériau dans cette direction restreinte. Les couches minces présentent un intérêt majeur en nanotechnologie en raison des propriétés uniques qu'elles acquièrent. Leur fabrication est relativement simple et économique, ce qui en fait un domaine attractif. Une variété de matériaux peut être utilisée pour produire des couches minces, tels que les métaux, les alliages, les composés réfractaires et les polymères. Les applications des couches minces se développent rapidement, notamment au cours des dernières décennies.

Les cellules solaires à couche mince sont classées comme des cellules de 2^{ème} génération C'est un type de cellule solaire qui utilise de fines couches de matériaux semi-conducteurs. Ces cellules sont légères et flexibles, ce qui les rend utilisables dans une variété d'appareils et d'outils.

2 Historique des cellules photovoltaïques

Le physicien français pionnier Edmond Becquerel a été le premier à exposer le phénomène photovoltaïque en 1839, tandis qu'Einstein en a élucidé les mécanismes sous-jacents en 1912. Ce phénomène est néanmoins resté confiné à l'expérimentation scientifique en laboratoire jusque dans les années 1950. La découverte de Becquerel a révélé que certaines substances génèrent une quantité infime de courant électrique lorsqu'elles sont illuminées. Heinrich Hertz a étudié ce phénomène dans des solides tels que le sélénium dès les années 1870. Le sélénium, dont l'efficacité est d'environ 1 %, a été rapidement adopté par les photographes à des fins de mesure de la lumière.

Des progrès importants ont été réalisés dans les années 1950 par les équipes de recherche des laboratoires Bell, qui ont réussi à fabriquer la première cellule solaire en silicium cristallin avec un rendement de 4 % grâce à la méthode Czochralski. La progression de l'industrie des semi-conducteurs a joué un rôle central dans l'avancement de la technologie des cellules solaires. Les dimensions des cellules photovoltaïques ont reflété la tendance à la croissance de la taille des plaquettes dans le secteur des circuits intégrés, passant de 5,08 cm au début des années 1970 à 7,62 cm à la fin des années 1970, puis à 10,16 cm au début des années 1980. Par la suite, cette taille a été affinée à la suite de la révélation de la production de lingots parallélépipédiques multi cristallins, produisant des plaquettes carrées de 10 cm de chaque côté, aujourd'hui mises à l'échelle pour atteindre des dimensions allant de 12,5 à 15 cm de côté [24].

3 Définition Energies solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est très prometteuse. En fait, pendant chaque heure, le soleil fournit à la Terre une énergie qui est équivalente à toute la consommation énergétique humaine pendant un an. Il n'y a pas d'autre source d'énergie qui peut fournir sans cesse une puissance de 120 000 téra-watts comme le soleil. Cependant, l'énergie solaire photovoltaïque ne présente que 0,01 % de la demande totale de l'énergie. Actuellement, la capacité totale de toutes les cellules solaires qui ont été installées au monde entier est d'environ 5 gigawatts (GW), un chiffre très modeste par rapport à une puissance de 400 GW fournie par les réacteurs nucléaires et à plus de 1 000 GW qui vient du charbon. Ces chiffres montrent que l'énergie solaire peut devenir une source majeure dans l'avenir [25].

4 Spectre solaire

Le spectre solaire et la distribution spectrale en fonction de la longueur d'onde (λ) ou de la fréquence (ν). Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde qui varie entre de 0,22 à 10 μm .

La (figure II.1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 6,4% dans la bande des ultraviolets ($0.20\mu_m < \lambda < 0.38\mu_m$).
- 48% dans la bande visible ($0.38\mu_m < \lambda < 0.78\mu_m$).
- 45,6% dans la bande des infrarouges ($0.78\mu_m < \lambda < 0.10\mu_m$) [26].

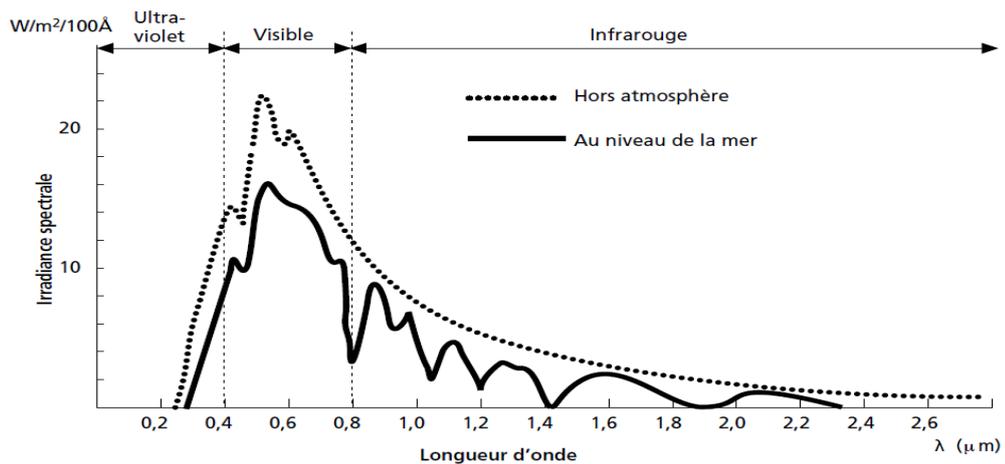


Figure II. 1:Analyse spectrale du rayonnement solaire [26].

5 Cellule photovoltaïque

5.1 Définition de la cellule Solaire photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur convertit la lumière en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. L'énergie électrique produite est directement liée à l'intensité de la lumière entrante et est influencée par l'efficacité de la cellule. Une fois que la cellule est connectée à une charge électrique, elle produit une tension continue, ce qui entraîne la circulation du courant électrique [27].

5.2 Structure d'une cellule solaire photovoltaïque

La structure la plus simple d'une cellule solaire, comme elle est illustrée dans la figure (II.2), comprend une jonction entre deux zones dopées différemment (p-n), la plus mince étant exposée au flux lumineux. Chacune des régions est connectée à une électrode métallique via un contact ohmique de faible résistance [28].

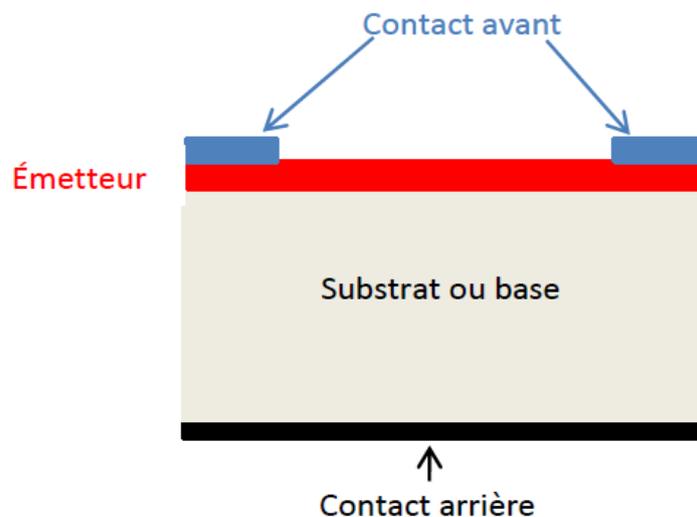


Figure II. 2:composition d'une cellule photovoltaïque [25].

5.3 L'émetteur

La présence de l'émetteur permet la formation d'une jonction p-n pour faciliter la séparation des paires électron-trou générées par l'absorption de lumière. Il est essentiel que l'émetteur soit mince pour réduire l'absorption de lumière au sein de cette couche. Néanmoins, cette couche présente une résistance superficielle élevée, ce qui nécessite une couche supérieure d'excellente conductivité (métal ou oxyde conducteur transparent) pour assurer une collecte efficace des supports [29].

5.4 Les contacts

Le placement de contacts métalliques sur les deux surfaces de la cellule est une pratique courante dans la configuration standard. Ces contacts facilitent la collecte du courant généré par la lumière. Les contacts métalliques optimaux présentent un comportement ohmique, garantissant une efficacité d'extraction de courant maximale.

il est crucial de minimiser les résistances de contact. Le processus de métallisation de la face avant consiste à équilibrer les effets d'ombrage et les résistances en série. Une diminution de l'ombrage entraîne une augmentation de la production de courant en permettant à un plus grand nombre de photons d'atteindre la cellule. Cependant, cela nécessite également de réduire la taille des doigts de métallisation, augmentant ainsi les résistances en série. Diverses techniques sont utilisées pour créer des contacts métalliques dans les cellules solaires :

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

La sérigraphie est l'option la plus adaptée aux normes industrielles et connaît une prévalence croissante. Grâce à une procédure unique, il permet de créer des couches métalliques sur les doigts et les chemins conducteurs à un prix abordable, tout en suivant une méthode qui se prête bien à l'automatisation [29].

6. Principe général du fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

La conversion photovoltaïque repose sur trois principes :

- L'absorption maximale de l'énergie lumineuse (photons),
- La conversion de cette énergie absorbée en charges électriques libres,
- La collecte efficace et sans perte de ces charges dans un circuit électrique externe.

Ainsi, une cellule solaire doit être constituée d'un matériau absorbant avec une bande interdite (gap) appropriée dans le spectre solaire (1-1,5 eV) pour transformer l'énergie lumineuse en

énergie électrique, créant ainsi des charges électriques. Ces charges doivent être séparées par un champ électrique permanent et indestructible, puis collectées à travers une structure de collecte à faible résistance. Ces deux conditions, comme nous le verrons plus tard dans ce chapitre, sont satisfaites par les jonctions à semi-conducteurs, dont la plus simple est l'homojonction P-N. Pour comprendre le fonctionnement de la cellule solaire, nous examinerons la physique du semi-conducteur ainsi que la structure de base de la jonction PN [2].

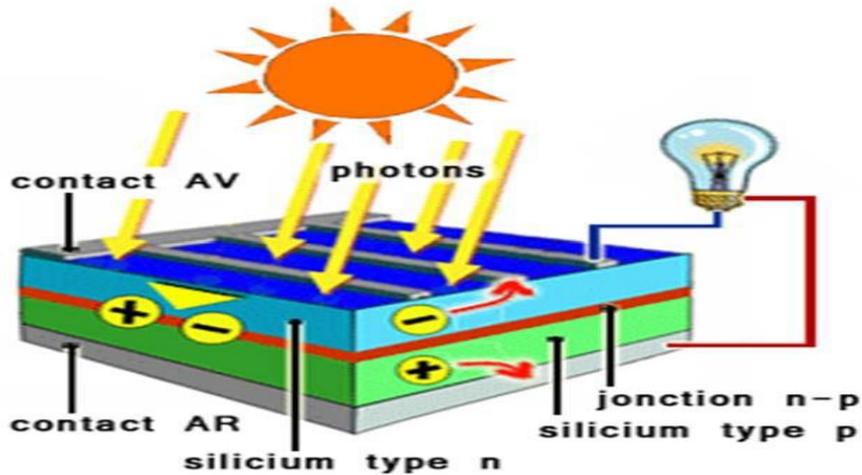


Figure II. 3: Principe de fonctionnement d'une cellule PV [2].

7. Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque à jonction p-n

7.1 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale

En l'absence d'éclairage, le comportement de la densité de courant concernant la tension (J (V)) présentée par les cellules solaires ressemble aux caractéristiques exponentielles observées dans une diode. Par conséquent, un courant important (I) est généré dans des conditions de polarisation directe, alors qu'il reste minimal dans des conditions de polarisation inverse. La densité de courant dans la cellule (diode) dans l'obscurité, notée J_D , peut être exprimée mathématiquement par l'équation suivante :

$$J_D = \frac{I_D}{A} = J_S \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.1})$$

Où A représente la surface de la diode, J_S désigne la densité de courant de saturation observée en polarisation inverse, e signifie la charge électrique élémentaire de l'électron, n représente le facteur d'idéalité (n étant égal à 1 pour une diode idéale), k symbolise la constante de Boltzmann et T représente la température. Lorsqu'elle est exposée à la lumière, la cellule déclenche la production d'un photo courant (I_{ph}) qui s'oppose à la fonctionnalité de la diode

(passage de n à p, ou de l'accepteur au donneur). Dans ces conditions, la caractéristique $J(V)$ de la cellule peut être élucidée telle quelle, (une cellule électrique est une jonction p-n) [30].

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] - J_{ph} \quad (\text{II.2})$$

La figure II.4 : représente le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

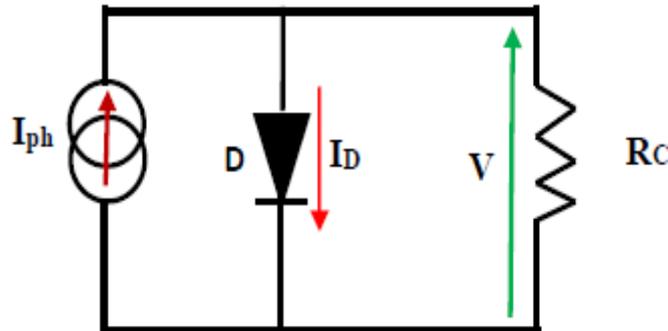


Figure II. 4:Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale sous éclairage [30].

7.2 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Dans les cellules solaires pratiques, il faut tenir compte des résistances de contact existant entre les électrodes et la couche active, ainsi que des pertes ohmiques dues à la résistivité des matériaux. Ces résistances peuvent être symbolisées par une résistance R_s positionnée en série avant la résistance de charge R_C du circuit externe.

De plus, le passage du courant à travers la cellule et les processus de recombinaison des charges photo générées au sein de la cellule peuvent être reproduits en incorporant une résistance parallèle R_{sh} (résistance shunt) connectée en parallèle à la diode idéale. La représentation schématique d'une cellule photovoltaïque réelle exposée à la lumière est illustrée à la Figure II-5 [30].

R_s : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours, cela représente également une perte de tension

R_{sh} : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule [31]

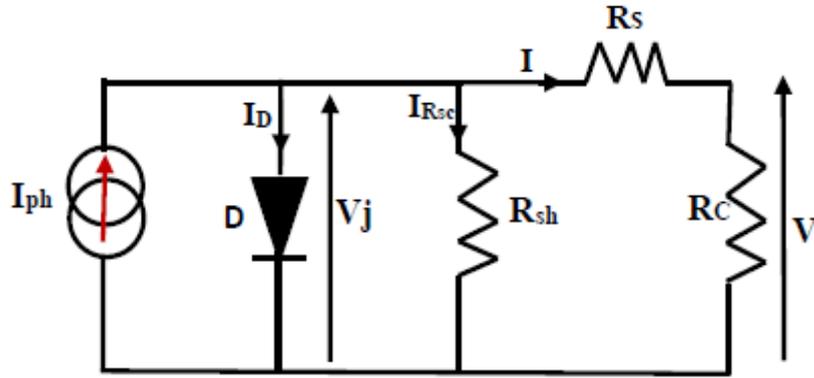


Figure II. 5:Schéma équivalent d'une cellule solaire real [30].

On note V la tension à travers la cellule, I le courant sortant de la cellule,

$$I' = I_D + I_{R_{sh}} \quad (II.3)$$

D'après la loi du dénominateur de courant, on constate que le courant total l'est égal au courant traversant la diode I_D plus le courant traversant la résistance R_{sh} connectée en parallèle avec diode

et V_j la tension à travers la jonction. Le courant I peut être écrit sous la forme suivante :

$$I = I_{ph} - I' \quad (II.4)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{eV_j}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V_j}{R_{sh}} \quad (II.5)$$

En remplaçant par :

$$V_j = V + R_s I \quad (II.6)$$

Nous obtenons :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{e(V + R_s I)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (II.7)$$

7.3 Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque à jonction p-i-n

Le circuit équivalent de la structure p-i-n est représenté sur (la figure II-6). Il diffère de celui de la jonction p-n (figure I-5). En plus du générateur de photocourant I_{ph} , de la diode et des résistances R_s et R_p , le circuit contient un générateur de courant supplémentaire. Ce dernier représente les courants de recombinaison dans la région intrinsèque de la structure [32].

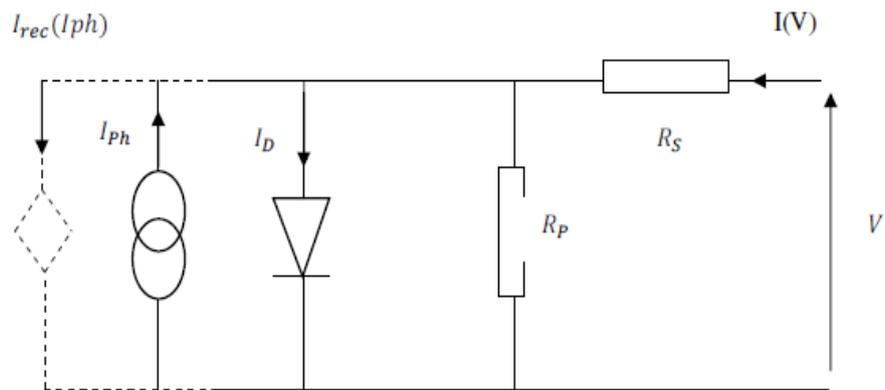


Figure II. 6:Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque p-i-n [32].

8 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire photovoltaïque

Le tracé de la caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire est représenté sur la Figure I.8, illustrant la variation du courant en fonction de la tension ($I-V$) pour une cellule solaire typique. En conditions d'obscurité, la courbe de la caractéristique est identique à celle d'une diode simple, tandis qu'en présence d'éclairement, la courbe est décalée vers le bas d'une valeur équivalente à la photo courant I_{ph} . I_{cc} et V_{co} représentent respectivement le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert [33].

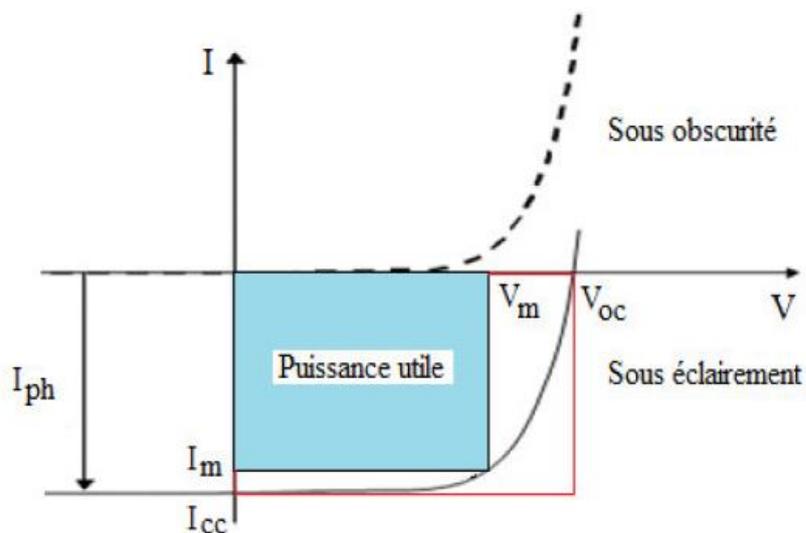


Figure II. 7:Caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclaircissement [33].

8.1 Tension en circuit ouvert (V_{co})

Lorsque la cellule n'est pas connectée en circuit fermé (où aucun courant ne circule), la tension enregistrée aux extrémités des électrodes est appelée tension en circuit ouvert V_{co} . Cette valeur signifie la tension nécessaire pour piloter une diode dans le sens de la polarisation directe afin de produire un courant équivalent au photo courant I_c . Cela peut être exprimé mathématiquement comme le montre l'équation suivante [34].

$$V_{co} = \frac{K_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{II.8})$$

Ou :

K_B : Constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{Kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

q: Charge l'électron [$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$]

I_{cc} : Courant de court-circuit

I_0 : Courant de saturation

T : Température

8.2 Courant de court-circuit (Icc)

L'élimination de la tension aux bornes de la cellule se fait par court-circuit ($V=0$), ce qui conduit à la production d'un photocourant I_{ph} induit par le rayonnement. Lorsqu'il est soumis à un profil spectral particulier, le photocourant susmentionné présente une augmentation linéaire par rapport à la luminosité de l'éclairage de la cellule, à la zone exposée à la lumière, à la longueur d'onde du rayonnement, aux caractéristiques de mobilité des porteurs de charge et à la température [34].

8.3 Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme facilite l'évaluation de l'efficacité de la cellule photovoltaïque. Il représente la relation entre la puissance de sortie maximale, P_m , générée par la cellule et le produit de V_{co} et I_{cc} . Idéalement, ce ratio devrait avoisiner la valeur 1 [35].

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} I_{cc}} = \frac{I_m V_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (\text{II.9})$$

Ou :

p_m : Puissance maximale

I_m : Courant maximale

V_m : Tension maximale

8.4 Rendement photovoltaïque

C'est le paramètre le plus important puisqu'il permet d'évaluer les performances de la cellule PV. C'est le rapport entre la puissance maximale par la cellule (p_{\max}) et la puissance incidente (p_{in}) du rayonnement lumineux éclairant la cellule. Il est défini par la relation suivante [35].

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} \quad (\text{II.10})$$

Ou:

$\eta(\%)$: Rendement

p_{\max} : Puissance maximale

p_{in} : Puissance incidente

9 Cellules solaires a couches minces

Les cellules solaires 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 semi-conducteurs poly cristallins tels que le CIGS et le CdTe. Aujourd'hui, diverses méthodes de dépôt (CVD) offrent une grande liberté dans la fabrication de semi-conducteurs. Étant donné que les cellules solaires à couche mince sont constituées de compositions semi-conducteurs 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 [36].

10 Méthodes d'élaboration des couches minces

Les méthodes d'élaboration peuvent être classées en deux catégories :

10.1 Dépôt physique en phase vapeur

Le dépôt physique en phase vapeur (PVD : Physical Vapor Deposition) est une technique qui repose sur l'évaporation sous vide des matériaux sources qu'on souhaite utiliser pour le revêtement. Il obtient de revêtements de bonne qualité, de larges gammes de matériaux pouvant être déposés et de larges gammes d'applications (par exemple: résistance à l'usure, résistance à la corrosion, électroniques et optiques) [37].

On peut citer : L'Ablation laser pulsé ; Pulvérisation cathodique, Evaporation Thermique, Pulvérisation Cathodique [38].

10.2 Dépôt chimique en phase vapeur

Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD : Chemical Vapor Deposition) est beaucoup utilisé pour l'élaboration d'une couche mince, dans laquelle le ou les constituants d'une phase gazeuse réagissent pour former un film solide déposé sur un substrat.

Cette méthode est largement utilisée pour le dépôt des couches minces isolantes, diélectriques ou semi-conductrices.

Afin d'augmenter la vitesse de dépôt et de réduire la température de traitement, plusieurs méthodes importantes existent comme le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma PECVD (Plasma Enhanced CVD), photo-CVD (Photon-enhanced CVD) [37].

- Autres techniques de dépôt sont adaptées aux objectifs de dépôt de couches minces tel que :

- ❖ Spray
- ❖ Sol –gel
- ❖ Électrodéposition
- ❖ Bain Chimique (CBD)
- ❖ Laser CVD(LACVD)

11 Etapes pour déposer une couche mince

❖ **La source:**

Elle constitue le matériau de base du film mince à élaborer. Il peut être un solide, un liquide, une vapeur ou un gaz.

❖ **Le transport:**

Il est réalisé par plusieurs méthodes comme le vide poussé ou les fluides. Dans l'étape de transport, l'uniformité du flux des espèces qui arrivent sur la surface du substrat est un élément important. Plusieurs facteurs peuvent affecter cette uniformité et dépendent du milieu dans lequel s'effectue le transport.

❖ **Le dépôt:**

Il est obtenu sur la surface du substrat. Cette phase passe par les étapes de nucléation et de coalescence.

❖ **L'analyse:**

La dernière étape dans le processus de fabrication est la nécessité de l'analyse du film obtenu qui consiste à effectuer des mesures directes de ses propriétés importantes [39].

12 Les avantages et les inconvénients de la technologie de couche mince

12.1 Les avantages de la technologie de couche mince

- Faible coût car l'énergie de traitement est moindre et le coût est relativement faible et besoins en matériaux et peut être produit en série deviennent possibles.
- La flexibilité dans les techniques de disposition qui permet de développer et D'utiliser des semi-conducteurs qui sont difficiles à produire.
- On utilise généralement des matériaux semi-conducteurs avec une bande interdite directe, le coefficient d'absorption est très élevé [40].

12.2 Les inconvénients de la technologie de couche mince

- Difficulté à obtenir différentes couches qui adhèrent les unes aux autres ;

- Difficulté à atteindre l'uniformité de l'épaisseur, de la composition et la qualité est assurée grâce à de grands substrats ;
- Problèmes de défaillance causés par des interfaces incompatibles entre des grilles de matériaux [40].

13 Les propriétés optiques et électriques

13.1 Cellules au silicium monocristallin

Il existe une technologie de fabrication de panneaux photovoltaïques en silicium monocristallin ($[N]3S^23P^2$) qui a permis d'atteindre des rendements de conversion record de plus de 25% en laboratoire [1].

Il existe aussi les cellules au silicium poly cristallin, cette méthode est moins coûteuse d'un point de vue énergétique mais aussi financier.

Les cellules poly-cristallines supportent mieux la présence d'impuretés que les cellules monocristallines. On utilise donc généralement du silicium de moindre pureté, moins onéreux mais aussi nécessitant moins d'étapes de fonte/purification et donc moins d'énergie.

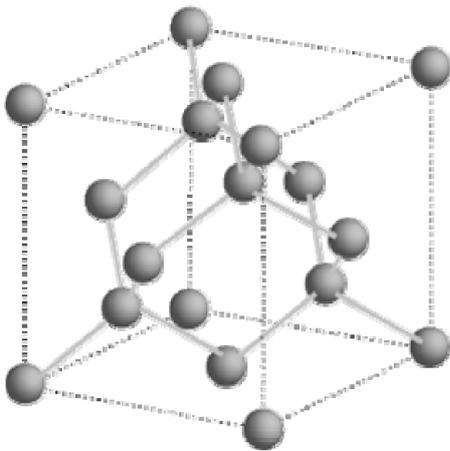


Figure II.1: Cristèle de silicium



Figure II. 8:Cellule au silicium monocristallin [1].

Le silicium poly cristallin est souvent produit en jetant du silicium fondu dans un creuset. En contrôlant la vitesse de refroidissement, la taille des cristaux peut former lors de la solidification.

Ces cellules sont généralement utilisées pour l'application de type toiture car elles sont moins onéreuses que les cellules monocristallines et possèdent un meilleur retour sur investissement [1].



Figure II. 9: Cellule au Silicium Poly cristallin [1].

13.2 Cellules au silicium amorphe

Les cellules amorphes présentent un rendement faible, mais requièrent seulement des épaisseurs minimales de silicium et sont peu coûteuses. Elles sont fréquemment utilisées dans de petits produits de consommation tels que les calculatrices solaires ou les montres [41].

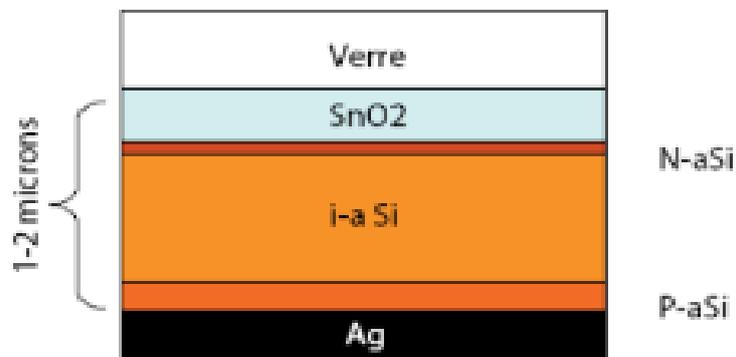


Figure II. 10: Cellule au Silicium amorphe [41].

13.3 Silicium amorphe hydrogéné

Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) est un matériau très attrayant pour les applications optoélectroniques. Ses propriétés physiques particulières permettent de l'utiliser dans une grande variété d'applications microélectroniques et photovoltaïques tout comme le silicium cristallin, le silicium amorphe est organisé en réseau tétraédrique et chaque atome est lié aux quatre atomes voisins par des liaisons covalentes. Cependant, à la différence du réseau cristallin qui maintient l'ordre atomique à grande distance, dans le réseau de silicium amorphe pur, seules la coordination tétraédrique ainsi que de nombreux défauts de structure (l'apparition des liaisons libres ou pendantes) [17].

14 Différentes types cellules photovoltaïques

14.1 Les cellules multi-jonctions

Il peut parfois être difficile d'identifier un matériau capable d'absorber l'ensemble du spectre solaire avec un taux d'absorption élevé. La solution à ce défi se trouve dans les cellules à jonctions multiples,

Ces cellules sont constituées d'une série de composants distincts, chacun étant spécifiquement conçu pour absorber efficacement une partie du spectre solaire. Grâce à la croissance épitaxiale, l'empilement de composants permet de capturer une partie importante du spectre solaire, ce qui donne une cellule unique composée de plusieurs cellules connectées en séquence. En ciblant la plage du spectre solaire où les photons sont collectés et en minimisant les pertes dues à la thermalisation, ces cellules ont atteint des niveaux sans précédent d'efficacité de conversion photovoltaïque. En fait, des rendements supérieurs à 40 % ont été atteints dans des conditions de lumière concentrée. La fabrication de ces cellules implique un processus coûteux et l'utilisation de matériaux spécifiques, ce qui limite leur application dans l'espace en raison de dépenses élevées [8].

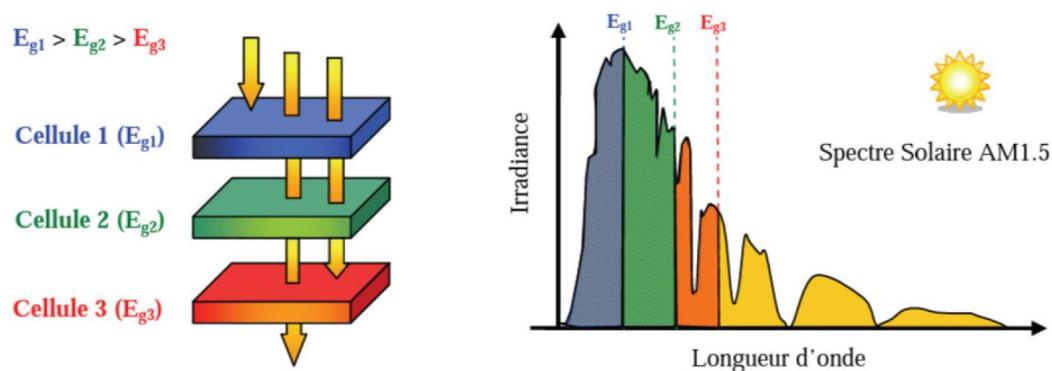


Figure II. 11: Les cellules multi-jonction [25].

15 Avantages et inconvénients du solaire photovoltaïque

15.1 Avantage

- Ressource gratuite et énorme potentiel réparti sur la terre ;
- Moyen décentralisé de production, autonomie ;
- Grande fiabilité et peu d'entretien (pas de pièces mobiles) ;
- Pas de pollution durant l'utilisation ;
- Grande souplesse de production, du milliwatt au Mégawatt [25].

15.2 Inconvénients

- Le coût élevé du matériau ;

- La forte consommation d'énergie au cours de la production ;
 - Investissement élevé, nécessité d'aides, dépendance aux décisions politiques ;
 - Disponibilité intermittente (réseau électrique ou stockage ou énergie d'appoint) ;
 - Source diffuse, grande surface de capteur, difficulté d'intégration bâti/paysagères ;
 - Technologie de fabrication poussée, énergivore, utilisation de produits chimiques
- Difficulté à recycler des composants qui doivent résister plus de 20 ans aux intempéries [25].

16 Conclusion

Les cellules solaires sont les plus petits composants des modules photovoltaïques et sont généralement fabriquées en silicium. Lorsque ces cellules sont exposées à la lumière du soleil, les électrons se séparent dans cet état, ce qui augmente le flux d'électricité. Dans cette unité, nous avons mené des études générales et analytiques sur les cellules photovoltaïques, abordant leurs composants, leur structure physique, leur principe de fonctionnement et leurs caractéristiques. Il existe plusieurs types de ces cellules avec des technologies de fabrication différentes que nous avons mentionnées.

Enfin, l'énergie solaire est la solution idéale pour l'avenir, car elle peut être utilisée dans les maisons et les grandes entreprises.

Chapitre 3 :
Résultats et discussions

1 Introduction

Dans le domaine de la recherche scientifique et du développement technologique, les logiciels informatiques de la recherche scientifique jouent un rôle crucial dans la compréhension et l'analyse des phénomènes physiques et techniques dans les matériaux nano technologiques et semi-conducteurs. Ces logiciels sont des outils essentiels pour les chercheurs dans des domaines des énergies renouvelables, l'électronique et les matériaux nano technologiques.

SCAPS 1D est un logiciel de modélisation et de simulation destiné à l'étude des dispositifs photovoltaïques à base de semi-conducteurs. Ce logiciel puissant et polyvalent permet aux chercheurs de prédire et d'analyser le comportement des cellules solaires en fonction de divers paramètres. SCAPS 1D offre une plateforme complète pour étudier les performances des : cellules solaires, optimiser leur conception et prédire leur efficacité dans différentes conditions.

2 Définition du logiciel SCAPS

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel spécialisé dans l'étude des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Ce logiciel est disponible gratuitement pour la communauté des recherches photovoltaïques (PV). SCAPS est originellement 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) [42].

SCAPS 1D se distingue par plusieurs aspects:

- Précision des modèles

SCAPS 1D fournit des modèles précis des structures électroniques et optiques des semi-conducteurs unidimensionnels, aidant ainsi les chercheurs à mieux comprendre les propriétés de ces matériaux et à développer de nouvelles applications.

- Facilité d'utilisation

SCAPS 1D se caractérise par une interface utilisateur simple et facile à utiliser, le rendant adapté à un large éventail d'utilisateurs, quel que soit leur niveau d'expérience.

- Analyse complète

Chapitre III Résultats et discussions

SCAPS 1D offre des outils complets pour l'analyse des propriétés électroniques et optiques des matériaux, aidant les chercheurs dans leurs processus de conception et de développement de manière efficace.

1. Support de la communauté scientifique et industrielle

SCAPS 1D bénéficie d'un fort soutien de la part de la communauté scientifique et industrielle, facilitant aux utilisateurs l'obtention d'aide et de support en cas de questions ou de problèmes. Dans l'ensemble, SCAPS 1D est un outil puissant et efficace pour l'étude et l'analyse des semi-conducteurs unidimensionnels, et constitue un bon choix pour les chercheurs et ingénieurs travaillant dans ce domaine.

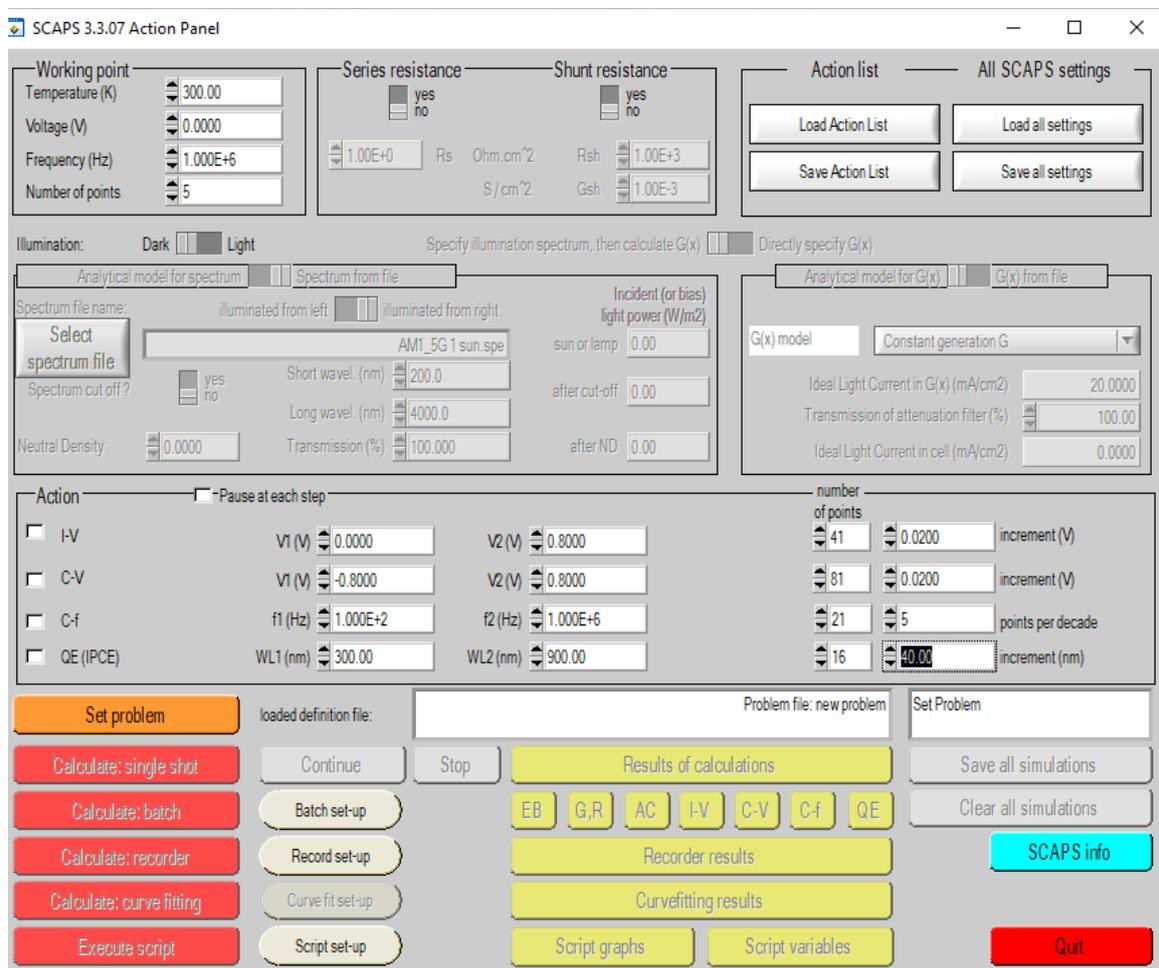


Figure III. 1:Logiciel SCAPS

3 Fonctionnement du SCAPS-1D

3.1 Sélectionnez le point de travail

À cette étape, nous définissons les informations qui n'ont pas changé dans la simulation de mesure et qui sont liées à cette mesure, telles que la température appropriée pour toutes les mesures, la tension n'étant pas liée à I-V et C-V, la fréquence f .

Nous définissons également les points utilisés pour tracer les courbes.

3.2 Choix de spectre solaire approprié

Nous appuyons sur l'icône (**Dark**) pour choisir le spectre solaire approprié à l'étude, Comme dans notre exemple, nous avons choisi ceci : AM1_5G 1 sun.spe puis le lancer

3.3 Définir le problème

Nous appuyons sur le bouton (**Set problème**) pour identifier le problème, puis une série de fenêtres apparaissent pour déterminer ce qui est requis.

3.4 Définir les couches et les matériaux

En appuyant sur le bouton (**load**) une série d'exemples de couches minces dans le programme apparaissent, puis nous pouvons déterminer la position de ces couches.

Dans notre travail, nous avons simulée les structures

- Cellules sans tampon

La cellule solaire étudiée est une jonction PIN à base de silicium

$$\text{nc-Si : H (P}^+) / \text{a-Si : H(i)} / \text{a-Si : H(n}^+).$$

- Cellule avec tampon

La cellule solaire étudiée est une jonction PP'IN à base de silicium

$$\text{nc-Si : H (P}^+) / \text{nc-Si : H (p}^') / \text{a-Si : H(i)} / \text{a-Si : H (n}^+).$$

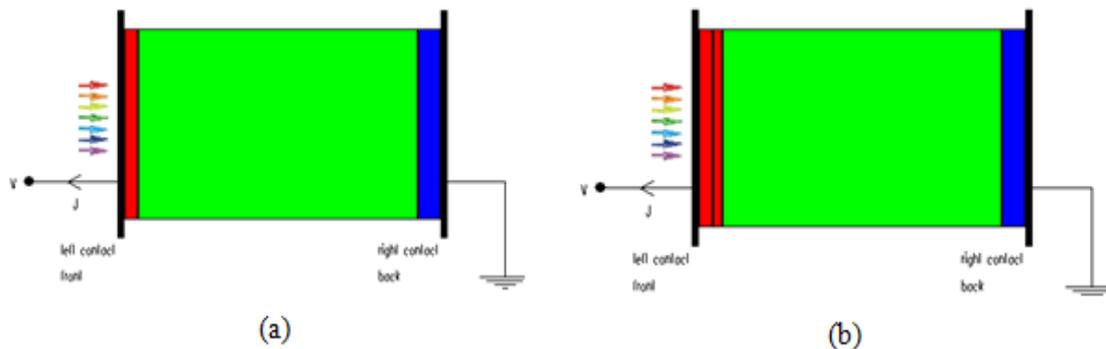


Figure III. 2: Schéma simplifié d'une cellule solaire (a) PIN en silicium sans la couche tampon p' (nc-Si:H), (b) PP'IN en silicium avec la couche tampon p'.

Chapitre III Résultats et discussions

Dans le paragraphe suivant nous avons fait la description des structures simulées. Nous avons envisagé deux dispositifs à base de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H). La test de ces deux dispositifs ont déjà été effectuées expérimentalement [43]. Les paramètres caractéristiques de sortie pour les des deux cellules solaires sont montré dans le tableau suivant :

Tableau III 1: Paramètres de sortie expérimentales pour les des deux cellules solaires[43].

Structure	V_{oc} (V)	I_{cc} (mA / cm ²)	FF	η (%)
Sans tampon	0.864	10.68	68.70	6.34
Avec tampon	0.896	11.710	70.90	7.44

Ces structures ont été fabriquées en utilisant la technique RF-PECVD les deux cellules ont été déposées sur un substrat en acier inoxydable (SS) servant de contact arrière. Des électrodes à base d'oxyde d'indium et d'étain (ITO) ont été déposées du côté p+ pour le contact avant, en utilisant une pulvérisation cathodique RF à une température de 100 °C.

Le premier dispositif comprend une couche épaisse intrinsèque de 300 nm de a-Si:H, située entre une couche a-Si:H (25 nm d'épaisseur) et une couche de fenêtre p+ composée de silicium nanocristallin nc-Si:H (15 nm d'épaisseur) (Figure III.2). En revanche, le second dispositif introduit une couche tampon p' nc-Si:H de 10 nm d'épaisseur entre la couche p+ et la couche intrinsèque [32].

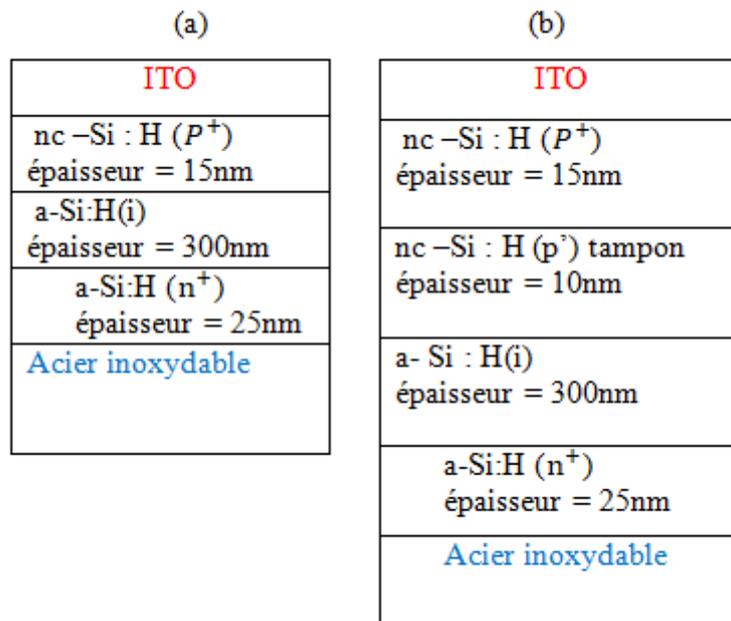


Figure III. 3: Schéma représentatif des deux cellules simulées, (a) sans couche tampon. (b) avec couche tampon [32].

Chapitre III Résultats et discussions

3.5 Choix de direction de la lumière et de courant

Nous devons déterminer la source de lumière en choisissant la couche qui est en face de l'éclairage, ainsi que la direction du courant et la mise à la terre comme dans nous avons illustré la figure (III.2). Dans cette simulation nous avons choisi la couche de type p qui est en face de l'éclairage. De cette couche les trous photo-générés auront à parcourir une faible distance pour être collectés au niveau du contact avant.

3.6 Entrer les paramètres des couches choisies

À cette étape, nous pouvons entrer les informations et les paramètres appropriés pour chaque couche, tels que l'épaisseur, la bande gap et la affinité électronique etc.

Ces paramètres sont résumés dans le tableau (III.1).

Tableau III 2: Paramètres d'entrées

Paramètres	nc -Si : H (P^+)	Couche tampon nc-Si : H (p')	a-Si:H : H(i)	a-Si:H (n^+)
ϵ_r	11.9	11.9	11.9	11.9
$L(nm)$	15	10	300	25
$\chi(eV)$	3.7	3.75	3.8	3.8
$E_g(eV)$	2	1.8v8	1.72	1.72
$N_c(cm^{-3})$	2.80×10^{19}	2.80×10^{19}	2.5×10^{20}	2.5×10^{20}
$N_v(cm^{-3})$	1.04×10^{19}	1.04×10^{19}	2.5×10^{20}	2.5×10^{20}
$Vth_{e-}(cm/s)$	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7
$Vth_{h+}(cm/s)$	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7
$\mu_{e-}(cm^2V^{-1}s^{-1})$	2	2	20	10
$\mu_{h+}(cm^2V^{-1}s^{-1})$	0.2	0.2	2	1
$N_A(cm^{-3})$	3×10^{19}	1×10^{16}	0	0
$N_D(cm^{-3})$	0	0	0	1×10^{19}

Où

ϵ_r : Permittivité diélectrique relative.

L : épaisseur de couche

χ : affinité électronique.

E_g : gap d'énergie

Chapitre III Résultats et discussions

N_c : Densité effective de la bande de conduction.

N_v : Densité effective de la bande de valence

Vth_{e^-} : Vitesse thermique des électrons

Vth_{h^+} : Vitesse thermique des trous

μ_{e^-} : Mobilité d'électrons.

μ_{h^+} : Mobilité des trous.

N_A : Densité des accepteurs.

3.7 Sélectionnez les courbes souhaitées

L'interface de SCAPS dispose de quatre options activables, qui sont des courbes courant-tension I-V et C-V et C-F et le rendement quantique Q-E, où il est possible de choisir une ou plusieurs courbes simultanément. Dans cette option, nous pouvons également ajuster les valeurs de début et de fin si nécessaire

4 Paramètre entrée

4.1 Coefficient d'absorption de matériaux a-Si:H et nc-Si : H

Dans ce paragraphe nous essayons d'étudier les coefficients d'absorption des couches de matériaux a-Si:H et nc-Si:H en appuyant sur le travail de A- Rachid [44] et en utilisant le modèle incorporé dans SCAPS (modèle d'absorption SCAPS).

Le matériau a-Si:H

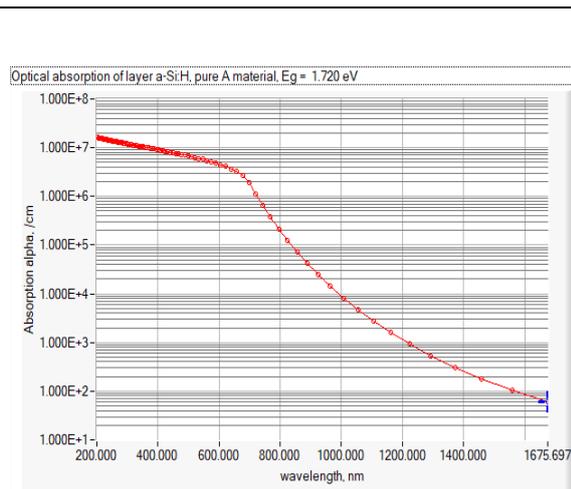


Figure III.4: coefficient d'absorption de a-Si:H du module SCAPS

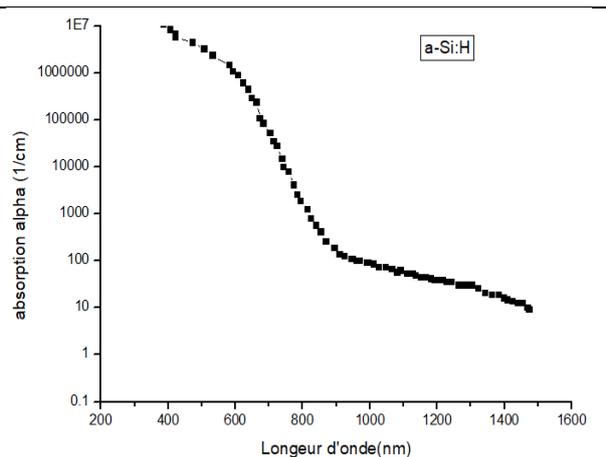


Figure III.5: Coefficient d'absorption de a-Si:H de fichier extraite de travail A- Rachid [44]

Le martiaux nc-Si: H

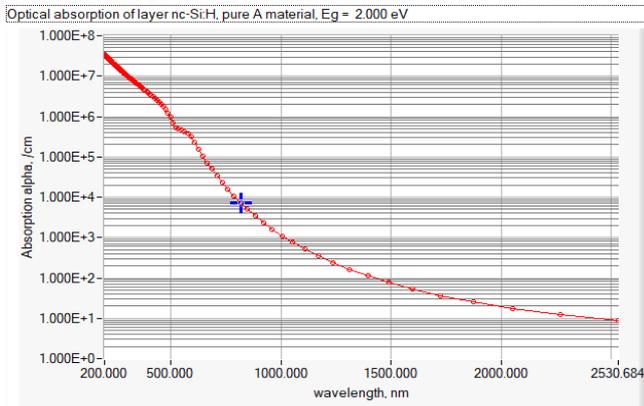


Figure III.6: Coefficient d'absorption de nc-Si:H du modèle d'absorption SCAPS

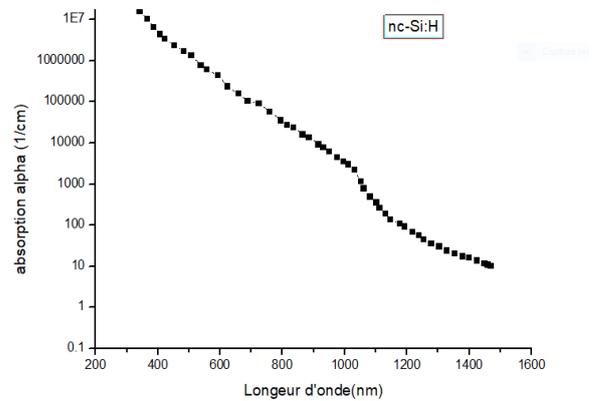


Figure III.7: Coefficient d'absorption de a-Si:H de fichier extraie de travail A- Rachid [44].

À partir de la référence [44], nous extrairons les valeurs de coefficients d'absorption et les longueurs d'onde correspondantes et les mis sous forme des fichiers lisible par SCAPS (Fichiers d'absorption SCAPS). Nous traçons ensuite les variations du coefficient d'absorption pour les matériaux nc-Si :H et a-Si:H en fonction de la longueur d'onde dans la figure (Figure III.5) (Figure III.7). Nous pouvons utiliser ces résultats pour simuler la cellule étudiée.

D'autre part nous allons utiliser le modèle incorporé dans SCAPS (Modèle d'absorption SCAPS) pour calculer ces coefficients puis nous illustrons ces variations (coefficients d'absorption de a-Si:H et nc-Si:H) dans les figures (Figure III.4) (Figure III.6). Le coefficient d'absorption est égal 10^7 cm^{-1} pour les deux matériaux à une valeur de 400 nm, il diminue dans la plage (400-600) nm, où le coefficient d'absorption du matériau a-Si :H est plus grand que celui du matériau nc-Si :H. Cette diminution se poursuit dans la plage de (600-1300) nm, où le coefficient d'absorption du matériau nc-Si :H est plus grand que celui du matériau a-Si:H,

Types de défauts utilisés

SCAPS peut-être introduire les paramètres qui régissent les défauts en cliquant sur le bouton (Add/Edit) approprié. Nous avons pris en compte les caractéristiques des défauts suivantes:

- Pour le défaut accepteur :

$$\text{Densité total } N_t = 1 \times 10^{16} (1/\text{cm}^2)$$

- Pour le défaut donneur :

Chapitre III Résultats et discussions

Densité total $N_t = 1 \times 10^{16} (1/cm^2)$

- Pour le défaut amphotère :

Densité total $N_t = 8 \times 10^{16} (1/cm^2)$

5 Résultat de simulation

Après l'identification de la structure à étudiée et l'introduction des propriétés optiques et électroniques nécessaires pour chaque couche mince de la structure et après l'insertion de tous les données nécessaires de simulation nous lançons le calcul en appuyant sur l'icône (**Calculate single shot**) pour donner l'ordre à SCAPS de commencer le calcul et de créer les courbes requises.

5.1. Caractéristiques de sortie correspondants au modèle d'absorption SCAPS et au fichier d'absorption SCAPS

Nous intéressons dans cette partie par les caractéristiques de sortie pour les deux structures étudiées (sans tampon et avec tampon)

- Nous effectuons des calculs en utilisant un fichier d'absorption SCAPS pour lire le coefficient d'absorption.
- On répète les calculs en utilisant le modèle SCAPS pour calculer le coefficient d'absorption.- Nous comparons les résultats obtenus de ce calcul, et nous comparons également ces résultats avec les résultats de simulation obtenus par BELFAR.

Les paramètres caractéristiques de sortie pour les des deux cellules solaires sont montré dans le tableau suivant :

Tableau III.3: Comparaison des propriétés externes des deux cellules par simulation dans les deux cas ; le modèle d'absorption SCAPS et fichiers d'absorption SCAPS

Type cellules	Donnée	Voc	Icc	FF	H
Sans tampon	Fichier d'absorption	0.7764	13.7330	63.61	6.78
	Modèle SCAPS	0.7953	20.4213	62.60	10.17
	A. BELFAR	0.861	10.70	68.6	6.32
Avec tampon	Fichier d'absorption	0.7826	15.4563	63.57	7.69
	Modèle SCAPS	0.8014	22.9109	62.53	11.48
	A. BELFAR	0.890	11.684	71.20	7.40

Pour de structure sans tampon, on remarque que les valeurs Voc et FF dans le cas de fichier d'absorption de SCAPS sont plutôt proches de Voc et FF dans le cas de modèle d'absorption de SCAPS, mais les valeurs extraites de travail de A. BELFAR sont plus grand que les résultats obtenus par la simulation. Même remarque pour le cas de structure avec tampon.

Chapitre III Résultats et discussions

Pour les valeurs I_{cc} résultantes du calcul correspondant au Modèle d'absorption de SCAPS est différentes de celles obtenues dans le cas fichier d'absorption de SCAPS et de travail de A. BELFAR, mais on peut observer que les valeurs obtenue du calcul correspondant au fichier d'absorption de SCAPS est proche de travail de A. BELFAR.

Et pour le rendement η , on observe que ces valeurs dans le calcul correspondant au Modèle d'absorption de SCAPS est aussi différents de celles obtenues dans le cas fichier d'absorption de SCAPS et de travail de A. BELFAR, mais les valeurs de rendement η correspondantes au fichier d'absorption de SCAPS sont presque égales à celle trouvé de travail de A. BELFAR.

5.2. Diagrammes des bandes d'énergies de la structure

Dans cette section, nous présenterons les résultats de notre simulation.

Diagrammes des bandes d'énergies de la structure

Sans tampon

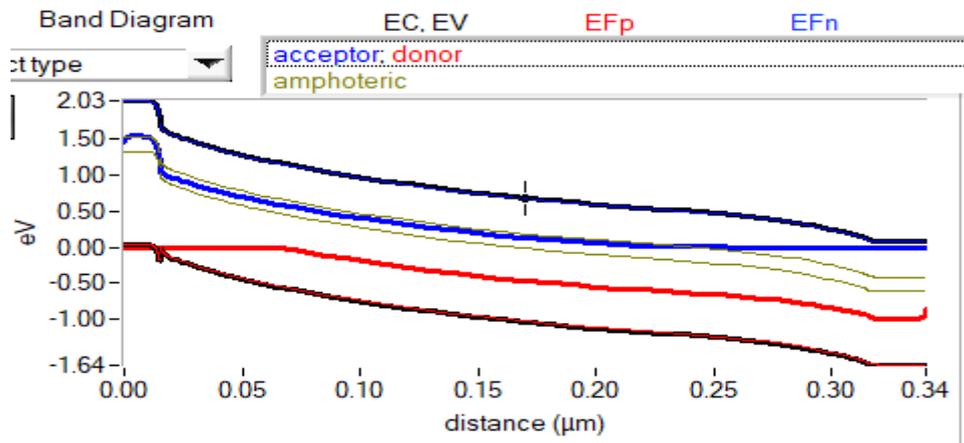


Figure III. 4: Le diagramme des bandes d'énergies de la cellule (sans tampon)

Avec tampon

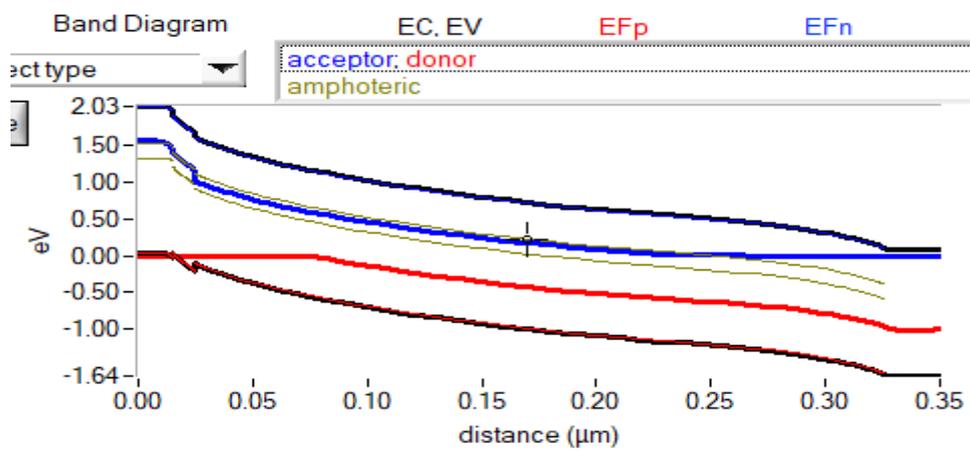


Figure III. 5: Le diagramme des bandes d'énergies de la cellule (avec tampon)

Chapitre III Résultats et discussions

D'après la figures, nous constatons que : une ligne bleue qui correspond à la bande de conduction, E_C représente la valeur de l'énergie dans la bande de conduction et On remarque sur la figure qu'il y a une ligne rouge qui correspond à la bande de valence, E_V la valeur de l'énergie dans la bande de valence. Le niveau de Fermi à l'équilibre thermo dynamique est divisé en deux parties, niveau de Fermi pour les trous (E_{Fp}) et le niveau de Fermi pour les électrons (E_{Fn}).

Les courbes montrent également les types de défauts utilisés dans la simulation : une ligne en bleu correspondant au niveau d'énergie apparu en raison de défauts de type accepteur. Une ligne en rouge correspondant au niveau d'énergie qui apparaît en raison de défauts de type donneur. On remarque aussi qu'il y a deux lignes vert olive qui correspondent au niveau d'énergie qui apparaît en raison de défauts de type amphotère

La courbe d'énergie à la bande conduction pour la cellule sans couche tampon diminue de 2.03 jusqu'à atteindre 0.5 puis reste constante.

En revanche, la courbe d'énergie à la bande valence diminue de 0 jusqu'à -1.64, et après cette valeur, elle reste également constante.

Pour la cellule avec la couche tampon, les variations sont presque identiques, avec un léger décalage dans la courbe d'énergie à la bande valence dû à la présence de la couche tampon.

Nous pouvons conclure que la présence de la couche tampon permet de réduire l'énergie à la bande valence et facilite le passage des trous.

Variation des densités de courant

Sans tampon

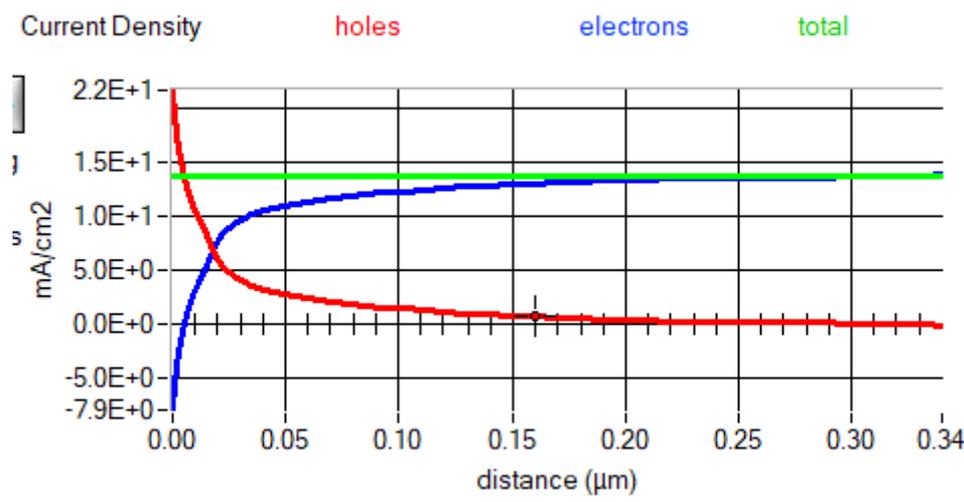


Figure III. 6: Variation des densités de courant (sans tampon)

Avec tampon

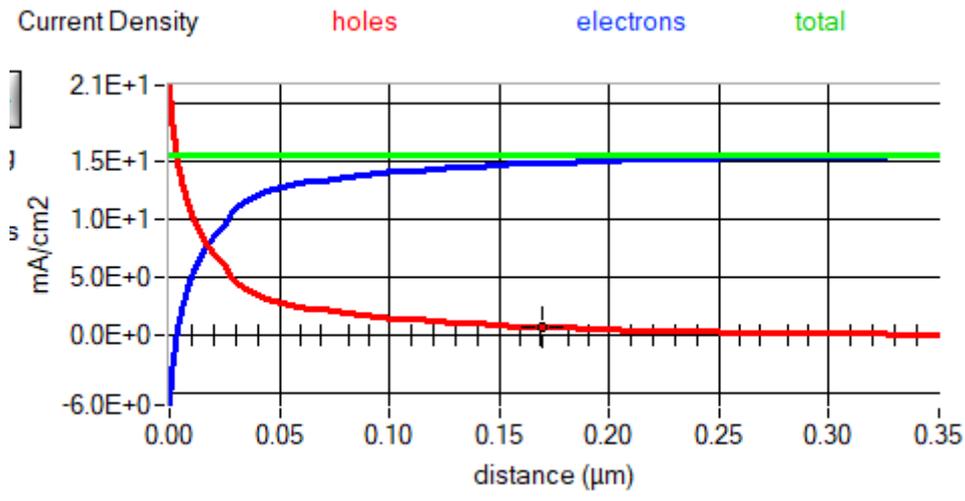


Figure III. 7: Variation des densités de courant (avec tampon)

Sans tampon

Dans l'énoncé concernant la densité de courant en fonction de la distance, nous remarquons que :

Dans l'intervalle [0-0.02µm], la valeur de la densité de courant des électrons augmente rapidement en valeur absolue jusqu'à atteindre 7 mA/cm², tandis que la densité de courant des trous diminue rapidement jusqu'à atteindre 7 mA/cm². À la valeur 7 mA/cm², les deux densités s'égalisent.

Par la suite, dans le champ [0.02-0.20µm], la densité de courant des électrons augmente légèrement jusqu'à atteindre 14 mA/cm², tandis que la densité de courant des trous diminue jusqu'à presque 0. À ce stade, la densité de courant des électrons est supérieure à celle des trous. Pendant cette période, les électrons se déplacent vers la région N et les trous se déplacent vers la région P.

Dans le intervalle [0.20-0.30µm], la densité de courant des électrons est constante et égale à 14 mA/cm², tandis que la densité de courant des trous est constante et égale à 0.

En ce qui concerne la densité de courant totale, elle reste constante dans toute la cellule sans la couche isolante et est égale à 14 mA/cm².

Avec tampon

Dans le graphique représentant les variations de la densité de courant en fonction de la distance pour la cellule avec une couche isolante, nous remarquons que :

Dans le premier intervalle [0-0,02 µm], la valeur de la densité de courant des électrons augmente rapidement jusqu'à atteindre 8, tandis que la densité de courant des trous diminue jusqu'à atteindre également 8. À ce moment-là, la densité de courant des trous devient

Chapitre III Résultats et discussions

supérieure à celle des électrons, car les électrons se déplacent vers la région P et les trous vers la région N. Ensuite, les deux densités s'égalent à la valeur 8 mA/cm^2 .

Dans le deuxième intervalle $[0.02-0.20\mu\text{m}]$, la densité de courant des électrons augmente lentement jusqu'à atteindre 15 mA/cm^2 , tandis que la densité de courant des trous diminue lentement jusqu'à atteindre 0. Dans ce champ, la densité de courant des électrons est supérieure à celle des trous, ce qui signifie que les électrons se déplacent vers la région N et les trous vers la région P.

Dans le troisième intervalle $[0.20-0.35 \mu\text{m}]$, la densité de courant des électrons est constante et égale à 15 mA/cm^2 , tandis que la densité de courant des trous est constante et égale à 0.

En ce qui concerne la densité de courant totale, elle reste constante dans toute la cellule avec la couche isolante et est égale à 15 mA/cm^2 .

Nous remarquons que la différence entre les deux cellules réside dans la valeur du courant total : dans la cellule sans couche tampon, sa valeur est de 14 mA/cm^2 , alors que dans la cellule avec la couche tampon, elle augmente et atteint 15 mA/cm^2 . Cette augmentation est due à l'ajout de la couche isolante, qui améliore la cellule et augmente la production de courant.

La densité de courant en fonction tension

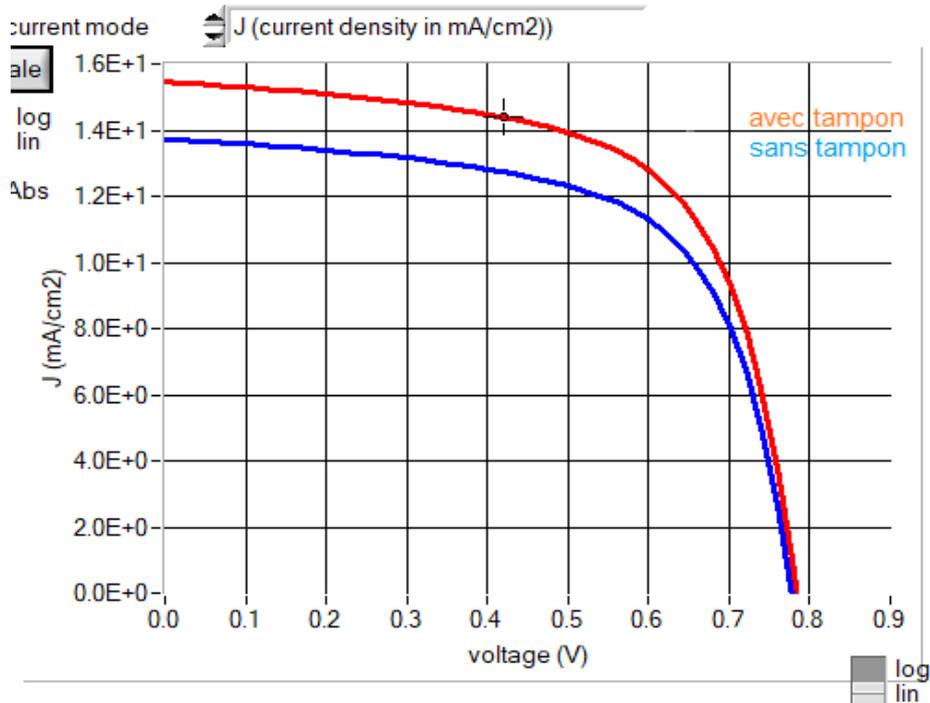


Figure III. 8: la variation de courant (J) en fonction tension (v) des cellules solaires sans tampon et avec tampon.

Chapitre III Résultats et discussions

Nous remarquons sur la courbe que le courant de court-circuit dans la cellule sans couche tampon atteint une valeur maximale de 13,7330 puis reste constant jusqu'à atteindre une tension de 0,7764, après quoi il commence à diminuer jusqu'à s'annuler.

En revanche, le courant de court-circuit dans la cellule avec la couche tampon atteint une valeur maximale de 15,4563 puis reste constante jusqu'à atteindre une valeur de 0,7826 avant de commencer à diminuer jusqu'à s'annuler.

Nous en déduisons que la valeur du courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert pour la cellule avec la couche tampon sont supérieures à celles de la cellule sans couche tampon.

Ainsi, nous constatons que la couche tampon ajoutée améliore le passage du courant dans le court-circuit et augmente la tension à circuit ouvert.

Rendement quantique (QE)

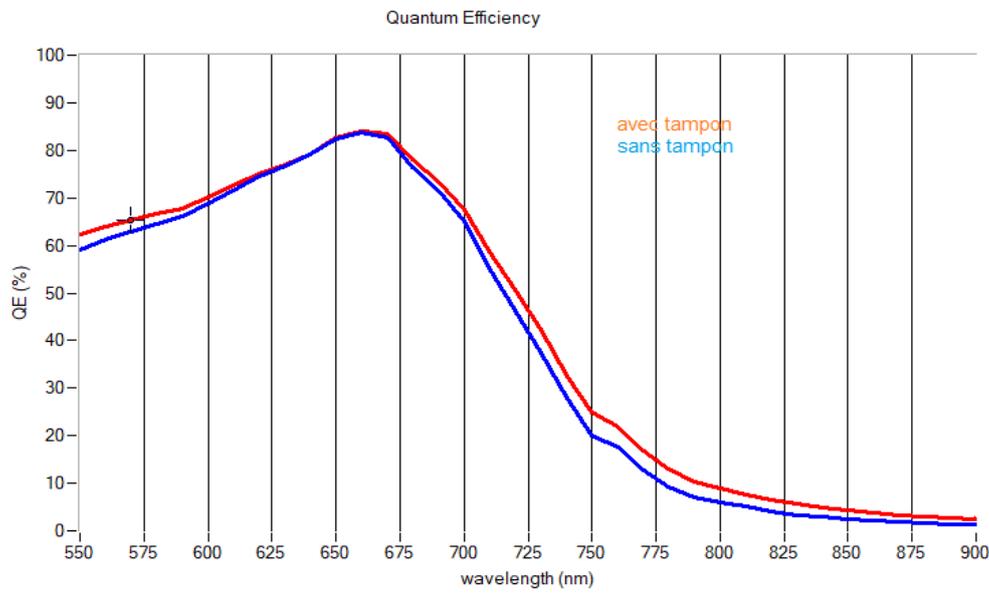


Figure III. 9: variation de rendement en fonction longueur d'onde des deux cellules

Nous remarquons sur la courbe que le rendement atteint sa valeur maximale de longueur d'onde entre 650 nm et 675 nm, puis commence à diminuer jusqu'à s'annuler à la valeur de 900 nm. La valeur du rendement dans la cellule avec la couche tampon est meilleure que celle de la cellule sans couche tampon.

Nous en déduisons que la couche tampon améliore le rendement de la cellule solaire.

Chapitre III Résultats et discussions

6 Influence de la température de fonctionnement sur les caractéristiques les cellules solaires sans tampon et avec tampon

La température est l'un des facteurs influençant le système photovoltaïque. Pour démontrer cet effet, nous avons étudié les variations des caractéristiques électriques des cellules solaires avec et sans couche tampon.

Tableau III.4:Influence de variation de température sur les caractéristiques de cellules (sans tampon)

T(K)/ Car	Voc	Icc	FF	Eta
260	1.0314	13.6560	53.74	7.57
280	0.8665	13.6888	60.67	7.20
300	0.7772	13.7330	63.57	6.79
320	0.7116	13.7369	64.35	6.29
340	0.6474	13.7180	64.05	5.69

Tableau III.5:Influence de variation de température sur les caractéristiques de cellules solaire (Avec tampon)

T(K)/Car	Voc	Icc	FF	Eta
260	1.0364	14.8411	52.98	8.18
280	0.8751	15.0823	59.99	7.92
300	0.7833	15.4563	63.50	7.69
320	0.7184	15.5466	64.54	7.21
340	0.6550	15.7300	64.42	6.64

6.1 La simulation Influence de la température de fonctionnement sur les caractéristiques les cellules solaires (sans tampon et avec tampon)

A partir de les résultats, on constate que le rendement de la cellule avec une couche tampon est plus élevé que celui de la cellule sans couche tampon, ce qui montre que la couche tampon améliore le rendement.

Il est également évident que lorsque la température est de 300K, le facteur de forme est le même pour les deux cellules. Cependant, lorsque la température est inférieure à 300K, le facteur de forme de la cellule sans couche tampon est plus élevé que celui de la cellule avec couche tampon, et lorsque la température dépasse 300K, le facteur de forme de la cellule avec couche tampon est supérieur à celui de la cellule sans couche tampon.

Chapitre III Résultats et discussions

En ce qui concerne le courant de court-circuit, il reste relativement constant pour la cellule sans couche tampon, tandis que pour la cellule avec couche tampon, il augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale de $15,73 \text{ mA/cm}^2$.

Ainsi, on peut conclure que le courant de court-circuit de la cellule sans couche tampon est considérablement inférieur à celui de la cellule avec couche tampon.

On remarque que la tension de circuit ouvert diminue dans les deux cas (avec ou sans couche tampon) en fonction de la température.

7 Influence de l'épaisseur de la couches tampon p'nc-Si :H

Afin d'améliorer le rendement de la cellule solaire, nous avons ajouté une couche tampon à la cellule solaire. Cette couche agit pour améliorer les caractéristiques électriques.

Afin de déterminer l'épaisseur idéale de la couche tampon, nous avons varié l'épaisseur de cette couche puis nous traçons les variations des quelque caractéristiques de sortie en fonction de l'épaisseur.

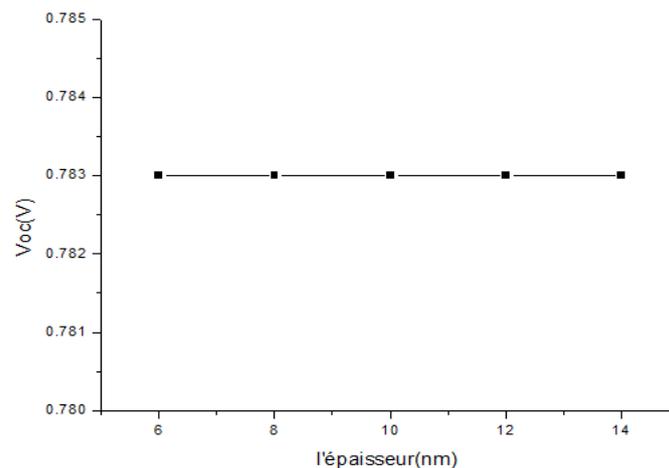


Figure III. 10:La variation de Voc en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (p'nc-Si : H)

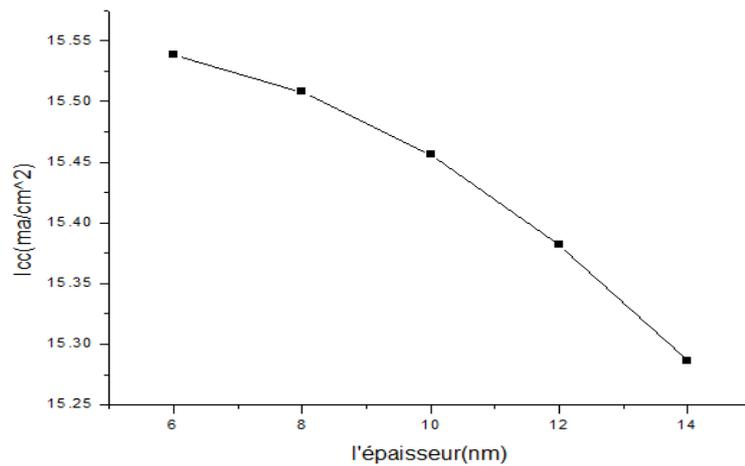


Figure III. 11: La variation de courant court-circuit en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (p'nc-Si : H)

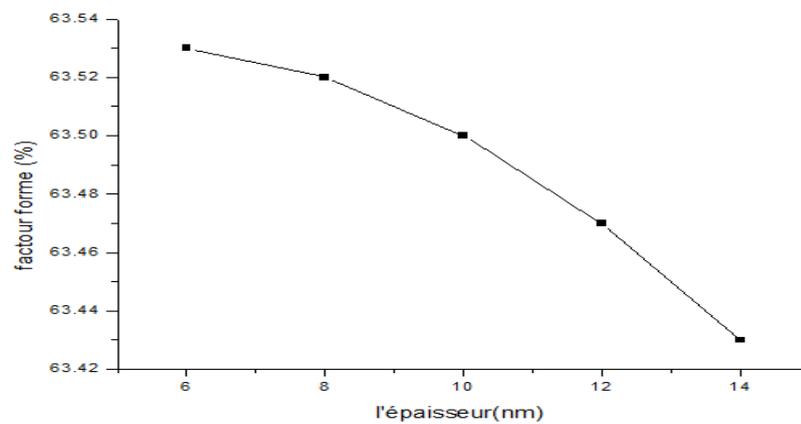


Figure III. 12: La variation de facteur forme en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (p'nc-Si : H)

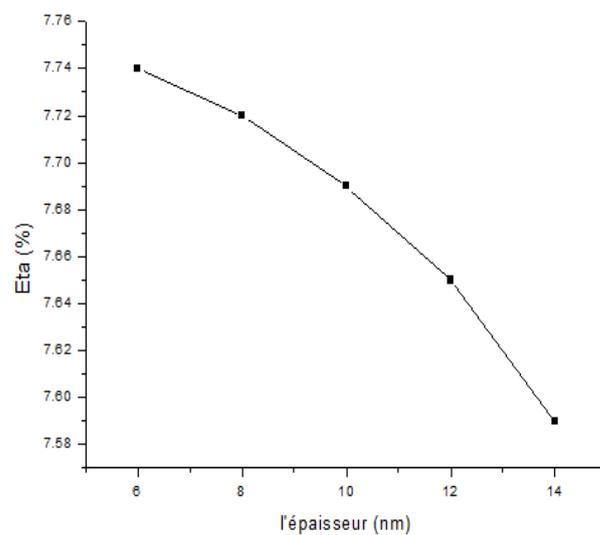


Figure III. 13: La variation de rendement en fonction de l'épaisseur de la couche tampon (p'nc-Si : H)

Chapitre III Résultats et discussions

L'effet de l'épaisseur de la couche tampon sur les caractéristiques de la cellule solaire photovoltaïque est illustré par cette étude graphique.

Nous constatons que l'épaisseur de la couche tampon a un impact sur le courant de court-circuit, le rendement et le facteur de forme de la cellule solaire.

En effet, plus l'épaisseur de la couche tampon augmente, plus le facteur de forme, le rendement et le courant de court-circuit diminuent. En ce qui concerne la tension de circuit ouvert, elle n'est pas affectée par le changement de l'épaisseur de la couche isolante et reste constante.

En lisant le graphique, nous avons remarqué que l'épaisseur optimale de la couche tampon est de 10 nm et toute autre épaisseur différente de cette valeur aura un impact négatif sur les performances de la cellule.

8 Conclusion

À partir des informations et des données précédentes, nous avons tracé les variations du coefficient d'absorption pour les matériaux-Si : Het a-Si:H en fonction de la longueur d'onde. Ensuite, nous avons mis ces résultats sous forme de fichiers pouvant être lus par des logiciels scaps. Nous avons utilisé ces résultats pour simuler la cellule étudiée.

Nous avons étudié les coefficients d'absorption de matériaux (nc-Si :H, a-Si :H), qui sont très différents. Ainsi, le nanocristallin peut absorber les photons de faibles énergies alors que le silicium amorphe absorbe efficacement les photons de hautes énergies.

Nous avons étudié deux couches de cellules solaires en couche mince et ajouté une couche tampon à l'une d'entre elles.

Connaître l'effet de cette couche sur les propriétés électriques

Nous avons constaté que lors de l'ajout de la couche isolante, le rendement et toutes les propriétés électriques s'améliorent.

Nous avons mené une deuxième étude visant à comprendre l'impact de la température sur les propriétés électriques des deux cellules solaires (avec couche tampon et sans couche tampon).

Nous avons constaté qu'à mesure que la température augmentait, les propriétés électriques des deux cellules diminuaient, ce qui signifie que l'augmentation de la température a un effet négatif sur le fonctionnement des cellules.

Ensuite, nous avons réalisé une expérience en faisant varier l'épaisseur de la couche tampon pour observer son influence sur les propriétés électriques de la cellule et déterminer l'épaisseur idéale.

Nous avons constaté qu'une augmentation de l'épaisseur de la couche isolante affecte également négativement les propriétés électriques de la cellule.

**CONCLUSION
GENERALE**

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion général

Étant donné que les cellules photovoltaïques constituent un élément essentiel de la technologie des énergies renouvelables, elles jouent un rôle important dans la transition vers un système plus durable et plus respectueux de l'environnement.

Dans ce mémoire, nous avons étudié le sujet de contribution à l'étude de cellules solaires photovoltaïques à base des couches minces.... où nous avons divisé ce travail en trois axes principaux.

Dans ce travail, nous avons abordé la définition des principes de base, clarifié certains de ses concepts et évoqué certains des avantages de cette technologie, ainsi que ses inconvénients, ou plutôt ses faiblesses, qui font actuellement l'objet de recherches et d'études.

Ensuite, dans le deuxième axe, nous avons discuté des cellules à couches minces, qui sont considérées comme des cellules solaires de deuxième génération, et expliqué les matériaux à partir desquels elles sont composées et les méthodes d'extraction de ces matériaux.

Ensuite nous avons expliqué les méthodes de positionnement de ces matériaux et comment injecter et induire les semi-conducteurs.

Dans le dernier axe, nous avons eu recours à la modélisation et à la simulation d'un exemple de ces cellules afin de mener des expériences et des études, et cela a été réalisé à l'aide du programme (Scaps 1D).

Nous avons déterminé l'effet de l'ajout d'une couche isolante à la cellule sur les propriétés électriques, de sorte que nous avons constaté qu'elles s'améliorent avec la présence de la couche isolante. Nous avons ensuite mené une étude visant à découvrir l'effet de l'augmentation de l'épaisseur et de la température. Les propriétés électriques.

Nous avons constaté que leur augmentation a un effet négatif.

Référence

Référence

Références

- [1] TOUMI MENAD , MESSAOUDI HAMID, « étude de fonctionnement d'une cellule solaire gratzel» Mémoire de Fin d'Etudes de master académique Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou".
- [2] MEKEMECH ABDELKADER, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes. » Thèse de Doctorat En Physique, L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem 2017."
- [3] ZERGUINE WIDED, «Électrosynthèse et caractérisation de semi-conducteur pour des Applications dans les cellules photo électrochimiques», Thèse Doctorat en Sciences, Université ferhat abbas - setif1, 2021".
- [4]: ["https://fr.wikipedia.org/wiki/Gap_direct_et_gap_indirect"](https://fr.wikipedia.org/wiki/Gap_direct_et_gap_indirect).
- [5] BERBER MOHAMED , «Etude des nanostructures lasers à base de nitrures d'antimoniures GaNSb/AlGaInNSb »,These de Doctorat , Université Djillali Liabes de sidi bel abbes 2014."
- [6] ["http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/co/Contenu_03.html"](http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/co/Contenu_03.html).
- [7] DR. HAKIMA YAHY «Physique des Semi-conducteurs» Polycopié du Cours, Université 8 mai 1945 Guelma, 2020/2021".
- [8] AZIZI RABIAA, « Etude d'une cellule solaire par le simulateur SCAPS», Mémoire de master Université Ahmed Daria – Adrar, 2019/2020".
- [9] CHAABANE MADOUY ,LILYA LAIDANI «Analyse approfondie des paramètres clés d'une cellule solaire au Silicium par simulation numérique» Mémoire de master, Université University of Mohamed El Bachir El Ibrahimi – Bordj Bou Arreridj."
- [10]. Mr. AMIRI BENAMEUR, « Modélisation d'une cellule solaire p-i-n à base de silicium amorphe (a-Si:H) et silicium nanocristallin oxydé (nc-SiOx:H) », Pour l'obtention du diplôme de Magister en physique Université d'Oran des Sciences et de la Technologie (usto –mb) 2014 ."
- [11] LAKHDARI RAHMA, « étude par simulation numérique de l'effet des défauts dans une cellule solaire N/P en silicium cristallin » , mémoire de master ; universite Med khaidar Biskra".
- [12] ["https://www.powerwaywafer.com/fr/"](https://www.powerwaywafer.com/fr/).
- [13] YACINE MAROUF, « Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra2019".
- [14] SERDOUK MOHAMMED RIDHA, « Etude par simulation numérique des propriétés électriques d'une cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) », diplôme de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra".
- [15] BECHANE LEILA, «Etude de l'amélioration des propriétés de matériaux semi-conducteurs pour des applications comme cellules photovoltaïques », thèse de doctorat Université Ferhat Abbas - Sétif 1 2022".
- [16] TENNOUNE MOÏSE-EDDINE, MAHRANE AMINE, « Étude d'une cellule photovoltaïque en hétérojonction en silicium nanocristallin » , Mémoire de fin d'études de Master Université Mohammed Seddik Ben Yahia Jijel 2020".
- [17] ZANOUBAKHTA «Etude des propriétés optoélectroniques du Si-nanocristallin hydrogéné» mémoire de master Centre Universitaire de Tissemsilt, 2016/2017".

Référence

- [18] J. Jean-Pierre , A. Slaoui, "Jean-Pierre Joly et Abdelilah Slaoui ,18. Silicium cristallin : de la cellule au module P : 165-167".
- [19] "<https://www.nagwa.com/fr/eg/>".
- [20] "<https://ceramique-technique.com/>".
- [21] "<https://unacademy.com/>".
- [22] "https://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal".
- [23] "<http://www.optique-ingenieur.org/>".
- [24] SMAÏL SEMAOUI, « Etude de l'électrification d'un village avec de l'énergie solaire photovoltaïque », Mémoire Pour l'obtention du titre de Magister, Université de Ouargla 2004."
- [25] BOUAMER MOHAMMED ALBACHIR ET DAHMANE YACINE «Contribution à l'étude des propriétés des couches minces - application aux cellules solaires photovoltaïques», mémoire master, université de ghardaia (2019)".
- [26] "Jimmy Royer. Thomas Djiako .Eric Schiller.Bocar Sada Sy «le pompage photovoltaïque» .Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens , Université d'Ottawa, Canada (1998)".
- [27] "Morguerait, «Les piles solaires, le composent et ces applications» Préface de F.Allest."
- [28] "U. Stephan, J. Kuske, W. Frammelsberger, P. Lechner, W. Psyk and H. Schade, « Large area deposition technique for PECVD of amorphous silicon [solar cells] », Photovoltaic Specialists, Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE 29 Sept.-3 Oct., 1997, pp. 647."
- [29] CHAHIRA LEKHAL, NASRINE ARRIS «Etude comparative des effets des revêtements antireflets à base de l'ITO et ZnO sur les performances photovoltaïques des cellules solaires de type a-Si:H/c-Si », Mémoire de Fin d'Etudes de master académique Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2016".
- [30] OURAHMOUN OURIDA, «Elaboration, caractérisation et modélisation des paramètres électriques d'une cellule solaire organique», Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2018".
- [31] SAHOUR DOUNIAGUESSAB BORHANE , «Etude et modélisation d'un panneau photovoltaïque » ,Mémoire de fin d'étude Master Académique Université 8Mai 1945 – Guelma 2021".
- [32] A. Belfar, "Mr. Belfar Abbas , «Modélisation et optimisation de deux cellules solaires n-i-p et n-i-p'-p à base de silicium amorphe (a-Si:H) et silicium nanocristallin (nc-Si:H)» , thèse de doctorat , Universite des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf 2013 ."
- [33] ADMANE ET LARAB AMIRA, « L'effet de la couche tampon sur les performances de la cellule solaire à base de Kësterite » Memoire de master Universite Saad dahlab – blida 1-2022/2023".
- [34] N. NAÏMA, «Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn1-xGaxSe2» thèse de Doctorat, Université Des Frères Mentouri – Constantine 2015".
- [35] F. V, "V.Foncrose, «Nanocristaux, films et cellules photovoltaïques de Cu2ZnSn(S, Se) 4 par Impression d'encres», thèse des Doctorat, l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2015."
- [36] GUERROUT NOUREDDINE ET GOUAREH ABDELHAMID, «Simulation d'une cellule solaire en couches minces à base de Sb2(Se1-xSx)3», Mémoire Master Académique, Universite Kasdi Merbah Ouargla 2020".

Référence

- [37] AZZAOUI MOHAMMED, « Spectroscopie et processus atomiques du gaz réactif Dans un pulvérisateur cathodique » thèse de doctorat Université Kasdi Merbah – Ouargla 2022".
- [38] KHAOUA RANIA ZATOUT AMEL «Elaboration des couches minces zns par la méthode spin coating pour application en photocatalyse des polluants organiques»Mémoire master Académique ,2019/2020."
- [39] AMEL KHEDIRI ET FATMA BOUALLEG « Etude de l'influence de la température du substrat sur les propriétés structurales et optiques des couches minces de NiO »Mémoire de master, Université de Larbi Tébessi –Tébessa2018."
- [40] BENCHELLOUIA MOHAMMED FATHI ET BELMADANI MAARADJ, « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque en couches minces à base de Sb₂(S₁-XSeX)₃ avec un profil graduel Propriétés optiques, » Memoire Master Académique ,Université Kasdi Merbah Ouargla 2019".
- [41] BOUGHANEM DJAMAIA, «Influence des propriétés du silicium amorphe hydrogéné sur la performance d'une Cellule solaire HIT » Mémoire de fin d'étude, Université Abdelhamid Ben Badis – Mostaganem".
- [42] "A. Niemegeers, M. Burgelman, K. Decock, J. Verschraeagen, S. Degrave:"SCAPS3201 Manuel "ELIS, Septembre 2013".
- [43] "S. Liu, X. Zeng, W. Peng, H. Xiao, W. Yao, X. Xie, C. Wang, Z. Wang J. Non-Cryst. Solids 357 (2011) p.121."
- [44] A- RACHID «propriétés du couches minces de silicium nanocristallin déposéespar PECVD à partir d'un plasma de silane dilue avec l'argon» thèse doctorat, université Oran Essenia 2016".

Référence

Annexe :

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'enseignement Supérieur et de La recherche Scientifique

جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الآلية والمخروميكانيك

Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département automatique et électromécanique

إذن بالطباعة (مذكرة ماستر)

بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف الطلبة التالية أسماؤهم:

1. الطالب (ة):
2. الطالب (ة):
3. الطالب (ة):

تخصص:
نمنح نحن الأستاذ (ة):

الاسم واللقب	الرتبة - الجامعة الأصلية	الصفة	الامضاء
موظف حامد	M C B	مصصح (1)	
نزار زبيح	M C B	مصصح (2)	
عزراوي محمد	M C B	مؤطر	

ذن بطباعة النسخة النهائية لمذكرة ماستر الموسومة بعنوان

Contribution à l'étude des cellules solaires photovoltaïques à base des couches minces

إمضاء رئيس القسم
قسم الآلية والمخروميكانيك
كلية العلوم والتكنولوجيا
عزراوي محمد