

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen -

Faculté de Technologie



THÈSE

De

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : ÉLECTRONIQUE

Option : Nanophysique et nanotechnologie

Présentée par : BENBEKHTI Fatiha

Sujet

Etude, modélisation et simulation de cellules photovoltaïques de 3^{ème} génération à base de couches minces et de nanofils sur substrat en silicium

Soutenue publiquement, le 06/07/2017, devant le jury composé de :

Mr GHAF FOUR Kheireddine	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr BENMANSOUR Abdelhalim	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
Mr BASSOU Ghaouti	Professeur	Univ. Sidi Bel Abbés	Examineur 1
Mr BEGH DAD Mohammed	MCA	Univ. Mostaganem	Examineur 2

Remerciements

Je remercie ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné la force, la volonté et la patience pour mener à terme mon travail.

Je tiens à témoigner ma profonde gratitude et mes remerciements les plus vifs au professeur Mr BENMANSOUR Abdelhalim, enseignant au département d'hydraulique et directeur de l'unité de recherche des matériaux et énergies renouvelables pour m'avoir confié ce travail et pour ses conseils et sa disponibilité durant sa préparation. Qu'il trouve ici l'expression de mon respect.

Je remercie également Mr GHAFFOUR Kheireddine, enseignant au département de génie électrique et électronique, pour l'honneur qu'il m'a accordé en acceptant de présider le jury de cette thèse.

J'adresse mes vives reconnaissances à Mr BASSOU Ghaouti, professeur à l'université de Sidi Bel Abbés, qui a accepté de faire partie des membres de jury, et d'examiner ce travail.

Mes remerciements vont également à Mr BEGHDAD Mohammed maître de conférences A à l'université de Mostaganem, qui a accepté de faire partie des membres de jury, et d'examiner ce travail.

Enfin, je n'aurais pas pu aboutir à cette étape sans le support quotidien de ma famille et mes amis. Je voudrais remercier du fond du cœur mes parents, mes frères, mes sœurs, mes neveux, mes nièces et mes amis pour leurs encouragements.

Résumé

Notre travail de recherche s'inscrit dans le cadre des cellules photovoltaïques dites de « 3^{ème} génération ». Nous nous intéressons à la modélisation et la simulation des structures multicouches à base de silicium à l'aide du Silvaco. Notre contribution est l'intégration des nanofils dans ces structures afin d'optimiser les performances des dispositifs, en particulier le rendement de conversion.

Afin de déterminer les différents paramètres liés à la conversion photovoltaïque, nous avons étudié deux modèles de cellules photovoltaïques à couches minces multijonctions : [la double jonction (a-SiGe:H/uc-Si:H) et la triple jonction (a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si:H)] et nous les avons comparés à un troisième modèle où nous avons incorporé des nanofils de silicium dans une structure simple jonction (a-Si:H/NFSi:H/uc-Si:H).

L'incorporation de nanofils de silicium dans la structure simple jonction nous permet d'augmenter le rendement de conversion électrique d'environ 1.5% et de diminuer la taille de ces cellules et par conséquent leur coût.

Mots-clés : Cellules photovoltaïques – Silicium – Couches minces – Nanofils – Optimisation – Rendement de conversion – Simulation et modélisation.

المـلـخـص

بمختار هو جزء من الخلايا الكهروضوئية تدعى 'الجيل الثالث'، حيث نهتم بالنمذجة والمحاكاة لهياكل متعددة الطبقات المكونة أساساً من السيليكون باستخدام برنامج المحاكاة سيلفاكو. مساهمتنا تتمثل في إدماج النانو أسلاك في هذه الهياكل لتحسين أداء الجهاز، الأمر الذي يؤدي إلى تحسين كفاءة التحويل.

لتحديد م. مختلف المعايير المتعلقة بالتحويل الكهروضوئي، قمنا بدراسة نموذجين من الخلايا الضوئية المصنعة من الطبقات الرقيقة متعددة الروابط (الرابط الثنائية و الرابط الثلاثية). ثم قارنهما مع النموذج الثالث أين أدمجنا أسلاك السيليكون النانوية في هيكل أحادي الرابط. إدماج أسلاك السيليكون في هيكل هيكل أحادي الرابط سسمح لنا بزيادة كفاءة التحويل الكهربائية حوالي 1.5% وتقليل حجم هذه الخلايا وبالتالي تكلفتها.

كلمات البحث: الخلايا الكهروضوئية - السيليكون - الطبقات الرقيقة - الأسلاك النانوية - كفاءة التحويل - التحسين - المحاكاة و النمذجة.

Abstract

Our research work falls within the framework of so-called "3rd generation" photovoltaic cells. We are interested in the modeling and simulation of silicon-based multilayer structures using Silvaco. Our contribution is the integration of nanowires in these structures In order to optimize the performances of the devices, in particular the conversion efficiency.

In order to determine the various parameters related to photovoltaic conversion, we have studied two models of multijunction thin-film photovoltaic cells: [the double junction (a-SiGe:H/uc-Si:H) and the triple junction (a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si:H)] and We have compared them with a third model where we have incorporated silicon nanowires in a simple structure (a-Si:H/NFSi:H/uc-Si:H).

The incorporation of silicon nanowires in the simple junction structure allows us to increase the electrical conversion efficiency by 1.5% and to decrease the size of these cells and consequently their cost.

Keywords: Photovoltaic cells - Silicon - Thin films - Nanowires - Optimization - Conversion efficiency - Simulation and modeling.

Sommaire

Remerciements

Résumé

Abstract

Introduction générale..... 13

Chapitre I : Etat de l'art des cellules photovoltaïques

I.1. L'environnement photovoltaïque 17

I.1.1. Energies renouvelables..... 17

I.1.2. Energie solaire..... 18

I.1.3. Place du photovoltaïque 19

I.1.4. Conversion de l'énergie solaire 21

I.1.5. Absorption des semi-conducteurs..... 21

I.1.6. Notions de Base de cellule solaire..... 22

I.1.7. Facteurs affectant le rendement des cellules solaires 30

I.1.8. Mécanismes de perte 32

I.2. Technologie photovoltaïque 35

I.2.1. Photovoltaïques de première génération..... 36

I.2.2. Photovoltaïques de deuxième génération 38

I.2.3. Photovoltaïques de troisième génération..... 43

I.3. Conclusion..... 48

Chapitre II: Matériaux et techniques utilisés pour l'élaboration de la cellule solaire

II.1. Matériaux..... 50

II.1.1. Semi-conducteur..... 50

II.1.2. Silicium 51

II.1.3. Miniaturisation 54

II.1.4. Nanofils 55

II.1.5. Nanofils de silicium..... 58

II.1.6. Couche d'absorbeur..... 63

II.1.7. Oxyde métallique 64

II.1.8. Couches antireflet..... 65

II.2. Techniques utilisées dans la fabrication 66

II.2.1. Photolithographie 66

II.2.2. Gravure..... 67

II.2.3. Métallisation..... 69

II.3. Conclusion.....	71
Chapitre III: Environnement du simulateur Silvaco	
III.1. Simulateur TCAD.....	73
III.1.1 Simulateur TCAD-Silvaco	73
III.1.2 Simulateur du procédé de fabrication ATHENA	74
III.1.3 Utilisation d'ATHENA avec d'autres logiciels de SILVACO.....	74
III.1.4. Simulateur ATLAS.....	75
III.1.5. Etapes de la simulation sous ATLAS.....	76
III.2. Conclusion.....	82
Chapitre IV : Modélisation et simulation des cellules solaires étudiées	
IV.1. Modélisation des structures	84
IV.1.1. Conception d'une cellule solaire à simple jonction.....	84
IV.1.2. Conception d'une cellule solaire à double jonction.....	91
IV.1.3. Conception d'une cellule solaire à Triple jonction.....	92
IV.2. Simulation et caractérisation des structures étudiées	93
IV.2.1. Caractéristiques de cellule solaire de référence.....	94
IV.2.2. Caractéristiques de la cellule solaire à double jonctions	95
IV.2.3. Caractéristiques de la cellule solaire à triple jonction	105
IV.2.4. Caractéristiques de la cellule solaire à simple jonction avec nanofils.....	115
IV.3. Conclusion.....	129
Conclusion générale	130
Références Bibliographiques.....	133
Travaux scientifiques	137

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1 Cellules photovoltaïques à haut rendement pour alimenter la station spatiale internationale.....	19
Figure I. 2 Panneaux photovoltaïques	20
Figure I. 3 Diode idéale sans éclairage et son circuit équivalent	22
Figure I. 4 Lumière incidente sur une cellule solaire typique PN.....	24
Figure I. 5 Graphiques de puissance et de densité de courant en fonction de la tension pour une cellule solaire.....	25
Figure I. 6 Caractéristique courant-tension sous éclairage typique d'une cellule solaire....	27
Figure I. 7 Schéma équivalent d'une cellule solaire	30
Figure I. 8 Différents processus de recombinaison	34
Figure I. 9 Type des cellules photovoltaïques	35
Figure I. 10 Monocristal industriel 156 x156 mm ² Cellule solaire.....	37
Figure I. 11 Première cellule solaire amorphe a-Si fabriquée en 1974 par David Carlson	39
Figure I. 12 Silicium amorphe	39
Figure I. 13 structure à hétérojonction a-Si:H/c-Si:H/a-Si:H	40
Figure I. 14 Structure typique d'une cellule solaire en CIGS	41
Figure I. 15 Cellule solaire en GICA sur un substrat flexible.....	42
Figure I. 16 Structure schématique de la fabrication.....	44
Figure I. 17 Structure typique d'une cellule solaire à triple jonction CIGS.....	45
Figure I. 18 Cellule solaire polymère	46
Figure I. 19 Disposition schématique de la structure d'une cellule solaire polymère-fullerène	46
Figure I. 20 Disposition schématique de la structure d'une cellule solaire de silicium à base des nanofils.....	47

Chapitre II

Figure II. 1. Structure d'un semi-conducteur intrinsèque.	50
Figure II. 2 L'atome de Silicium	51
Figure II. 3. Maille élémentaire du cristal de silicium : cubique à faces centrées dont la moitié des sites tétraédriques est occupée.	52
Figure II. 4. Structure de bande du Silicium.	53
Figure II. 5 Principe de la croissance VLS	60
Figure II. 6 Principe de la photolithographie	67

Chapitre III

Figure III. 1 Environnement DECKBUILD.....	74
Figure III. 2 Outil TONYPLOT	75
Figure III. 3 Maillage typique dans ATLAS.	78

Chapitre IV

Figure IV. 1 Définition du maillage.....	84
Figure IV. 2 Définition du substrat	85
Figure IV. 3 Gravure des nanofils NFSi	85
Figure IV. 4 Epitaxie et Gravure d'une couche de silicium amorphe intrinsèque.....	86
Figure IV. 5 Epitaxie et Gravure d'une couche de silicium amorphe type n.....	87
Figure IV. 6 Epitaxie et Gravure d'une couche d'oxyde de zinc ZnO:Al.....	87
Figure IV. 7 Epitaxie de couches de Nickel et Aluminium.....	88
Figure IV. 8 Epitaxie d'une couche de résine	88
Figure IV. 9 Gravure de la couche de résine.....	89
Figure IV. 10 Gravure de la couche de Nickel et la couche d'Aluminium.....	89
Figure IV. 11 Epitaxie et Gravure d'une couche d'oxyde de silicium.....	90
Figure IV. 12 Définition des électrodes	90
Figure IV. 13 Structure obtenue après simulation.....	91
Figure IV. 14 Structure d'une double jonction amorphe/microcristallin a-Si:H/ μ c-Si:H (Zeman, 2010).....	92
Figure IV. 15 Structure obtenue après simulation.....	92
Figure IV. 16 Structure typique d'une cellule solaire à multijonctions a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si:H.....	93
Figure IV. 17 Structure de la cellule de référence micromorphe a-Si:H/ μ c-Si:H.....	94
Figure IV. 18 Caractéristique I-V de la cellule micromorphe a-Si:H/ μ c-Si:H	95
Figure IV. 19 Structure de la cellule micromorphe a-SiGe:H/ μ c-Si:H.....	95
Figure IV. 20 Spécification des électrodes dans la structure a-SiGe:H/ μ c-Si:H	96
Figure IV. 21 Caractéristique I-V de la cellule micromorphe a-SiGe:H/ μ c-Si:H sans une couche intermédiaire	97
Figure IV. 22 Ajout d'une 3 ^{ième} électrode dans la structure a-SiGe:H/ μ c-Si:H.....	97
Figure IV. 23 Caractéristique I-V de la cellule micromorphe a-SiGe:H/ μ c-Si:H avec l'ajout d'une 3 ^{ième} électrode.....	98
Figure IV. 24 Caractéristiques I-V en variant l'épaisseur de cellule supérieure 'Top Cell' a-SiGe.....	98
Figure IV. 25 Caractéristiques I-V en variant l'épaisseur de cellule inférieure 'Bottom Cell'.....	99
Figure IV. 26 Caractéristiques I-V de la cellule supérieure 'Top Cell' pour a-Si:H, a-Ge:H et a-SiGe:H.....	101
Figure IV. 27 Caractéristiques I-V de la cellule inférieure 'Bottom Cell' pour μ c-Si, μ c-Ge et μ c-SiGe.....	102
Figure IV. 28 Caractéristiques I-V de la cellule supérieure pour différents dopages.....	103
Figure IV. 29 Caractéristiques I-V de la cellule inférieure pour différents dopages	104
Figure IV. 30 Rendement quantique de la cellule.....	105
Figure IV. 31 Structure de la cellule à triple jonctions a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si:H.....	106
Figure IV. 32 Caractéristique I-V de la cellule a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si:H sans couches intermédiaires.....	107

Figure IV. 33 Caractéristique I-V de la cellule a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si:H avec deux couches intermédiaires	108
Figure IV. 34 Caractéristiques I-V en variant l'épaisseur de cellule supérieure a-Si:H	109
Figure IV. 35 Caractéristiques I-V de la cellule moyenne 'Middle Cell' a-SiGe:H pour différentes épaisseurs	110
Figure IV. 36 Caractéristiques I-V en variant l'épaisseur de cellule inférieure (Bottom Cell)	110
Figure IV. 37 Caractéristiques I-V de la cellule moyenne 'Middle Cell' : a-SiGe et μ c-SiGe	111
Figure IV. 38 Caractéristiques I-V de la cellule supérieure 'Top Cell' pour différents dopages	112
Figure IV. 39 Caractéristiques IV de la cellule moyenne (Middle Cell) pour différents dopages.....	113
Figure IV. 40 Caractéristiques I-V de la cellule inférieure μ c-Si:H pour différents dopages	114
Figure IV. 41 Structure d'une cellule solaire à simple jonction après simulation	116
Figure IV. 42 Caractéristique I-V obtenue de cellule a-Si:H/NFSi/ μ c-Si:H après simulation	117
Figure IV. 43 Caractéristiques I-V de cellule à base de Nanofils de Si, Ge et SiGe	117
Figure IV. 44 Caractéristiques I-V des couches amorphes de Si, Ge et SiGe	118
Figure IV. 45 Caractéristiques I-V des substrats de Si, Ge et SiGe	119
Figure IV. 46 Caractéristiques I-V pour des différentes longueurs du substrat.....	121
Figure IV. 47 Caractéristiques I-V des Nanofils à différentes longueurs	122
Figure IV. 48 Caractéristiques I-V des Nanofils à différents diamètres	123
Figure IV. 49 Caractéristiques I-V à différentes épaisseurs de couche amorphe n-a-Si:H....	124
Figure IV. 50 Caractéristiques I-V à différentes épaisseurs de couche amorphe i-a-Si:H....	125
Figure IV. 51 Caractéristiques I-V de la cellule pour différents dopages des NFs.....	126
Figure IV. 52 Caractéristiques I-V de la cellule pour différents dopages du substrat	126
Figure IV. 53 Caractéristiques I-V de la cellule pour différents dopages de couche amorphe n-a-Si	127

Liste des tableaux

Tableau III. 1 Groupe des commandes et déclarations pour un fichier Silvaco ATLAS.....	76
Tableau IV. 1 Résultats de la variation de l'épaisseur de la cellule supérieure.	99
Tableau IV. 2 Résultats de la variation de l'épaisseur de la cellule inférieur 'Bottom Cell'.	100
Tableau IV. 3 Résultats de la variation du matériau de la cellule supérieure.	101
Tableau IV. 4 Résultats de la variation du matériau de la cellule inférieure.	102
Tableau IV. 5 Résultats de la variation du dopage de la cellule supérieure.....	103
Tableau IV. 6 Résultats de la variation du dopage de la cellule inférieure.....	104
Tableau IV. 7 Résultats de la variation de l'épaisseur de la cellule supérieure.	109
Tableau IV. 8 Résultats de la variation de l'épaisseur de la cellule moyenne	110
Tableau IV. 9 Résultats de la variation de l'épaisseur de la cellule inférieure.	111
Tableau IV. 10 Résultats de la variation du matériau de la cellule moyenne.	112
Tableau IV. 11 Résultats de la variation du dopage de la cellule supérieure.....	113
Tableau IV. 12 Résultats de la variation du dopage de la cellule moyenne.....	114
Tableau IV. 13 Résultats de la variation du dopage de la cellule inférieure.....	115
Tableau IV. 14 Résultats de la cellule simple jonction pour des nanofils Si, Ge et SiGe.....	118
Tableau IV. 15 Résultats de la cellule pour des couches amorphes Si, Ge et SiGe.....	119
Tableau IV. 16 Résultats de la variation du matériau du substrat.	120
Tableau IV. 17 Résultats de la variation de la longueur du substrat.	121
Tableau IV. 18 Résultats de la variation de la longueur des nanofils.....	122
Tableau IV. 19 Résultats de la variation du diamètre des nanofils.	123
Tableau IV. 20 Résultats de la variation de l'épaisseur de la couche amorphe.	124
Tableau IV. 21 Résultats de la variation de l'épaisseur de la couche i-a-Si.	125
Tableau IV. 22 Résultats de la variation du dopage des nanofils.....	126
Tableau IV. 23 Résultats de la variation du dopage du substrat.	127
Tableau IV. 24 Résultats de la variation du dopage de la couche amorphe.....	127

Liste des abréviations

a-Si : H	Silicium amorphe hydrogéné
a-SiGe	Silicium-germanium amorphe
As	Arsenic
B	Bore
BSF	champ de surface arrière ('Back Surface Field)
CVD	dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition)
E _g	Energie de gap
FF	facteur de forme
Ge	Germanium
HWCVD	dépôt chimique en phase vapeur (Hot Wire Chemical Vapor Deposition)
I _{cc}	Courant de court-circuit
MOCVD	dépôt chimique en phase vapeur métallique organique
NFSi	Nanofils de silicium
PECVD	dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition)
Si	Silicium
Si-HJ	hétérojonction a-Si:H/c-Si
SiO ₂	oxyde de silicium
SLS	Solide-Liquide- Solide
V _{co}	tension en circuit ouvert
VLS	Vapeur-Liquide-Solide
VSS	Vapeur-Solide-Solide
ZnO:Al	Oxyde de zinc dopé en Aluminium
η	rendement de conversion
μc-Si : H	Silicium microcristallin hydrogéné

Introduction Générale

Introduction générale

L'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque est l'un des problèmes majeur et le plus important pour les cellules solaires. Ces cellules utilisées aujourd'hui sont essentiellement constituées de semi-conducteurs inorganiques. Le matériau semi-conducteur dominant sur le marché photovoltaïque, est sans aucun doute le silicium. Cette domination du silicium dans ses formes cristallines et amorphes occupe 99% du marché total photovoltaïque. L'exploitation de cette domination dans l'industrie des semi-conducteurs a fait évoluer ce matériau par conséquent ces propriétés optoélectroniques.

En termes de propriétés physiques et optoélectroniques, le Silicium cristallin ne figure pas parmi les matériaux les plus appropriés dans la conversion photovoltaïque du rayonnement solaire. Cependant, son abondance, son faible coût et la bonne maîtrise de la technologie du silicium le propulse à la première place dans le marché photovoltaïque. Depuis l'avènement des couches minces et des nanofils, le rendement des cellules photovoltaïques fabriquées avec ces matériaux ne cesse d'augmenter. Par ailleurs, ces nouveaux matériaux ont de nombreux avantages par rapport au silicium cristallin, tels que l'absorption, la malléabilité et la légèreté. Les cellules à couches minces réduisent la quantité utilisée de silicium cristallin en introduisant de petites quantités de matériaux adéquats (Ge, Cd, Te, C, etc.) ce qui améliore leur rendement de conversion.

Dans ce cadre de nombreux travaux de recherche concernant les cellules photovoltaïques dites de la '3^{ième} génération' sont en cours de réalisation. Deux directions de recherche sont privilégiées :

- Un rendement élevé : ceci concerne les cellules photovoltaïques multijonctions. Ce sont des cellules sophistiquées et coûteuses destinées à des applications spatiales et militaires.
- Un faible coût : il s'agit des cellules photovoltaïques organiques, hybrides, micro ou nanostructurées. Avec un rendement moins élevé que la première et moins coûteuses. Elles sont destinées à des utilisations publiques.

La miniaturisation est devenue la clé du développement de l'optoélectronique. Le défi est d'accroître le nombre sans cesse de composants, d'où l'intégration de ces derniers de plus en plus petits dans des surfaces infiniment petites. Les nanofils s'y prêtent bien à cette exigence.

Leur utilisation dans les dispositifs, nécessite donc une bonne connaissance de leurs propriétés physiques et optoélectroniques pour une bonne maîtrise de leur dimensionnement, leur positionnement, leur densité de distribution, leur forme, etc. Il faudrait donc bien comprendre leurs mécanismes de croissance. Parmi les nanofils semi-conducteurs fabriqués, ceux à base de silicium présentent des nombreux avantages. Ils sont très prometteurs dans la fabrication de la nouvelle génération de cellule photovoltaïque. En effet, l'industrie de silicium est très avancée dans les procédés de fabrication. Ce matériau bénéficie de plusieurs années d'avance de technologie. C'est le matériau le plus utilisé en électronique compte tenu de son abondance naturelle et de la facilité de son usinage. Les nanofils de silicium reçoivent tout un savoir-faire technique acquis des procédés de silicium usuels dans l'industrie.

La plupart des centres de recherche et les fabricants de cellules photovoltaïques utilisent des prototypes expérimentaux pour tester leurs produits. Ce procédé reste le plus fiable et le plus convaincant pour tester les performances d'une cellule. Cependant, il reste fastidieux, lent à réaliser et coûteux. Pour pallier à ces inconvénients, beaucoup de laboratoires de recherche à travers le monde ont recouru à la modélisation, en utilisant des logiciels de simulation des propriétés physique de différents dispositifs électroniques. Ce procédé est un moyen rapide, cohérent et relativement peu coûteux qui aide à concevoir des prototypes de cellules solaires ayant des propriétés physiques et optoélectroniques optimales.

Notre travail de recherche s'inscrit dans ce cadre-là. Nous avons étudié les propriétés et les performances de cellules photovoltaïques dites 3^{ème} génération, par modélisation et simulation. Nous avons procédé à la modélisation et la simulation de structures à hétérojonctions à base de silicium sous environnement TCAD Silvaco.

Notre étude a porté sur trois modèles de cellules photovoltaïques à hétérojonction. Afin de déterminer les différents paramètres liés à la conversion photovoltaïque, nous avons comparé deux modèles de cellules photovoltaïques à couches minces multijonctions : [la double jonction (a-Si:H/ μ c-Si:H) et la triple jonction (a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si:H)] à un troisième modèle où nous avons incorporé des nanofils de silicium dans une structure simple jonction (a-Si:H/NFSi:H/ μ c-Si:H).

Le but de cette thèse est de modéliser, simuler et valoriser ces modèles, et déduire lequel est le mieux adapté à la fabrication de cellules solaires à rendement élevé et bas coût.

Le manuscrit est organisé comme suit :

Le premier chapitre décrit, dans un premier temps, le fonctionnement ainsi que les paramètres pour évaluer les performances et les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque. Nous y abordons dans cette partie le principe de conversion photovoltaïque, les paramètres caractéristiques de la cellule photovoltaïque ainsi que les différents facteurs limitant le rendement de conversion. Dans un second temps, nous présentons de façon non exhaustive les différentes technologies envisagées pour la réalisation de cellules photovoltaïques. Un bref aperçu est donné sur l'évolution et la progression de ces dernières.

Le second chapitre introduit les matériaux qui constituent notre structure. Nous avons commencé par étudier le silicium, sa structure et ses propriétés, avant d'expliquer l'intérêt des nanofils utilisés dans les cellules. Nous avons aussi passé en revue les différents aspects thermodynamiques de leur croissance et les différentes façons de les synthétiser. Enfin, un état de l'art des méthodes de fabrication des nanofils de silicium nous permettra de justifier l'orientation technologique que nous avons choisie.

Le troisième chapitre est consacré à la représentation du logiciel de simulation Silvaco, ses modules et ses outils de simulation pour modéliser une cellule solaire. Silvaco-ATHENA est un simulateur bidimensionnel du procédé de fabrication des semi-conducteurs permettant la création de dispositifs physiques selon le procédé industriel réel.

Les propriétés électriques des structures modélisées sont utilisées comme entrée par Silvaco-ATLAS. Celui-ci permet de prédire par simulation le comportement électrique des composants modélisés. L'utilisation d'ATHENA et d'ATLAS permet de déterminer facilement l'impact des différents paramètres sur les caractéristiques des dispositifs.

A l'aide de cet outil de travail, le quatrième chapitre s'intéresse à la simulation et la caractérisation des trois structures de cellules photovoltaïques conçues et modélisées. Deux échantillons sont à base de multijonctions et multicouches, dont une cellule à double jonction (a-SiGe:H/ μ c-Si:H) et l'autre une cellule solaire à triple jonction de (a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si:H). Le troisième échantillon est dédié aux cellules en silicium à couches minces avec l'incorporation de nanofils de silicium dans la structure (a-Si:H/NFSi:H/ μ c-Si:H).

Enfin nous concluons par les résultats de notre simulation quant à l'utilisation des nanofils de silicium pour la réalisation des cellules solaires à base des couches minces sur des substrats en silicium.

Chapitre I

Etat de l'art des

Cellules Photovoltaïques

Chapitre I : Etat de l'art des cellules photovoltaïques

Dans ce chapitre, nous introduisons le cadre dans lequel s'inscrit notre travail, le domaine photovoltaïque, la ressource énergétique, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et ses caractéristiques. Puis dans un autre point, nous donnons un aperçu des principales techniques de production de cellules solaires photovoltaïques. Nous citons l'évolution des technologies photovoltaïques les plus courantes jusqu'à l'étape d'intégration des nanofils dans les cellules solaires en couches minces de silicium dans un but d'améliorer le rendement de conversion et diminuer le coût de fabrication.

I.1. L'environnement photovoltaïque

I.1.1. Energies renouvelables

L'accroissement de la population mondiale, les évolutions techniques et les améliorations des conditions de vie ainsi que d'autres facteurs ont poussé l'augmentation de la consommation énergétique pour satisfaire les besoins demandés. Parmi ces besoins, l'énergie sous forme d'électricité, produite par différents moyens. Le plus important est la combustion d'espèces carbonées (ou ressources fossiles), retirées de la surface de la terre. Le charbon, le pétrole et le gaz sont les principales ressources fossiles utilisées et ce sont des énergies non renouvelables. Un autre moyen pour la production d'électricité, nécessitant pas de ressources fossiles est celle de l'énergie hydraulique ou l'hydroélectricité. Elle constitue le un cinquième de la production mondiale totale d'électricité (19%). C'est la source d'énergie renouvelable la plus utilisée (Kohen, 2011; Dahou, 2011). Aussi, la ressource nucléaire, efficace, très peu polluante mais c'est une source à risque (Chernobille, Fukujima).

Parmi les inconvénients des ressources fossiles, leur quantité qui est limitée dans le temps, la quantité finira. Elles sont réparties de façon inégale à la surface du globe et ont une influence négative à l'environnement. Elles sont très polluantes (Grau, 2012; Kessaissia, 2013). En plus, le rejet de CO₂ dans l'atmosphère, qui provoque une augmentation de la température à la surface de la terre engendrant des conséquences fatales pour l'homme et son environnement.

Afin de diminuer ces inconvénients et réduire progressivement la consommation de ressources fossiles, une autre voie des énergies est apparue, c'est celle des énergies renouvelables. Elles peuvent être des solutions alternatives satisfaisant les besoins énergétiques croissants.

Leurs ressources sont ni limitées ni altérées par la consommation humaine. Elles sont mieux réparties sur le globe et elles sont propres. Elles n'ont pas des impacts négatifs sur l'homme et son environnement. Malgré leurs avantages offerts leur contribution à la production d'énergie, reste faible (19,2% en 2014).

Quelques facteurs freinent leur production d'énergie, tel que leur coûts élevés et leur rendements encore trop bas. Cependant, leur coût doit être comparable ou inférieur à celui des énergies fossiles pour les remplacer. La résolution de ces difficultés permettrait l'augmentation de leur part énergétique et ainsi l'atténuation des inconvénients de l'utilisation massive d'énergies fossiles (Grau, 2012; Kohen, 2011). Pour atteindre cet objectif, des efforts de recherche très importants sont donc nécessaires pour trouver des solutions relativement peu coûteuses pour une efficace exploitation des énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables peuvent être classées selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue, telle que solaire, éolienne, etc. Parmi les énergies renouvelables, un candidat de choix est l'énergie solaire et plus particulièrement le photovoltaïque (Grau, 2012).

Les principales sources d'énergies renouvelables sont, ou les trois premières ressources sont infinies à notre échelle de temps:

- Le vent (énergie éolienne) ;
- L'eau (énergie des courants marins, l'énergie des marées, l'énergie des barrages hydrauliques);
- Le soleil (énergie solaire photovoltaïque et thermique) ;
- La biomasse (bois, ou biocarburant), elle reste une énergie renouvelable dans la limite que la consommation n'excède pas la production.

I.1.2. Energie solaire

En plus des points communs partageant avec les autres énergies renouvelables, l'énergie solaire est la source d'énergie la plus importante parmi les sources d'énergie renouvelables sur terre qui pourrait être une alternative aux autres sources classiques et elle présente plusieurs avantages (Abdo, 2007). Elle est facilement exploitable pour de très nombreux usages, ce qui le rend la forme d'énergie la plus pratique et utile. Sa source d'énergie est permanente, c'est la plus abondante de toutes les énergies, fossiles ou renouvelables, et suffisamment bien répartie sur la surface de globe (Grau, 2012). Elle est de plus disponible partout donc convenable aux régions isolées et non couvrant par les réseaux de distribution

électriques (Kessaissia, 2013). Elle est puissante, le rayonnement solaire constitue une énorme source d'énergie qui pourrait satisfaire les besoins énergétiques actuels (Kohen, 2011).

I.1.3. Place du photovoltaïque

Les dispositifs photovoltaïques, également appelés cellules solaires, sont des dispositifs électroniques semi-conducteur de jonction p-n qui convertissent directement la lumière des rayons solaires, en électricité à travers le principe de l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque a été découvert, pour la première fois en 1839, par Edmond Becquerel, lorsqu'il a observé un courant électrique quand la lumière était incidente sur une électrode en platine revêtue d'argent immergée dans une solution d'électrolyte. En 1876, William Adams et Richard Day observent le photo-courant dans une couche de sélénium lorsqu'ils sont mis en contact par deux contacts de platine chauffés.

Cependant, ce n'est que dans les années 1950, avec le développement du silicium de haute qualité, que des dispositifs photovoltaïques sont devenus disponibles pour des applications telles que l'alimentation d'équipements électroniques situés dans des endroits éloignés. Les premières cellules photovoltaïques classiques produites ont été principalement déployés pour fournir de l'énergie électrique pour les satellites orbitaux.

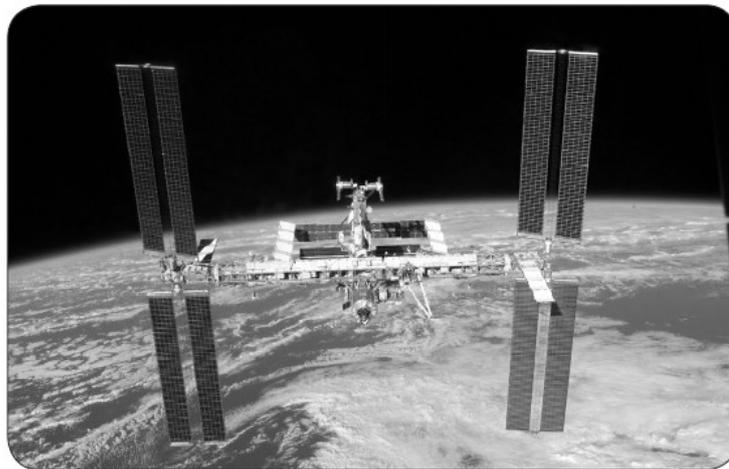


Figure I. 1 Cellules photovoltaïques à haut rendement pour alimenter la station spatiale internationale (NEED, 2015)

Au cours de ce déploiement initial, le coût excessif de la fabrication et le rendement faible des modules solaires sont les uns des défis majeurs qui limitent leur compétitivité comme une source majeure pour répondre à la demande croissante progressive d'énergie qui a continué jusqu'à maintenant (Aribisala, 2013).

Les panneaux photovoltaïques offrent plusieurs avantages tels que leur simple montage, grâce à leur petite taille et leur caractère modulaire ils sont à la portée des personnes, les coopératives et les petites entreprises. Ils permettent une adaptation à des différents besoins énergétiques, leur coût de fonctionnement est récompensé par leur fiabilité. Ils ont une relativement longue durée de vie (25 ans) et ils exigent peu d'entretien (Abdo, 2007; IRENA, 2012).



Figure I. 2 Panneaux photovoltaïques (NEED, 2015)

La domination du silicium comme matériau semi-conducteur de base dans la technologie photovoltaïque, offre beaucoup d'avantages écologiquement parlons, puisque l'utilisation ou l'emploi de silicium, permet le maintien et la protection de l'environnement pour les raisons suivantes: le produit final n'est pas pollué, silencieux et ne provoque pas de perturbations environnementales (Abdo, 2007).

Au cours de ces dernières années, la consommation de silicium a connu une croissance rapide dont la grande part rongée par l'industrie photovoltaïque qui est énormément avancée, ce qu'il qualifierait le premier consommateur de silicium devant la micro-électronique (Abdo, 2007).

Pour diminuer ou freiner cette croissance, deux grands axes de recherche se développaient parallèlement, l'augmentation du rendement de conversion des cellules et la diminution des coûts de production par la diminution de la quantité de silicium consommée plus précisément.

Cependant, les récentes améliorations d'une part, dans la conception, la fabrication et les performances et d'autre part, la réduction du coût et la qualité des cellules et des modules solaires ouvrent les portes pour leurs déploiements dans des applications comme

l'alimentation des applications terrestres à distance. Ces cellules solaires sont utilisées aussi dans des projets d'électrification rurale, dans la charge de batterie pour les aides à la navigation, dans le pompage de l'eau, dans des équipements de télécommunications et des installations militaires critiques. Elles ont également propulsé le système d'énergie solaire comme un moyen concurrentiel pour répondre aux besoins de puissance sans cesse croissante de l'économie mondiale (Aribisala, 2013).

I.1.4. Conversion de l'énergie solaire

L'énergie solaire est constituée des quanta d'énergie électromagnétique, le photon. Son énergie E_{photon} dépend de sa fréquence par la relation:

$$E_{\text{photon}} = h\nu \quad (\text{I.1})$$

Avec

h Constante de Planck ;

ν Fréquence de l'onde électromagnétique.

Une cellule photovoltaïque convertit les rayons solaires (les photons) en électricité (électrons), elle ne peut pas stocker d'énergie. Elle doit être connectée à une charge pour délivrer sa puissance électrique. Les deux étapes de la conversion sont donc :

- Une absorption optique générant une paire électron-trou (porteurs libres) ;
- Une collecte des porteurs photogénérés pour leur utilisation dans le circuit électrique.

Intéressons nous d'abord au phénomène d'absorption optique.

I.1.5. Absorption des semi-conducteurs

L'absorption de la lumière dans les semi-conducteurs peut être décrite de manière quantique. De manière schématique,

- Si un photon incident d'énergie égale à la largeur de bande interdite du matériau est absorbé. L'énergie de ce photon est transférée à un électron de la bande de valence qui passe dans la bande de conduction, laissant dans la bande de valence un trou (chargé positivement) ;
- Si l'énergie du photon incident est inférieure à la largeur de bande interdite du matériau, le photon le traverse sans être absorbé ;
- Si l'énergie du photon est supérieur à la largeur de bande interdite du matériau, l'excès d'énergie (par rapport à la largeur de bande interdite du matériau) donné à l'électron

est converti en chaleur et est donc perdu (temps de relaxation très rapide, de l'ordre de la femto-seconde), c'est la thermalisation des porteurs.

Dans un matériau, la probabilité d'absorption d'un photon est proportionnelle à son énergie. Elle est définie par le coefficient d'absorption α . La bande interdite du silicium cristallin est indirecte, ce qui donne un coefficient d'absorption faible. En plus, chaque absorption d'un photon dans le silicium crée un phonon (vibration du réseau cristallin) afin de satisfaire aux conditions de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement.

I.1.6. Notions de Base de cellule solaire

Les cellules photovoltaïques sont généralement caractérisées par quatre performances: le courant de court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η . Les caractéristiques électriques de base sont communes à toutes les cellules solaires soit organiques ou inorganiques. Lorsqu'elle est mesurée dans l'obscurité, la densité de courant par rapport à la tension (I-V), les caractéristiques des cellules solaires les plus efficaces ressemblent à la réponse exponentielle d'une diode à courant élevé en biais vers l'avant et courant faible en polarisation inverse. Irradier la lumière sur un appareil génère un photo-courant dans la cellule, en plus du comportement de diode, et la caractéristique I-V sous éclairage est idéalement la superposition de la caractéristique sombre et le photo-courant.

I.1.6.1. Diode PN idéale

Pour une bonne compréhension du fonctionnement d'une cellule solaire, il est nécessaire d'analyser les concepts d'une diode PN idéale. En général, une diode idéale dans des conditions sombres à savoir pas d'éclairage, aura une sombre caractéristique I-V montrée dans la figure I.3.

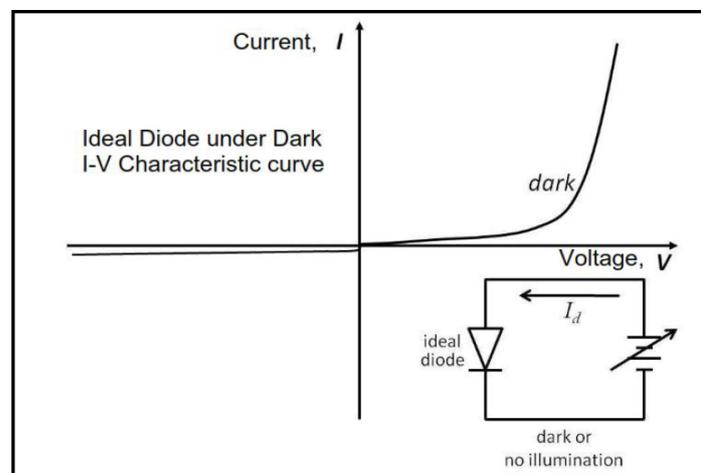


Figure I.3 Diode idéale sans éclairage et son circuit équivalent (Aribisala, 2013)

La modélisation de la densité de courant fournie par une diode idéale soumise à une rampe de tension, est donnée par l'équation (I.2). Cette caractéristique courant-tension (I-V) représente la qualité du dispositif. Ce modèle se base sur l'utilisation d'un facteur d'idéalité n , ainsi qu'une densité de courant de saturation I_0 pour décrire son fonctionnement.

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \quad (I.2)$$

Où I est le courant qui traverse la diode; I_0 est le courant de saturation de la diode; q est la charge de l'électron ; K est la constante de Boltzmann ($J.K^{-1}$); T est la température absolue en Kelvin; V est la tension appliquée.

Le courant de fuite franchissant la barrière de la tension de diffusion V_D , est indiqué sous la densité de courant de saturation de la diode I_0 . Ce courant est proportionnel aux recombinaisons dans le matériau et/ou en surface, puisqu'il est produit par différents phénomènes de recombinaisons en surface et en volume du dispositif. L'expression du courant de saturation d'une diode idéale, est donnée par l'équation (I.3)

$$I_0 = qA \left(\frac{D_n n_i^2}{L_n N_A} + \frac{D_p n_i^2}{L_p N_D} \right) \quad (I.3)$$

Où A est la surface de section transversale totale éclairée du dispositif; D_n est le coefficient de diffusion des électrons; D_p est le coefficient de diffusion des trous; n_i est la concentration des porteurs intrinsèques (cm^{-6}); L_n est la longueur de diffusion des électrons ; L_p est la longueur de diffusion des électrons.

Les longueurs de diffusion des porteurs minoritaires sont définies comme suit :

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (I.4)$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (I.5)$$

$$I_0 = qA \left(\frac{D_n}{\sqrt{D_n \tau_n}} \frac{n_i^2}{N_A} + \frac{D_p}{\sqrt{D_p \tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} \right) \quad (I.6)$$

τ_n et τ_p sont les constantes de durée de vie de porteurs minoritaires.

Sur la base des équations ci-dessus, le courant de saturation de la diode est largement dépendant de la structure et de matériau utilisé pour la fabrication de la diode (Aribisala, 2013; Desrues, 2009).

I.1.6.2. Cellule solaire idéale

Quand une cellule solaire est éclairée par la lumière du soleil (Figure I.4 ci-dessous), les photons de l'énergie de la lumière incidente est convertie en courant électrique continu à travers le processus de l'effet photovoltaïque de la cellule solaire.

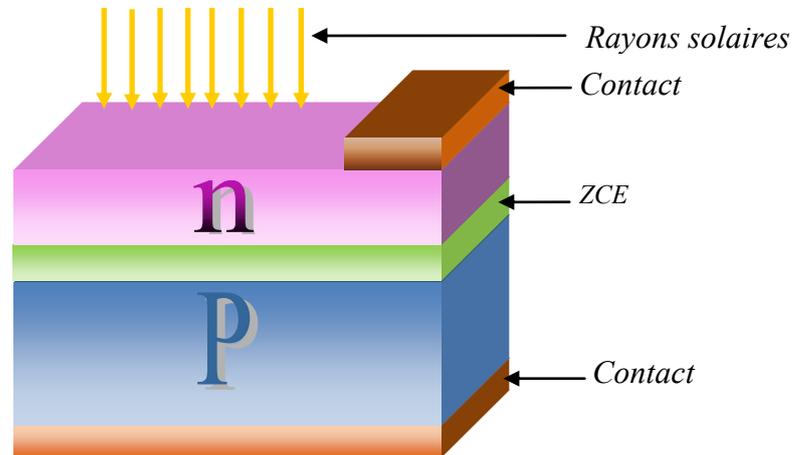


Figure I. 4 Lumière incidente sur une cellule solaire typique PN

La lumière incidente provoque des paires électrons-trous soient générés dans le semi-conducteur qui produit une augmentation de la concentration des porteurs minoritaires, électrons dans la région de type p et des trous dans la région de type n, dans la région de charge d'espace (ZCE). Cette augmentation de la concentration des porteurs minoritaires se traduit par la circulation des porteurs minoritaires de la région ZCE dans les régions quasi-neutre.

Ces porteurs photogénérés provoquent l'écoulement de courant photogénéré I_{ph} . Lorsque la jonction est à l'état de circuit ouvert, aucun courant net peut circuler à l'intérieur de la jonction p-n, donc le courant résultant du flux des porteurs photogénérés et des porteurs thermogénérés est équilibré par le courant de recombinaison inverse (Aribisala, 2013; Desrues, 2009).

Si une charge est connectée entre les électrodes de jonction p-n sous éclairage, une certaine fraction du courant photogénéré circule à travers le circuit externe. La différence de potentiel entre les régions de type n et de type p est abaissée par une chute de tension sur la charge. Par ailleurs la différence de potentiel électrostatique au-dessus de la zone ZCE sera diminuée ce qui entraîne une augmentation du courant de recombinaison (Aribisala, 2013; Desrues, 2009).

En appliquant le théorème de superposition, le courant total net circulant à travers la charge est déterminé comme étant la somme des courants photogénéré et thermique et le courant de recombinaison. Les caractéristiques I-V d'un dispositif idéal peuvent être décrit par l'équation de Shockley avec un terme photo-courant supplémentaire, I_{ph} :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right) \quad (I.7)$$

Où I_{ph} est le courant photogénéré ; I_0 est le courant de saturation de la diode ; q est la charge de l'électron ; K est la constante de Boltzmann ; T est la température en Kelvin ; n est le facteur d'idéalité ; V est la tension appliquée.

En réalité, le courant photogénéré aura une dépendance de la tension appliquée, et l'illumination peut affecter les caractéristiques de la diode.

$$I_{ph} = qGA(L_n + W + L_p) \quad (I.8)$$

Où L_n et L_p sont les longueurs de diffusion de porteurs minoritaires pour électrons et trous respectivement. G est le taux de génération de paires électron-trou de diode, W est la largeur de la zone de charge d'espace ZCE et A est la surface de section transversale totale éclairée du dispositif.

Sur la base de cette équation, on peut en déduire que seuls les porteurs générés dans la région ZCE et dans les régions jusqu'à la longueur de diffusion des porteurs minoritaires à partir de la région ZCE contribue au courant photogénéré.

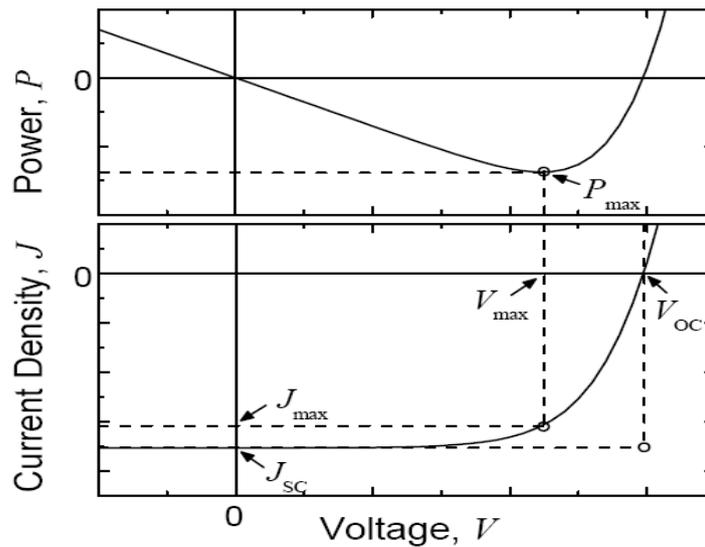


Figure I. 5 Graphiques de puissance et de densité de courant en fonction de la tension pour une cellule solaire (Potsavage, 2011).

Figure I.5, représente la courbe I-V pour une cellule solaire idéale dans la région de production d'électricité. La densité de puissance, le produit de la tension et la densité de courant, fonction de la tension est également tracée, et la puissance négative indique que la production d'énergie. Les paramètres de performance les plus discutés qui peuvent être trouvés à partir de la courbe I-V d'un dispositif sous une source d'éclairage connu sont tension en circuit ouvert (V_{CO}), densité de courant court-circuit (I_{CC}), facteur de forme (FF), et le rendement de conversion de puissance (η).

a) Tension à circuit ouvert

La tension V_{CO} de circuit ouvert est la tension aux bornes de la cellule solaire lorsque $I = 0$, qui est le même que le dispositif étant en circuit ouvert. Étant donné que $I = 0$, et la puissance est le produit du courant et de la tension, aucune puissance ne se produit effectivement à cette tension. Toutefois, la teneur en V_{CO} marque la limite des tensions au cours de laquelle la puissance peut être produite. La tension en circuit ouvert peut également être considérée comme le point où la génération photo-courant et processus actuels sombres compensent.

$$V_{CO} = \frac{K_B T}{q} \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (I.9)$$

b) Courant du court-circuit

Semblable à V_{CO} , la densité de courant court-circuit I_{CC} est la densité de courant lorsque $V = 0$, ce qui est dans les mêmes conditions que les deux électrodes de la cellule étant court-circuité ensemble. Encore une fois, il n'y a pas une puissance produite à ce point, mais le I_{CC} fait marquer le début de la production de puissance. Dans les dispositifs idéaux, le I_{CC} sera le même que la densité de photo-courant I_{ph} (Potsavage, 2011).

En résolvant l'équation (I.9), nous obtenons la caractéristique IV, la courbe courant-tension, indiquée sur la Figure I.6.

Le courant photogénéré et le courant de diode ont donc un sens inverse. Par commodité, nous choisissons la convention d'avoir la valeur du courant photogénéré positive. Pour obtenir cette courbe, nous mettons une cellule sous l'éclairement normalisé, soit constant, soit intermittent en utilisant une lampe à flash, nous mesurons indépendamment le courant et la tension de la cellule, en plaçant à ses bornes une charge électrique variable.

c) Puissance maximale

Alors que les V_{CO} et I_{CC} marquent les limites de la puissance de production dans une cellule solaire, la densité de puissance maximale produite P_{max} se produit à la tension V_{max} et de densité de courant I_{max} où le produit de I et V est à un minimum (ou un maximum en valeur absolue), comme le montre la Figure I.6.

Le point de fonctionnement de la cellule correspond à une valeur maximale du produit courant et tension, ou la puissance de sortie de la cellule est maximale, elle est dessinée par l'aire du rectangle vert sur le graphique de la Figure I.6, elle est donnée par l'équation suivante:

$$P_{max} = I_{max} V_{max} \quad (I.10)$$



Figure I. 6 Caractéristique courant-tension sous éclairage typique d'une cellule solaire.

d) Facteur de forme

En raison du comportement de diode et les résistances supplémentaires et les pertes de recombinaisons, $|I_{max}|$ et V_{max} sont toujours moins de $|I_{CC}|$ et V_{CO} , respectivement. Le facteur de forme FF décrit ces différences et se définit comme suit :

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{CC} V_{CO}} \quad (I.11)$$

FF est une indication de la proximité I_{max} et V_{max} sont les limites de la production d'énergie de I_{CC} et de V_{CO} et aussi l'indication de la netteté de la courbure de la courbe I-V exponentielle qui relie I_{CC} et les V_{CO} .

Depuis FF supérieur est lié à la puissance maximale plus élevée, haut FF est souhaité; Toutefois, le comportement de la diode comme des cellules solaires résultats en FF étant toujours inférieur à un. Les appareils à haute $|I_{CC}|$ et V_{OC} peuvent encore avoir un faible FF,

ce qui suggère que quelque chose doit être fait pour améliorer la qualité de l'appareil (Potsavage, 2011).

e) Rendement de conversion

Le paramètre de performance le plus discuté d'une cellule solaire est le rendement de conversion η et est défini comme le pourcentage de la puissance incidente P_i (puissance lumineuse par unité de surface) qui est convertie en puissance de sortie. Étant donné que le point où la cellule fonctionne sur les changements I-V de courbe en fonction de la charge, la puissance de sortie dépend de la charge. Par souci de cohérence, la puissance maximale de sortie est utilisée pour le calcul de rendement. Sous forme d'équation, le rendement de conversion est écrit :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} \quad (I.12)$$

$$\eta = \frac{I_{max} V_{max}}{P_i} 100 \% \quad (I.13)$$

$$\eta = \frac{FF I_{cc} V_{co}}{P_i} 100 \% \quad (I.14)$$

Cette forme montre clairement que FF, I_{CC} , et de V_{CO} ont tous des effets directs sur η . En outre, la zone utilisée pour calculer I peut affecter η et devrait inclure des zones inactives qui font partie intégrante de la cellule solaire, telles que les réseaux et les interconnexions, lors du calcul de rendement des dispositifs de grande surface ou modules (Potsavage, 2011).

La puissance de rendement de conversion est importante car elle détermine dans quelle mesure l'espace occupé par une cellule solaire est utilisé et quelle surface doit être recouverte de cellules solaires pour produire une quantité de puissance donnée. Depuis les grandes surfaces nécessitent plus de ressources pour couvrir avec des cellules solaires, η supérieur est souvent souhaitable. Cependant, il existe un compromis entre le coût et η pour chaque technologie des cellules solaires qui doivent être équilibrés.

f) Rendement quantique

Le rendement quantique d'une cellule solaire est défini comme étant le rapport entre le nombre de porteurs collectés par la cellule photovoltaïque et le nombre de photons d'une énergie incidente donnée sur la cellule solaire.

Le rendement quantique externe (RQE) d'un dispositif est la fraction de photons incidents transformé en courant et dépend de la longueur d'onde. Une raison de la dépendance à la longueur d'onde est que l'absorption dans les couches actives est une fonction de

longueur d'onde (Potsavage, 2011). Une autre raison, en particulier dans des cellules solaires organiques, est que l'endroit où un photon est absorbé dans un dispositif peut également influencer sur la probabilité des charges résultantes étant collectées ou recombiner et de se perdre.

Les rendements quantiques externes et internes, désignés par $RQE(\lambda)$ et $RQI(\lambda)$ respectivement, sont différents dans le traitement des photons réfléchis à partir de la cellule: pour la valeur de rendement quantique externe, tous les photons empiétant sur la surface cellulaire sont pris en compte. Cependant, la valeur du rendement quantique interne concernent seulement des photons qui ne sont pas réfléchis sont pris en compte. Le rendement quantique est donné en fonction de chaque longueur d'onde ou d'énergie. Si le rendement quantique interne est identifiée, le courant photogénéré total, est donnée par l'équation (I.15) :

$$I_{ph} = q \int_0^{\infty} \varphi(\lambda)(1 - R(\lambda)) RQI(\lambda) d\lambda \quad (I.15)$$

La densité de courant de court-circuit prévu sous une source de lumière peut être estimée à partir de rendement quantique externe RQE et l'irradiance spectrale de la source lumineuse en intégrant le produit de RQE et la densité du flux de photons. Pour le spectre AM1.5 G standard, le calcul est comme suit :

$$I_{CC} = \int_0^{\infty} qRQE(\lambda) \frac{\lambda}{hc} E_{\lambda}^{AM1.5G}(\lambda) d\lambda \quad (I.16)$$

Où $E_{\lambda}^{AM1.5G}$ est l'irradiance spectrale du spectre AM1.5 G, λ est la longueur d'onde, h est la constante de Planck, c est la vitesse de la lumière, q est la charge élémentaire.

Si le RQE a été mesurée à faibles intensités lumineuses, alors ce calcul ne sera pas exact si la densité de courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'irradiance, comme il est prévu pour les appareils idéaux. Sinon, le RQE doit être mesurée avec une source de lumière de polarisation en courant continu qui génère un photo-courant dans le dispositif similaire à ce qui est attendu sous AM1.5 G (Potsavage, 2011).

I.1.6.3. Cellule solaire réelle

Le comportement d'une vraie cellule solaire est dévié de l'idéal à cause de pertes électriques et optiques. L'équation I-V du circuit équivalent (Figure I-7) de la vraie cellule solaire peut être écrite sous la forme de l'équation suivante:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{qV - R_S I}{n_1 K T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{qV - R_S I}{n_2 K T}} - 1 \right) + \frac{V - R_S I}{R_{sh}} \quad (I.17)$$

Avec R_s est la résistance série, correspondant aux pertes par effet Joule, R_{sh} est la résistance shunt, correspondant aux fuites de courant, I_{01} est le courant de génération-recombinaison dans la ZCE, I_{02} est le courant de diffusion dans les zones neutres (zone n et zone p), n_1 et n_2 sont les facteurs d'idéalité des diodes 1 et 2 respectivement.

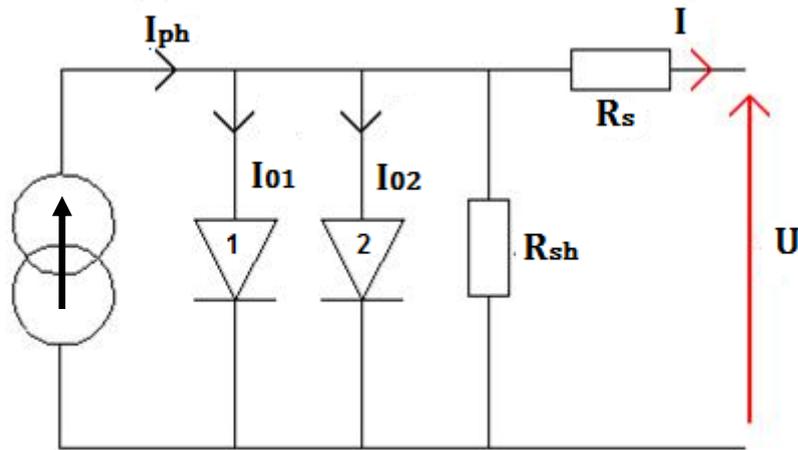


Figure I. 7 Schéma équivalent d'une cellule solaire

La forme de cette équation est appelé (modèle à deux diodes). I_{01} terme et I_{02} représentent les densités du courant de saturation. Le premier terme représente la recombinaison dans la base et l'émetteur de la cellule. Alors que, I_{02} représente la recombinaison dans la région de charge d'espace de la cellule. La cellule solaire réelle (ou circuit) peuvent également contenir des résistances série (R_s) et parallèle (ou shunt, R_p ou R_{sh}).

La résistance série provient de la résistance apparente de la plaquette de silicium, la résistance des contacts métalliques de la surface avant et arrière et des autres résistances du circuit de connexions et les terminaux.

La résistance parallèle est principalement provoquée par des courants de fuite en raison de la jonction p-n non-idéale et des impuretés à proximité de la jonction, qui provoquent un court-circuit partiel de la jonction, en particulier au voisinage des bords des cellules.

Les résistances séries et shunt affectent principalement le facteur de forme et affectent donc le rendement de la cellule solaire.

I.1.7. Facteurs affectant le rendement des cellules solaires

Il existe plusieurs facteurs qui affectent le rendement des cellules solaires. Les plus significatifs sont mentionnés ci-dessous.

I.1.7.1. Réflexion des photons de la surface de la cellule solaire

Le rendement est l'objectif de toute la conception de cellules solaires. Plusieurs facteurs réduisent ce rendement de conversion, c'est pourquoi même les meilleures cellules solaires produisent seulement 30 % de la puissance d'entrée rayonnée sur eux (Chowdhury, 2015).

Si l'angle d'incidence est loin d'être perpendiculaire et le matériau a une surface hautement réfléchissante, alors la cellule solaire peut perdre jusqu'à 36 % de l'énergie. Pour résoudre ce problème, des couches antireflets spéciaux ont été conçues, testés et appliqués à la surface des cellules solaires. A un angle d'incidence perpendiculaire, ces couches antireflets ont montré qu'elles réduisaient la perte due à la réflexion de 5% (Chowdhury, 2015).

I.1.7.2. Photons avec une énergie insuffisante

Le prochain problème à considérer est que tous les photons ont des différentes quantités d'énergie. L'énergie nécessaire pour franchir la bande interdite est spécifique à chaque matériau. Un photon pourrait bombarder un électron, mais il n'a pas assez d'énergie pour faire passer l'électron de la bande de valence à la bande de conduction.

La deuxième question liée à ce fait est que la collision d'un photon moins énergétique avec un électron provoque simplement un échauffement, parce que l'énergie fournie à l'électron est insuffisante pour traverser l'écart de bande de gap. Ceci n'est pas rare, ce qui entraîne une résistance accrue due au chauffage de la cellule solaire entière. Les pertes dues aux effets du chauffage réduisent aussi significativement la production.

I.1.7.3. Photons avec trop d'énergie

Inversement, les photons peuvent transporter trop d'énergie. Lorsqu'un photon surexcité entre en collision avec un électron, ce qui permet à l'électron de traverser l'écart de bande interdite. L'énergie excédentaire non utilisée pour traverser le gap, est dissipée sous forme de chaleur et provoque les mêmes effets de chauffage que le bombardement de photons de faible puissance.

Une autre cause de l'augmentation de la température de la cellule est le phénomène lui-même qui permet aux cellules solaires de générer du courant. Le champ électrostatique de la région de déplétion repousse les porteurs de charge vers les côtés opposés de la cellule, et il se produit une certaine recombinaison interne, ce qui entraîne un échauffement. La température de la cellule est cruciale pour un fonctionnement efficace.

Lorsque la cellule est au-dessus ou au-dessous de sa température de fonctionnement conçue, la vibration de la structure du réseau cristallin interfère avec le mouvement des porteurs de charge à travers la cellule, réduisant ainsi la puissance de sortie.

I.1.7.4. Défauts de fabrication

Lorsque les matériaux semi-conducteurs utilisés pour produire des cellules solaires sont fabriqués, des défauts inévitables et des impuretés sont introduits dans le produit fini.

Ces impuretés et défauts à la structure cristalline provoquent des performances dégradées. Les contacts métalliques de la cellule solaire ont une résistance inhérente qui provoque une perte de puissance de sortie et une augmentation de la température de la cellule.

Ces mêmes contacts et la grille conductrice au-dessus de la cellule solaire ne laissent pas passer la lumière et ont donc un effet d'ombrage. Cet effet d'ombrage réduit la lumière d'entrée à la cellule jusqu'à 8 %.

I.1.7.5. Collisions inefficaces

Les photons sont de minuscules particules, et même si les atomes d'une structure cristalline sont grands par rapport à un photon, ce n'est pas tous les photons qui traversent la cellule solaire bombardent un électron. Certains photons entrent simplement dans la cellule et passent sans communiquer d'énergie. Pour réduire l'effet de ce problème, un réflecteur de surface arrière est ajouté.

Ce réflecteur double la probabilité que le photon incident entre en collision avec un atome de semi-conducteur parce que le photon est réfléchi à travers la cellule solaire après avoir heurté le réflecteur de surface arrière (Chowdhury, 2015).

I.1.8. Mécanismes de perte

La performance théorique d'une cellule solaire d'abord, a été étudiée en détail dans les années 1960, et est aujourd'hui connue sous le nom de limite de Shockley-Queisser (Chowdhury, 2015). La limite décrit plusieurs mécanismes de perte qui sont inhérents à toute conception de cellules solaires.

Les premières sont les pertes dues au rayonnement du corps noir, mécanisme de perte qui affecte tout objet matériel au-dessus du zéro absolu. Dans le cas de cellules solaires à température et pression normales, cette perte représente environ 7% de la puissance. Le second est un effet connu sous le nom de «recombinaison», où les électrons créés par l'effet photoélectrique rencontrent les trous d'électrons laissés par les excitations précédentes.

En silicium, cela représente 10% de la puissance. Lorsque la recombinaison se produit, une petite quantité d'énergie est libérée et l'électron et le trou disparaissent. Cette énergie peut être catégorisée de trois façons, Ces trois processus sont présentés à la figure I.10.

I.1.8.1. Recombinaison bande à bande

Radiatif, ou l'émission d'un photon (lumière), non radiatif, ou l'émission d'un phonon (chaleur), et Auger, ou un transfert d'énergie cinétique à un autre électron libre ou un trou. La recombinaison bande à bande se produit lorsqu'un électron se déplace de la bande de conduction à un trou dans la bande de valence sans changement de moment entre les deux états. Les recombinaisons bande à bande sont typiquement une transition radiative dans des semi-conducteurs à bande interdite directe.

I.1.8.2. Recombinaison de surface

La recombinaison de surface peut avoir un impact majeur à la fois sur le courant de court-circuit et sur la tension en circuit ouvert. Des vitesses de recombinaison élevées à la surface supérieure ont un impact particulièrement néfaste sur le courant de court-circuit puisque la surface supérieure correspond également à la région de génération la plus élevée des porteurs dans la cellule solaire.

L'abaissement de la recombinaison de surface supérieure est typiquement réalisé en réduisant le nombre de liaisons de silicium pendantes à la surface supérieure en utilisant une couche de 'passivation' sur la surface supérieure (couche de fenêtre). La majorité de l'industrie électronique repose sur l'utilisation d'une couche de dioxyde de silicium développée thermiquement pour la passivation de la surface due aux faibles états de défaut à l'interface.

Un effet similaire est utilisé à la surface arrière pour minimiser l'impact de la vitesse de recombinaison de surface arrière, sur la tension et le courant si la surface arrière est plus proche d'une longueur de diffusion à la jonction. Un champ de surface arrière (BSF) (Chowdhury, 2015), consiste à un fort dopage de la région à la surface arrière de la cellule solaire.

L'interface entre la région fortement dopée et la région faiblement dopée se comporte comme une jonction p-n et un champ électrique se forme à l'interface qui introduit une barrière à l'écoulement des porteurs minoritaires vers la surface arrière. La concentration des porteurs minoritaires est ainsi maintenue à des niveaux plus élevés dans la masse du dispositif et le champ de surface arrière, elle a un effet net de passivation de la surface arrière.

I.1.8.3. Recombinaison assistée par piège

La recombinaison assistée par les pièges commence quand un électron arrive dans un piège, ou un niveau d'énergie dans l'intervalle de bande créé par un défaut de structure ou une impureté. Finalement, l'électron prend une deuxième étape et retourne à la bande de valence et se recombine avec un trou. Ce processus est également connu sous le nom de Shockley de recombinaison ('Shockley- Read-Hall', SRH).

I.1.8.4. Recombinaison Auger

La recombinaison Auger nécessite trois particules: au moins un trou et un électron et le troisième peut être un trou ou un électron. Ce type de recombinaison est similaire à la recombinaison bande à bande; Cependant, la troisième particule reçoit l'énergie de la recombinaison.

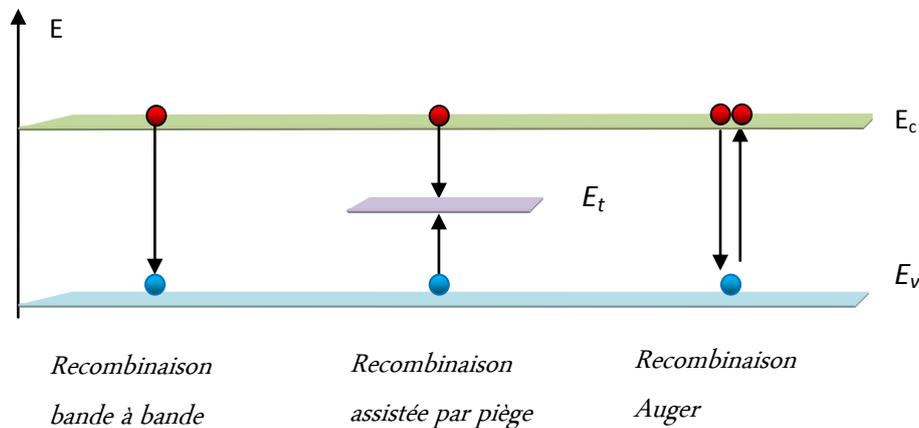


Figure I. 8 Différents processus de recombinaison (Chowdhury, 2015)

Cependant, le mécanisme dominant de perte est l'incapacité d'une cellule solaire pour extraire toute la puissance dans le photon, et le problème associé qu'elle ne peut pas extraire n'importe quelle puissance de tous de certains photons. Cela est dû au fait que les électrons doivent avoir suffisamment d'énergie pour surmonter l'écart de bande de gap du matériau (Chowdhury, 2015).

Si le photon a moins d'énergie que bande de gap, il n'est pas du tout recueilli. Ceci est une considération majeure pour les cellules solaires classiques, qui ne sont pas sensibles à la plupart du spectre infrarouge, bien que cela représente près de la moitié de la puissance provenant du soleil. Inversement, les photons dont l'énergie est supérieure à la bande interdite, par exemple la lumière bleue, éjectent initialement un électron à un état situé au-dessus de la bande de gap, mais cette énergie supplémentaire est perdue par des collisions dans un processus connu sous le nom de relaxation.

Cette énergie perdue se transforme en chaleur dans la cellule, ce qui a pour effet secondaire d'augmenter davantage les pertes de corps noirs (Chowdhury, 2015).

En combinant tous ces facteurs, le rendement maximal pour un matériau à bande de gap unique, comme les cellules de silicium classiques, est d'environ 34%. Autrement dit, 66% de l'énergie du rayonnement solaire frappant la cellule sera perdue. Les préoccupations pratiques réduisent encore davantage ce phénomène, notamment la réflexion sur la face avant ou les terminaux métalliques, avec des cellules modernes de haute qualité à environ 22%.

Les matériaux à des bandes de gap inférieures, également appelés plus étroits, convertissent les plus grandes longueurs d'onde et auront donc une énergie plus faible. Les matériaux à des bandes de gap supérieures convertissent les plus petites longueurs d'onde et auront une énergie plus élevées (Chowdhury, 2015).

Une analyse du spectre AM1.5 montre que le meilleur équilibre est atteint à environ 1,1 eV, dans le proche infrarouge, ce qui se trouve être très proche de bande de gap naturelle de silicium et un certain nombre d'autres semi-conducteurs utiles.

I.2. Technologie photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques se trouvent dans nombreuses formes et tailles. Les formes les plus courantes sont des cercles, des rectangles et des carrés. La taille et la forme d'une cellule photovoltaïque, et le nombre de cellules photovoltaïques nécessaires pour un module photovoltaïque, dépendent du matériau à partir duquel la cellule photovoltaïque est constituée (NEED, 2015).

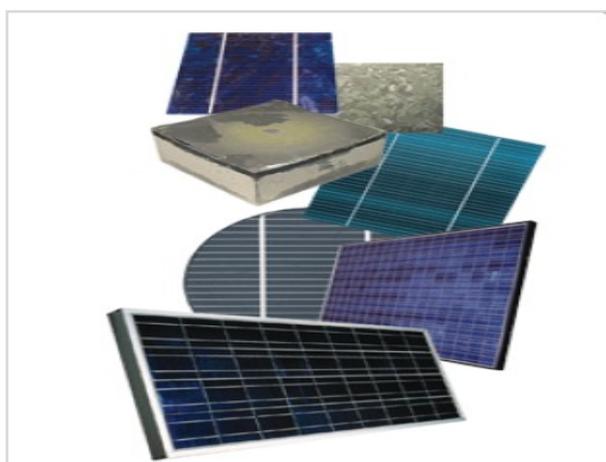


Figure I. 9 Type des cellules photovoltaïques (NEED, 2015)

La majorité des cellules photovoltaïques fabriquées à ce jour, utilisent le silicium fourni par l'industrie de la microélectronique, et c'est dû au fait que la pureté nécessaire pour

produire des cellules silicium de qualité solaire, est moins stricte que celle qui est nécessaire pour l'industrie microélectronique. Les fabricants envisagent maintenant de purifier le silicium eux-mêmes pour une utilisation dans la production de cellules solaires photovoltaïques, vue l'expansion rapide des ventes des cellules solaires photovoltaïques (Miles et al, 2005).

Un large éventail de technologies de cellules photovoltaïques est disponible sur le marché aujourd'hui, en utilisant différents types de matériaux, qui ne cesse pas à se développer et à s'accroître. Les technologies de cellules photovoltaïques sont habituellement classées en trois générations, selon la nature du matériau utilisé, le rendement maximal accessible, et le coût de chaque type (IRENA, 2012). Les recherches sont avancées dans tous ces types, mais les technologies de première génération sont dominantes dans la production commerciale, ce qui représente 89,6% de la production (Azzouzi, 2012).

I.2.1. Photovoltaïques de première génération

Les cellules photovoltaïques de première génération sont constituées de grandes surfaces, de haute qualité et des dispositifs à jonction simple, qui régissent encore le marché solaire aujourd'hui. Ces cellules sont généralement fabriquées à l'aide d'une plaquette de silicium. Elles ont les rendements de conversion les plus élevés. Les dispositifs de silicium à jonction simple approchent du rendement théorique 33, 2% (Azzouzi, 2012).

Ces cellules utilisent la technologie de silicium cristallin à base de tranche (c-Si), soit monocristallin (sc-Si) ou multicristallin (mc-Si). La production de cellules multicristallines occupe une part plus importante du marché mondial. Les tranches monocristallines fournissent des valeurs du rendement plus élevées avec des valeurs de coûts de production plus élevées alors que les plaquettes multicristallines imposent des rendements relativement faibles avec des coûts de production plus faibles (Çiftçinar, 2014). Le silicium cristallin est de loin le matériau le plus utilisé dans l'industrie photovoltaïque. Nous distinguons trois types différents:

I.2.1.1. Silicium cristallin

Des procédés industriels sont utilisés pour obtenir de silicium monocristallin à très haute pureté, tels que le tirage CZ (Czochralski) et la purification par fusion de zone (FZ). Leur produit fini est sous forme de lingots, ensuite ils sont découpés en plaquettes de dimensions de 300 μm (Abdo, 2007). A ce stade là, un inconvénient majeur est la perte importante de matériau, elle peut arriver à 50%.

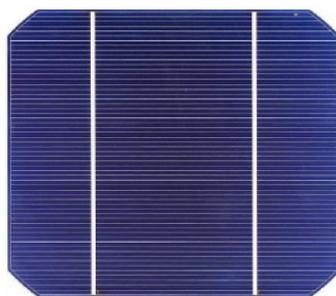


Figure I. 10 Monocristal industriel 156 x156 mm² Cellule solaire (Monga, 2015)

Cette technologie présente des qualités électroniques importantes. Elle permet la fabrication de cellules conventionnelles à haut rendement, il est voisin de 18%, mais elle est très coûteuse. Ce qui limite leur part du marché, elle est d'environ 33,6%. Donc des modules avec un rendement élevé mais leur coût élevé associé à la fabrication de ce type de cellules, reste un frein à leur large diffusion sur le marché (Abdo, 2007).

I.2.1.2. Silicium multicristallin

Compte tenu du fait que le coût des plaquettes a un effet important sur le coût de production global des cellules solaires, l'utilisation de plaquettes de Si multicristallin a été préférée par les fabricants malgré des valeurs du rendement relativement faibles. Les cellules solaires mono-c-Si atteignent des valeurs du rendement autour de 24% alors que les cellules solaires multi-c-Si dépassent 21% (Çiftpinar, 2014).

Le silicium multicristallin est quant à lui fabriqué principalement à partir de sources de matériau moins raffinées ou des rebuts de l'industrie micro-électronique, mais convient à l'industrie photovoltaïque. La majeure partie de ce matériau est produite par des procédés de solidification unidirectionnelle). Il se présente également sous forme de lingots qu'il faut découper (Abdo, 2007).

Les cellules solaires ont des rendements légèrement inférieurs, ils sont d'environ à 15%. Néanmoins le coût de production de ce matériau est le plus faible, en comparaison avec d'autres procédés. Ce matériau contribue aujourd'hui un pourcentage de 55,9% de part de marché et tend à progresser.

Un autre mode de fabrication produit directement des plaques minces de silicium multicristallin d'ordre inférieur à 200 μm , est le silicium en ruban. Il consiste à utiliser un ruban de carbone émergé dans un bain de silicium fondu. Un film de silicium est déposé, en brûlant le carbone des fines plaques de silicium sont obtenues, prêtent à être découpées et subissent des processus en cellules photovoltaïques (Abdo, 2007).

I.2.2. Photovoltaïques de deuxième génération

Contrairement à la structure ordonnée des plaquettes cristallines, les cellules solaires de deuxième génération sont fabriquées sous forme de films minces. Cette génération est beaucoup moins chère à produire que les cellules de première génération. Son faible coût est dû à l'utilisation des matériaux non coûteux (Azzouzi, 2012). Les cellules photovoltaïques de seconde génération sont basées sur des technologies photovoltaïques à couches minces.

Pour ce type de cellules solaires, le matériau actif est déposé sur un verre ou sur un substrat souple par un procédé physique ou chimique en fonction du type de matériau à déposer (Çiftçinar, 2014). Plusieurs semi-conducteurs sont d'excellents candidats pour des cellules solaires en couches minces, tels que le silicium amorphe (a-Si), le silicium micromorphe (a-Si/uc-Si), le cuivre indium gallium diséléniure (CIGS), le tellure de cadmium (CdTe) et le Cuivre-Indium-Sélénium (CIS) (Grau, 2012; IRENA, 2012). Cette technologie offre des coûts de production moins chers mais ne tient pas promesse de rendements plus élevés.

I.2.2.1. Intérêt des couches minces

L'introduction des couches minces dans les technologies photovoltaïques offre plusieurs avantages: premièrement, les matériaux utilisés souvent des semi-conducteurs à bande interdite directe, dont leur coefficient d'absorption est très élevé. Deuxièmement, une faible épaisseur de la couche absorbante (quelques micromètres) est suffisante pour absorber la totalité de la lumière incidente ce qui réduit le coût des matériaux. Troisièmement, en raison de la faible dimension du matériau actif de la cellule solaire, des matériaux rares et coûteux peuvent être utilisés. Quatrièmement, malgré que le rendement de conversion des cellules en couches minces est inférieur aux cellules en silicium cristallin mais leur fabrication est moins coûteuse (Kohen, 2011) à cause des différentes techniques de dépôt sous vide utilisées, ce qui réduit encore les coûts de traitement.

Finalement, la déposition des films minces sur une variété des substrats (substrats flexibles, substrats légers tels que des feuilles polymères, etc.), élargit les domaines d'applications de ces cellules solaires (Zeman et al, 2012).

I.2.2.2. Couches minces en Silicium amorphe

La technologie a-Si domine actuellement le marché du photovoltaïque en couches minces. La déposition du silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), à basse température permet l'utilisation de substrats bas coûts (verre), le procédé employé est le dépôt chimique en phase

vapeur assisté par plasma (PECVD) à partir de gaz de silane et du gaz d'hydrogène. Ce qui encourage son utilisation pour la fabrication de cellules photovoltaïque. En plus, l'épaisseur de la couche est mince (quelques microns suffisent) et grâce à sa pseudo-largeur de bande interdite de 1.7 eV, son absorption est très importante.

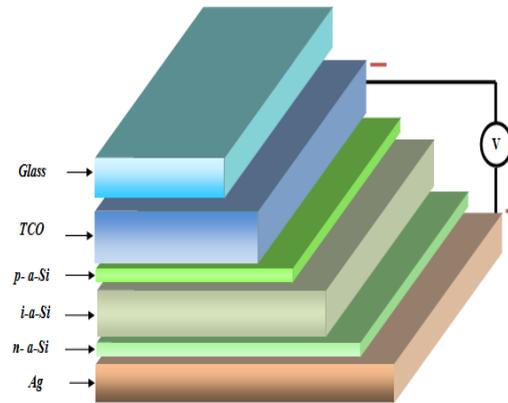


Figure I. 11 Première cellule solaire amorphe a-Si fabriquée en 1974 par David Carlson (Zeman, 2010).

Leurs inconvénients majeurs, sont leur dégradation au cours du temps, dégradation consécutive à la libération de l'hydrogène (Abdo, 2007) et la diminution de la performance par rapport à la durée d'exposition à une irradiation solaire (Zeman et al, 2012).

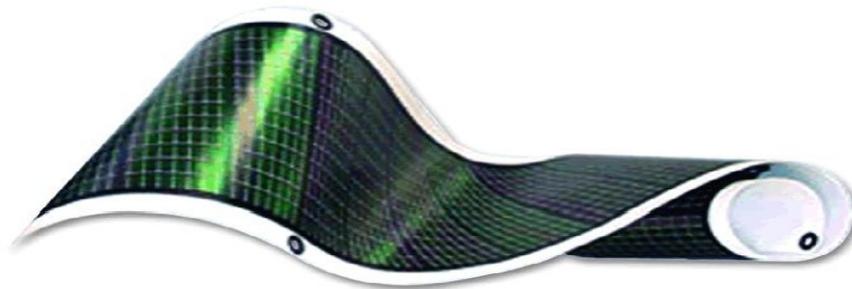


Figure I. 12 Silicium amorphe (Aribisala, 2013)

Cette technologie trouve ses applications en piles solaires en silicium amorphe, elles sont principalement employées pour des biens de consommation tels que les montres, les calculatrices, etc., mais son utilisation dans les cellules solaires ne dépasse pas 4% du marché photovoltaïque (Aribisala, 2013).

I.2.2.3. Micromorphe Silicium

La mise en contact des différents matériaux dont leur énergie de gap est distincte produit des cellules photovoltaïques à hétérojonctions. Les cellules solaires silicium à double jonction ou appelées Micromorphe silicium consiste à mettre en contact le silicium amorphe

hydrogéné (a-Si:H) avec le silicium cristallin (c-Si) pour obtenir des hétérojonctions. L'énergie de gap du silicium amorphe a-Si:H ($1.5 \text{ eV} \leq E_g \leq 1.9 \text{ eV}$), est en effet plus élevée que celle du c-Si (1.12 eV) (Desrues, 2009).

Les cellules solaires à hétérojonction sont connues comme telles en raison de la nature de l'hétérojonction formée entre le substrat de Si cristallin et les couches de Si amorphe. La structure de l'hétérojonction a été conçue pour la première fois en 1983 à l'aide des couches a-Si et de c-Si empilés, et avait un rendement cellulaire de plus de 12%. La structure cellulaire de cette cellule était ITO/n-i-p a-Si/n a-Si/p poly c-Si /Al. Ces cellules présentaient un FF de 65% avec un J_{SC} de $13,4 \text{ mA/cm}^2$. Il avait une large bande interdite (a-Si n-i-p jonction) en haut et une bande interdite étroite (a-Si /poly Si) au fond (Monga, 2015).

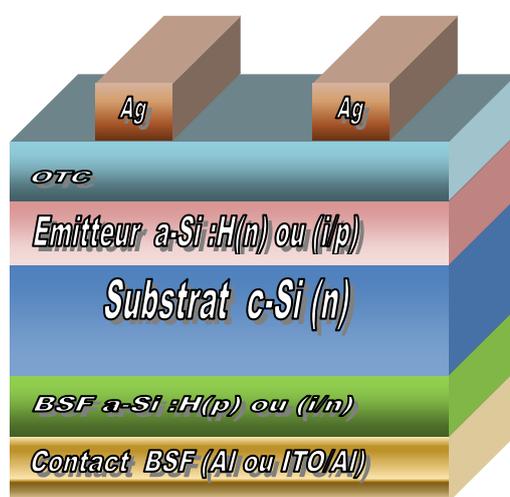


Figure I. 13 structure à hétérojonction a-Si:H/c-Si:H/a-Si:H (Desrues, 2009)

Dans l'industrie, deux autres approches ont été développées. La première utilise l'hétérojonction a-Si:H/c-Si (Si-HJ), tandis que la seconde réalise des structures à contacts en face arrière interdigités (IBC). Ces deux approches, permettent l'obtention de rendements de conversion de 23% sur des substrats de grande taille ($\geq 100 \text{ cm}^2$) (Desrues, 2009).

La combinaison de ces deux structures permet théoriquement d'atteindre des rendements supérieurs à 25 %, sur des substrats de grande taille. Seuls quelques laboratoires ont commencé à s'intéresser à ce sujet depuis l'année 2007. La faisabilité expérimentale des cellules Si-HJ IBC a été prouvée sur des substrats de taille réduite ($\leq 10 \text{ cm}^2$).

Ces dispositifs sont jusqu'à maintenant limités par une valeur de FF faible, particulièrement dans le cas où une couche tampon est utilisée en face arrière (Desrues, 2009).

I.2.2.4. Couches minces en CdTe

Les cellules au CdTe sont à base de tellure de cadmium, matériau intéressant du fait de sa largeur de bande interdite de 1.45 eV et d'une forte absorption, ce qui permet d'atteindre un rendement élevé (16%). Ce matériau est utilisé sous la forme de couche mince polycristalline. Pour constituer une cellule CdTe, une couche de conducteur transparent est déposée sur un substrat de verre, puis une autre couche de CdS (sulfure de cadmium) est déposée de type n, ensuite une troisième couche de CdTe dopé p est déposée. Une structure hétérojonction est constituée. Cependant, son développement a été freiné voir même abandonné entre autres parce que la présence du cadmium, métal lourd, posait un problème environnemental en fin de vie des modules.

I.2.2.5. Couches minces en CIS

Les cellules au CIS (CuInSe_2) sont à base de cuivre, d'indium et de sélénium. On peut aussi constituer des hétérojonctions avec le CIS (CuInSe_2). Comme le CdTe, on utilise ce matériau sur un substrat de CdS de type n. Au-dessus de la couche mince polycristalline dopée p, on dépose une couche de ZnO assez mince pour laisser passer la lumière.

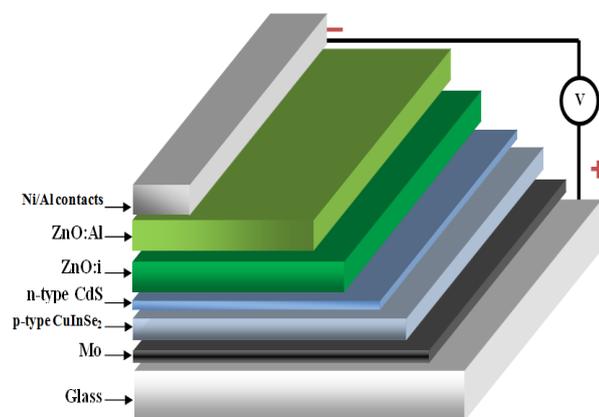


Figure I. 14 Structure typique d'une cellule solaire en CIGS

La largeur de la bande interdite est un peu faible (1eV) mais le coefficient d'absorption est très élevé, ce qui permet d'atteindre des rendements élevés. Le CIS est actuellement le matériau en couches minces le plus prometteur, mais ces cellules ont un inconvénient similaire aux cellules CdTe. Elles utilisent le cadmium dans le substrat, cependant on peut espérer lui trouver un substitut. Sa contribution au marché photovoltaïque est encore faible, puisque inférieure à 1%.

I.2.2.6. Couches minces en CIGS

Le Cu (In_{1-x}Ga_x) Se₂ (CIGS) est considéré comme un idéal matériau d'absorption pour des cellules solaires à couches minces, possédant un intervalle de bande d'énergie directe, le CIGS montre un fort coefficient d'absorption, dont leur rendement de conversion est supérieur à 20%. La structure typique d'une cellule solaire CIGS implique un contact avant, une couche antireflet, une couche de fenêtre, une couche tampon, une couche d'absorption de CIGS, un contact arrière et un substrat (Huang et al, 2014).



Figure I. 15 Cellule solaire en GICA sur un substrat flexible (Çiftpinar, 2014)

Pour franchir les difficultés dans la production massive des cellulaires CIGS, engendrées par les processus sous vide complexes. Ces derniers sont remplacés par des nouveaux processus non-vide, basés sur des impressions de fournir des itinéraires alternatifs prometteurs pour la production massive des cellules CIGS (Huang et al, 2014).

I.2.2.7. Couches minces CZTS

Pour une simple jonction film mince photovoltaïque, les composés semi-conducteurs offrant une forte absorption sont les Cu(INGa)Se₂ et CdTe, démontrant des avancées notables (Yakushev et al., 2014). Mais la haute toxicité (Te, Cd, Se) et l'offre limitée en matière pour la fabrication à grande échelle (In, Ga, Te et Se), poussant la recherche à développer des technologies photovoltaïques à base d'éléments économiques, non-toxiques et abondants.

Le composé Cu₂ZnSnSe₄, dénommé CZTS, spectacles promettent de correspondre à ces exigences. CZTS peuvent être considérées comme une variation sur CuInSe₂, où les atomes In et Ga rares et coûteux sont remplacés par Zn abondante et pas cher et Sn, sur deux sites du réseau In/Ga. Cellules solaires à couches minces fabriquées en utilisant CZTS ont démontré l'efficacité de conversion de plus de 12% (Yakushev et al., 2014).

En raison des coefficients d'absorption élevés des matériaux en couches minces, seules des couches actives d'une épaisseur de quelques microns suffiront à absorber la lumière incidente. Bien que la consommation de matériau soit moins importante que celle des pellicules solaires à couche mince, les valeurs du faible rendement ne peuvent pas rivaliser avec leurs homologues cristallins. En outre, les cellules solaires à couche mince souffrent de problèmes d'instabilité résultant de l'exposition au soleil (Çiftpinar, 2014).

I.2.3. Photovoltaïques de troisième génération

Principalement, les technologies de troisième génération visent à améliorer la mauvaise performance électrique des technologies à couches minces de deuxième génération et de garder les faibles coûts de production.

Les cellules solaires de troisième génération sont fabriquées à partir d'une variété de matériaux nouveaux, y compris le colorant solaire, les concepts à plusieurs jonctions (multijonctions ou tandem), les cellules solaires à base de diverses structures quantiques, les plastiques conducteurs, les encres solaires et aussi les matériaux organiques. Dans toutes ces nouvelles approches, des systèmes à haut rendement et à faible coût sont ciblés (IRENA, 2012; Çiftpinar, 2014).

Des recherches récentes ont marqué des rendements de conversion de 30-40% tout en conservant les matériaux à faible coût et des techniques de fabrication. Afin d'atteindre ces rendements élevés, de nombreux concepts ont étudié dans ces dernières années, comme cellule intermédiaire solaire, tandem cellule solaire et l'effet photovoltaïque d'impureté, etc., (Azzouzi, 2012).

I.2.3.1 Cellule solaire à multijonctions

Une cellule solaire classique à jonction unique est caractérisée par une bande interdite avec une énergie de gap E_g . Quand un photon d'énergie $h\nu$ est incident sur la jonction, si $h\nu$ est plus grand que l'énergie de gap E_g , l'excès d'énergie est perdu en tant que chaleur dans la jonction. D'autre part, si $h\nu$ est inférieur à E_g , la jonction n'absorbe pas le photon et donc ne capture rien de son énergie. D'énergies de 0 à environ 4 eV, le rendement de toute cellule solaire à jonction unique est intrinsèquement limité.

Une façon conceptuellement simple de surmonter cette limitation est de diviser le spectre en plusieurs régions spectrales et de convertir chaque région avec sa propre jonction dont l'intervalle de bande est accordé à cette région (Chowdhury, 2015).

L'écart de la bande interdite des matériaux, superposés les un aux autres, de la cellule supérieure vers la cellule inférieure va être de plus en plus petit. Il absorbe et convertit les photons dont les énergies sont supérieures à la bande interdite de cette couche et inférieures à la bande interdite de la couche supérieure (Chowdhury, 2015). La disponibilité de matériaux avec des bandes de gap optimales qui permettent simultanément un rendement élevé à travers des densités de faible défaut est la limitation fondamentale qui freine les cellules solaires à jonction multiple. De très bons candidats pour résoudre le problème et pour fabriquer de telles cellules à jonction multiple sont des alliages des groupes III et V.

Les cellules solaires à jonction multiple, ou cellules tandem, sont des dispositifs photovoltaïques composés de plusieurs couches de bandes différentes. Le fait d'avoir cette caractéristique permet à ces types de cellules d'être capables de capter une gamme plus élevée de longueurs d'onde lumineuse, ayant par conséquent le potentiel théorique d'atteindre des rendements de conversion élevés de plus de 50%. En raison de l'efficacité élevée et de la grande résistance contre le rayonnement, les cellules solaires multijonctions ont été largement utilisées pour les applications spatiales pendant de nombreuses années (Linck, 2014).

La figure I.16, montre l'idée du procédé de fabrication de cellules solaires inversées à triple jonction InGaP/GaAs/InGaAs. La méthode de croissance utilisée pour les couches cellulaires est CVD métallique organique (MOCVD) sur un substrat de GaAs. Après la croissance complète, le substrat est attaqué par gravure et les couches sont inversées et déposées sur un substrat de silicium par collage métallique. Plus tard, une couche antireflet MgF_2/ZnS est formée sur la cellule solaire avant la métallisation. Cette cellule présente une structure optimisée et des schémas de grille de contact, résultant en une très faible résistance série (Linck, 2014).

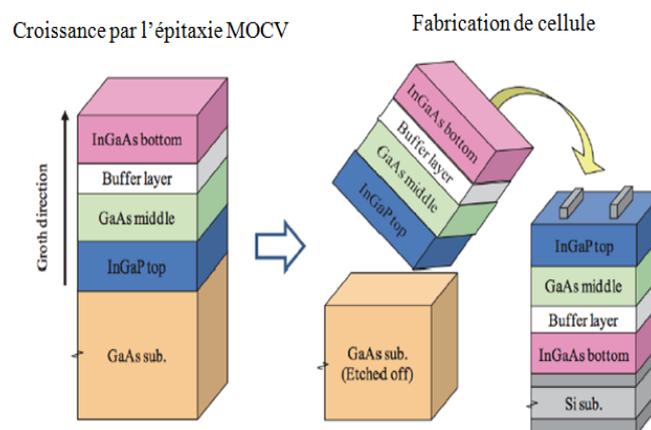


Figure I. 16 Structure schématique de la fabrication (Linck, 2014)

Les cellules solaires fabriquées par des composés semi-conducteurs III-V ont un potentiel d'un rendement élevé, leurs matériaux composés présentent des avantages, des compositions élémentaires à différents bandes de gap, couvrant une large gamme de spectre solaire, une absorption de photons plus élevée grâce à des énergies de bande interdite directe, une plus grande résistivité contre les rayons de haute énergie dans l'espace et une petite dégradation du rendement par la chaleur que les cellules solaires en Si. Et aussi en utilisant des techniques de croissance à haut volume, leurs structures complexes peuvent être crûes avec une qualité cristalline et optoélectronique extrêmement élevée.

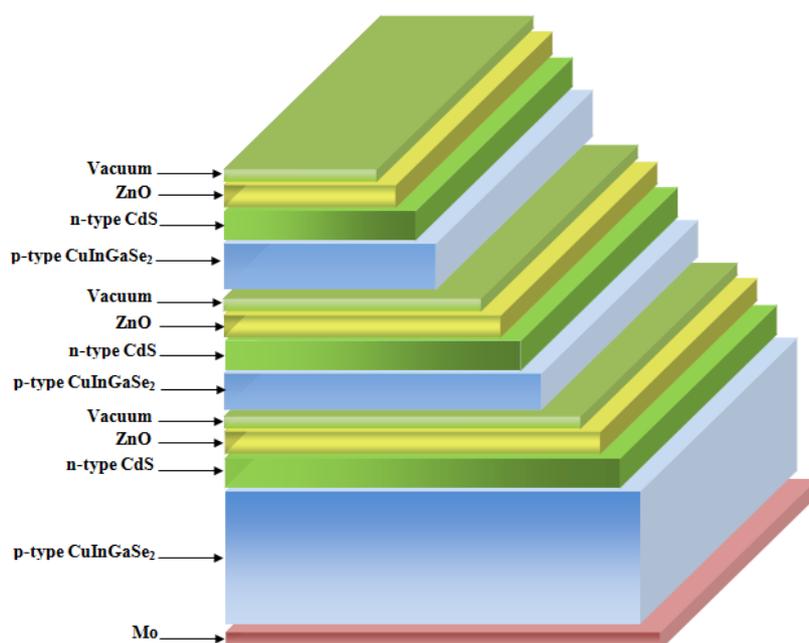


Figure I. 17 Structure typique d'une cellule solaire à triple jonction CIGS

I.2.3.2 Cellules solaires polymères

Une nouvelle technologie photovoltaïque est apparue, est celle de cellule solaire en plastique, elle est basée sur des polymères et des molécules conjuguées. Ces cellules solaires polymères ont attiré une attention considérable au cours des dernières années en raison de leur potentiel de fournir des cellules solaires qui ont une sécurité environnementale, flexible, légère, peu coûteuse et efficace. En particulier, les cellules solaires à hétérojonction en vrac consistant en un mélange d'un polymère donneur conjugué avec un méthano fullerène accepteur sont considérés comme une approche prometteuse (Janssen, 2005; Davies, 2007).



Figure I. 18 Cellule solaire polymère (Davies, 2007)

Au cours des cinq dernières années, il y a eu une énorme augmentation de la compréhension et de la performance des cellules solaires à fullerène en polymère. Des connaissances approfondies ont été obtenues sur des paramètres cruciaux des matériaux en termes de morphologie, de niveaux d'énergie, de transport de charges et de matériaux d'électrodes (Janssen, 2005).

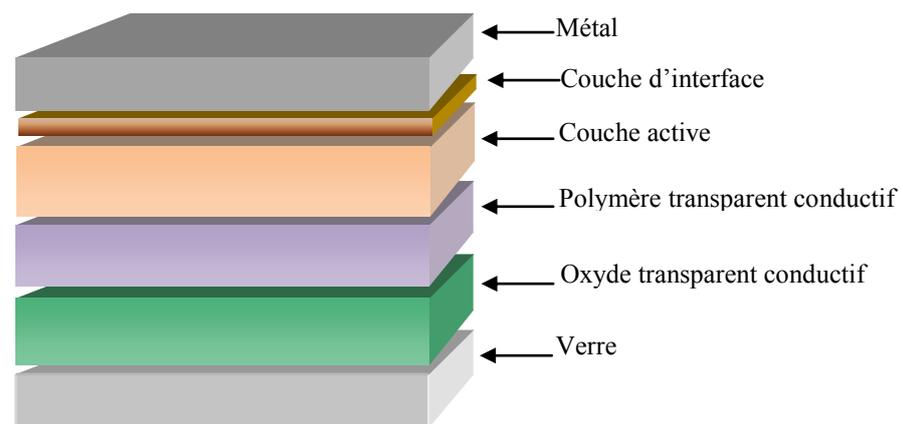


Figure I. 19 Disposition schématique de la structure d'une cellule solaire polymère-fullerène (Janssen, 2005).

À ce jour, des rendements de conversion de puissance proches de 3% sont régulièrement obtenus et certains laboratoires ont rapporté des rendements de conversion de puissance d'environ 4 à 5% et visent maintenant à augmenter le rendement près de 8 à 10%. En combinant la synthèse, le traitement et la science des matériaux avec la physique et la fabrication des dispositifs, il ne fait aucun doute que ces niveaux attrayants de performance seront atteints dans un proche avenir (Janssen, 2005).

I.2.3.3 Cellule solaire à base des nanofils

Le silicium à couche mince est une vaste zone et une alternative économique aux cellules solaires à silicium monocristallin ou multicristallin dominées le marché. Un certain nombre de procédés est été développé pour améliorer l'absorption de lumière dans le silicium cristallin et amorphe, telle que la texture superficielle et la texturation de la couche d'oxyde conducteur transparent tel que $\text{SnO}_2:\text{F}$ et $\text{ZnO}:\text{Al}$. L'invention porte sur des facteurs qui limitent la performance des dispositifs dans ces cellules solaires en silicium à couche mince. Des microstructures et nanostructures, sont introduites pour améliorer l'absorption de la lumière dans le silicium à couche mince (Adachi, 2012).

Au cours des dernières années, un autre procédé alternatif est été étudié pour améliorer encore l'absorption de lumière dans le silicium en couche mince, est l'introduction ou l'incorporation des nanofils semi-conducteurs (Adachi, 2012). Principalement, les nanofils de Silicium considéré comme de bons candidats pour des applications photovoltaïques. L'utilisation du nanofils d silicium comme matériau est une perspective séduisante dans le sens où ce matériau est abondant, peu coûteux, et dispose, de part l'industrie de la microélectronique, d'une large infrastructure et d'un savoir-faire pour sa fabrication et sa manipulation (Puyoo, 2010).

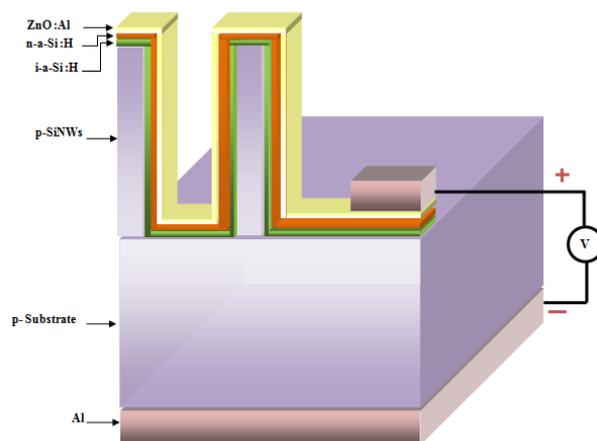


Figure I. 20 Disposition schématique de la structure d'une cellule solaire de silicium à base des nanofils

Dans cette thèse, les nanofils de silicium sont étudiés pour améliorer l'absorption optique dans les cellules solaires en silicium à couche mince. Les nanofils de silicium peuvent être définis comme des nanostructures ayant un rapport d'aspect de longueur-diamètre très élevé avec des diamètres de l'ordre de nanomètres à des centaines de nanomètres.

I.3. Conclusion

Le rendement de conversion des cellules solaires en silicium cristallin est limité par nombreux paramètres, théoriques et technologiques. Il existe différentes manières de surmonter ces limites technologiques.

Les matériaux candidats pour la fabrication de cellule solaire à couches minces de faible coût, sont amorphes Si (a-Si), le CdTe, matériaux de chalcopyrite CuInSe₂ (CIS), et leurs alliages fait en ajoutant Ga ou S. Leur principal inconvénient est la diminution de la performance par rapport à la durée d'exposition à une irradiation solaire. Parmi ces matériaux promoteurs, nous choisissons la technologie à base du silicium en couches minces multijonctions. La technologie basée sur le silicium amorphe en couches minces permet une réduction du coût de production des cellules, mais leurs rendements obtenus sont faibles relativement à ceux obtenus avec le silicium cristallin.

Ce travail examine l'introduction des nanostructures de silicium pour l'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque à couches minces en silicium.

Chapitre II

Matériaux et techniques utilisés pour l'élaboration de la cellule solaire

Chapitre II : Matériaux et techniques utilisés pour l'élaboration de la cellule solaire

Les nanosciences et les nanotechnologies sont deux domaines se réunissant à l'échelle nanométrique, les études et les procédés de fabrication et de manipulation de structures (Boukhicha, 2011; Leprince-wang, 2003). Le matériau semi-conducteur dominant sur l'industrie photovoltaïque actuelle est le silicium. Cette domination est due à son abondance naturelle (il est extrait à partir du sable), sa non-toxicité, la facilité de son usinage et un savoir faire (Adachi, 2012).

En plus, il forme facilement du dioxyde de silicium thermiquement développé, il est stable après l'oxydation, il n'est pas toxique. Son oxyde naturel (SiO_2) présente des excellentes qualités, ses propriétés concernant l'isolation et la passivation sont exploitables. En outre, la technologie de fabrication de dispositifs à base de silicium est mature et bien établie dans l'industrie microélectronique, malgré sa faible absorption du rayonnement dû à son gap indirect (Abdo, 2007; Boukhicha, 2011).

II.1. Matériaux

II.1.1. Semi-conducteur

Les semi-conducteurs ont une importance particulière pour l'électronique car leur conductivité peut être modifiée dynamiquement par l'utilisation d'énergie extérieure comme le champ électrique. Leurs propriétés électriques peuvent être modifiées par l'introduction de dopants, ce qui les rend très polyvalents. La nature des semi-conducteurs en fait la base de l'industrie électronique et optoélectronique moderne. Le semi-conducteur intrinsèque est pur, il possède une bande de valence pleine (BV) et une bande de conduction vide (BC), entre eux un niveau de Fermi (EF) placé au milieu du gap.

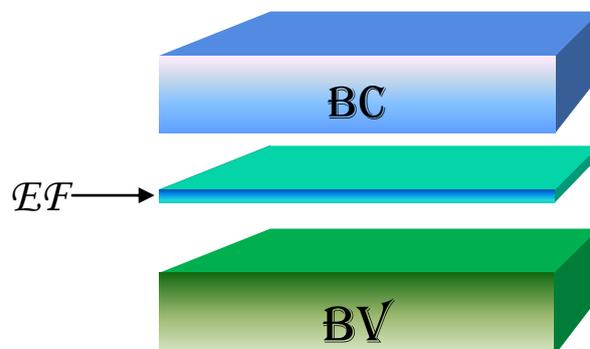


Figure II. 1. Structure d'un semi-conducteur intrinsèque.

II.1.2. Silicium

A l'état pur, le silicium est un semi-conducteur intrinsèque. Il est un solide à la température ambiante. Son nombre atomique est de 14 et le poids atomique est de 28,085. La configuration orbitale d'électrons de Si est $1s^2 2s^2 2p^6 [3s^2 3p^2]$ et de là, sa forme cristalline est un arrangement de type diamant avec un paramètre de maille de 357 pm . L'espacement entre les plans cristallins (111) déterminés par diffraction des rayons X et TEM est d'environ $0,31 \text{ nm}$ (Tahir, 2015).

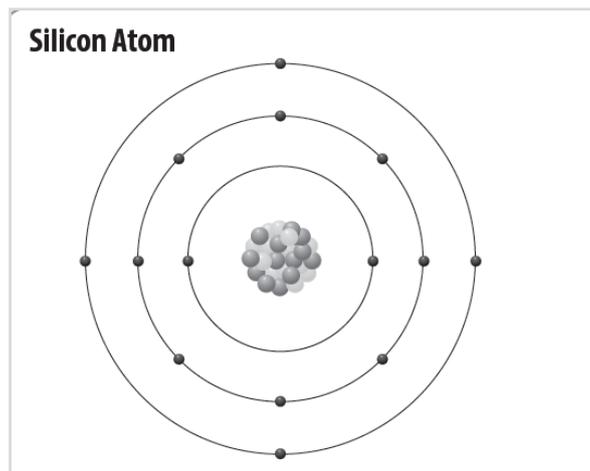


Figure II. 2 L'atome de Silicium (NEED, 2015)

Un cristal de 1 cm^3 de Si est composé de 5×10^{22} atomes. A la température ambiante à 300 K , environ 1.5×10^{10} électrons sont injectés dans la bande de conduction par l'activation thermique. A cette température, la mobilité électronique est de $1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ et elle chute à environ $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ à la présence des donneurs de $10^{19} - 10^{20} / \text{cm}^3$. La mobilité des trous quant à elle, est de $450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, elle chute à $50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ à la présence des accepteurs de $10^{19} - 10^{20} / \text{cm}^3$. Si une concentration d'impuretés passe de 10^{13} cm^{-3} à 10^{19} cm^{-3} , elle influe sur la résistivité du silicium, elle aussi passe de 10^3 cm à 10^{-2} cm . Si est également un élément réactif et peut former des composés tels que SiO_2 , Si_3N_4 et SiC . Si peut conduire l'électricité ainsi que la chaleur.

Si est un élément dit cristallogène, il appartient à la quatorzième colonne du tableau périodique de Mendeleïev. Si cristallise en une structure de type diamant, sa maille élémentaire est cubique à faces centrées avec la moitié des sites tétraédriques occupés (Figure II.3).

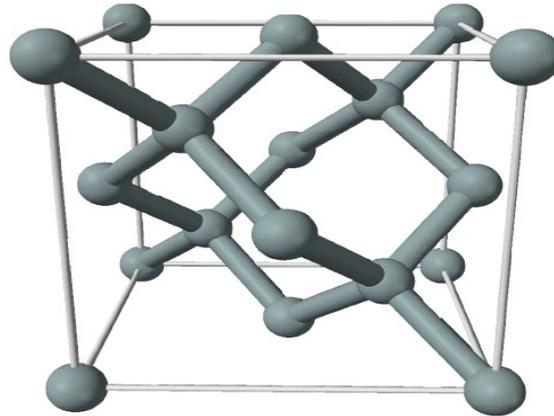


Figure II. 3. Maille élémentaire du cristal de silicium : cubique à faces centrées dont la moitié des sites tétraédriques est occupée.

II.1.2.1. Propriétés électriques du Si

Afin d'établir un courant électrique selon des propriétés de conduction, il est indispensable de posséder des porteurs mobiles. En tenant une BC vide, une BV totalement remplie et aucun état permis dans le gap, la seule possibilité n'est la génération thermique de paires électrons-trous à travers tout le gap du semi-conducteur.

La probabilité de générer une telle paire, avec un gap de 1,1 eV, comparé à kT 25 meV (à 300K), est extrêmement faible. De plus le gap du silicium étant indirect, la génération directe de ces paires est impossible avec une source de lumière. Il est nécessaire de coupler avec les phonons, sa probabilité est encore plus rare. Si à l'état pur, est donc extrêmement résistif à température ambiante.

II.1.2.2. Structure de bande

La structure de bande inspire les propriétés électroniques d'un matériau. Dans Si, la structure de bande des états électroniques est présentée à la figure II.4. Le gap indirect du Si à 300 K est de 1.12 eV.

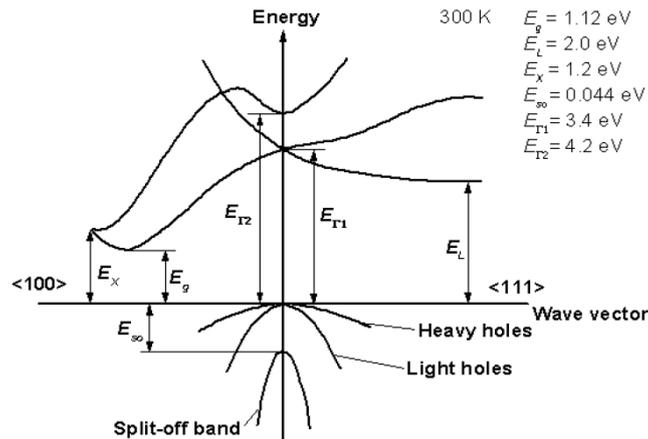


Figure II. 4. Structure de bande du Silicium.

Si est utilisé comme un semi-conducteur, car il a quatre électrons de valence et il ne veut ni perdre ni gagner des électrons. Par conséquent, les électrons circulent à travers elle du côté du bore, du côté de phosphore, sans interférer avec le mouvement du Si.

II.1.2.3. Propriétés mécaniques du silicium

Dans l'industrie des cellules solaires, les propriétés mécaniques du Si sont importantes pour estimer la courbure finale de plaquettes très fines après la formation de contact. Un intérêt supplémentaire pour les propriétés mécaniques du Si et plus précisément pour son comportement post-élastique à des températures très différentes est dû à la technologie de clivage pour la fabrication de fines feuilles de Si.

Si, comme déjà mentionné, cristallise à des pressions communes dans une structure cristalline cubique diamantée. Si est donc un matériau anisotrope dont les propriétés dépendent de son orientation relative au réseau cristallin comme Ainsi qu'une matière orthotrope, i.e. un cristal avec au moins deux plans de symétrie orthogonaux. Si est un matériau fragile à température ambiante, ce qui signifie que son comportement est purement élastique jusqu'à l'échec (Masolin et al., 2012).

II.1.2.4. Dopage du Si

Afin d'éliminer ces contraintes et améliorer la conduction du Si pur, l'existence d'impuretés est indispensable. L'introduction dans le gap, des états accepteurs d'électrons proches de la BV et/ou des états donneurs d'électrons proches de la BC crée des porteurs mobiles.

Dans un Si dopé type p, les accepteurs sont des impuretés capables de capter un électron de la BV et générer un trou. Ce sont les éléments de la colonne III de la table de classification périodique, ayant un électron de valence de moins que Si, exemple Bore (B), Aluminium (AL), Galium (Ga), etc.

Dans Si dopé type n, les donneurs sont des impuretés capables d'injecter un électron dans la BC. Ce sont les éléments de la colonne V de la table de classification périodique, ayant un électron de valence de plus que Si, exemple Phosphore (P), Arsenic (As), etc.

II.1.2.5. Silicium dans le photovoltaïque

L'électronique moderne repose sur Si, tenant compte de son abondance et sa facilité du dopage par des impuretés dans le but d'améliorer ses propriétés électroniques. Si est l'élément chimique le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène en représentant 25.7% de sa masse (Olivier, 2010).

La plupart des modules commerciaux actuellement ont un rendement crête compris entre 13 et 16%, alors que les rendements record dans les laboratoires sont typiquement compris entre 20 et 25 % pour les différents types de matériaux cristallins. Un handicap majeur de ce type de cellules se trouve dans les coûts de fabrication qui restent trop élevés. De ce fait, une cellule photovoltaïque constituée de Si doit fonctionner environ cinq ans pour restituer l'énergie utilisée pour la fabriquer, temps de retour sur investissement énergétique. Il est donc utile de réfléchir à des procédés moins coûteux comme l'utilisation de nouveaux matériaux (Navarro, 2008).

II.1.3. Miniaturisation

La miniaturisation des composantes électroniques a poussé la recherche dans l'axe du développement des meilleurs contrôles de la matière arrivant à l'échelle microscopique (Beaudoin, 2013). L'amélioration des procédés de dépôt et de gravure de couches minces augmente la densité et la performance des composants électroniques. Deux axes principaux doivent se développer parallèlement, la progression dans recherche et le développement des procédés industriels, ce qui facilite et améliore la compréhension et la conception du comportement des matériaux semi-conducteurs.

La miniaturisation représente le passage du micrométrique au nanométrique. A cette échelle, la réponse des porteurs de charges peut parfois modifier par le confinement quantique. Le potentiel de confinement des porteurs indique le classement des nanostructures, soit de points (0D), de fils (1D) et de puits quantiques (2D).

Malgré que chaque structure ait son degré de confinement, la géométrie de ces nanostructures porte d'effets intéressants ou technologiquement avantageux, ce qui fait de nanofils des candidats prometteur.

II.1.4. Nanofils

II.1.4.1. Définition des nanofils

La structure d'un nanofil est cylindrique pleine unidimensionnelle, elle est mille fois plus fine qu'un cheveu. Son diamètre est submicronique, sa longueur est de quelques microns, elle n'est pas limitée. Son intérêt porté a connu une progression importante et s'est beaucoup développé. Parmi les propriétés remarquables des nanofils, les propriétés quantiques, les propriétés surface/volume et les propriétés de relaxation, de transport et de confinement électronique ou optique (Beaudoin, 2013; Boukhicha, 2011). La diversité des types de nanofils pousse la variation et l'évolution des méthodes de fabrication. Ces dernières sont limitées et liées aux avantages et aux inconvénients des différents outils disponibles dans l'industrie (Leprince-wang, 2003).

Les premiers nanofils ont été découvert en 1964 en utilisant la procédure décroissance par dépôt chimique en phase vapeur (CVD), de Silicium à partir d'agrégats d'or. Les nanofils obtenus sont d'ordre micromètre et connus sous le nom de 'WHISKERS' (Boukhicha, 2011).

II.1.4.2. Intérêts des nanofils

Les nanofils, comme les nanostructures en général, présentent l'avantage d'être des systèmes physiques nouveaux par rapport aux cristaux volumiques. Ce sont des systèmes où la symétrie de translation infinie du cristal n'est pas respectée ce qui permet aux chercheurs de vérifier le comportement de la matière sans cette hypothèse centrale de la physique des cristaux.

II.1.4.3. Type des nanofils

Le diamètre des nanofils synthétisés peut varier de quelques nanomètres à environ 100 nm. Il existe de nombreux types de nanofils tels que les nanofils métalliques (Ni, Pt, Au, etc.), les semi-conducteurs (Si, InP, GaN, etc.) et les isolants (SiO₂, TiO₂, etc.). Il y a aussi des nanofils moléculaires organiques dans lesquels se produisent des molécules répétées qui sont électriquement conductrices telles que la classe des polymères conjugués (Tahir, 2015).

II.1.4.4. Applications des nanofils

Les nanofils semi-conducteurs sont généralement synthétisés à l'aide de techniques de dépôt chimique en phase vapeur et d'ablation laser. La propriété unique des nanofils est leur diamètre qui offre une opportunité pour les applications et la réalisation des caractéristiques de transport quantique (Tahir, 2015). Il existe de nombreuses études de transport électroniques sur les nanofils semi-conducteurs et les dispositifs à base de nanofils tels que les FET, les lasers, les onduleurs, les photodétecteurs, les nanocapteurs, les diodes électroluminescentes, le décodeur, la mémoire non volatile, la logique programmable et les cellules solaires. Particulièrement, les nanofils de silicium ont reçu une attention importante en tant que capteurs biologiques et chimiques, et comme dispositifs thermoélectriques, photovoltaïques, et nanoélectroniques (Huang, 2012).

II.1.4.5. Synthèse des nanofils

L'élaboration des nanofils est faite par plusieurs moyens technologiques. Dans la microélectronique classique, deux approches fondamentales peuvent être envisagées pour l'obtention de nanofils de silicium cristallin, l'approche ascendante (bottom-up) et l'approche descendante (top-down) (Dick, 2007; Joyce, 2009; Olivier, 2010; Li, 2011; Beaudoin, 2013).

a) Approche ascendante

Elle consiste à assembler des composants individuels tels que des atomes, des molécules et des agrégats pour former des structures plus complexes par synthèse. Elle se repose sur des phénomènes d'auto-assemblage ou d'auto-organisation par l'utilisation de surface à modeler. La méthode ascendante, implique la synthèse chimique de nanofils dont les propriétés peuvent être soigneusement contrôlés et réglés pendant la croissance. Cette méthode permet la croissance d'un nanofil sur un substrat (Dhalluin, 2009; Olivier, 2010). Ces nanofils eux-mêmes sont des blocs de construction, qui peuvent ensuite être assemblés en dispositifs et architectures nanoscopiques plus complexes (Joyce, 2009). Historiquement, c'était la première utilisée pour la synthèse des fils cristallins.

Ce paradigme de bas en haut offre des possibilités pour la fabrication de dispositifs complexes, plus précis, qui ne sont pas possibles avec les technologies descendantes conventionnelles. Par conséquent, ce paradigme devrait conduire la prochaine génération d'électronique nanostructure (Joyce, 2009). Par cette méthode, des composants de taille nanométrique plus petits et à moindre coût sont produits en partant de briques de base atomiques ou presque.

Néanmoins les problèmes technologiques et scientifiques liés à cette méthode, sont très importants et quelques procédés ne dépassent pas l'étape expérimentale (Oehler, 2007).

b) Approche descendante

C'est la méthode conceptuellement la plus simple et la plus utilisée en microélectronique, elle procède par cycles successifs des techniques de dépôt, lithographie et gravure, elle consiste à déposer un empilement de matériaux puis le graver directement dans un massif, selon le motif désiré. La position des nanofils est bien contrôlée sur le substrat (Oehler, 2007; Beaudoin, 2013).

La procédure consiste à définir un motif de nanofil dans une résine électrosensible à l'aide d'un microscope électronique (lithographie optique, électronique, champ proche, ou par nano-impression) pour former un masque de gravure, de retirer la partie de la résine définissant le motif, de déposer le matériau désiré, le motif est ensuite transféré par gravure dans un substrat pour former des nanostructures. Et finalement, de soulever la résine restante.

Lithographique est utilisée comme une étape préliminaire pour définir, après le dépôt et le retrait de la résine d'un masque dur formé à partir d'un ensemble de tampons. La gravure du substrat donne la production de nanofils verticales (Oehler, 2007). La finesse des masques de gravure et les procédés optiques de projection permet le contrôle de la taille des structures. En outre, le processus est intrinsèquement coûteux et il y a de grands défis à surmonter avant que ces technologies deviennent à haut débit, des moyens rentables de nanofil fabrication. Dans notre cas, l'approche descendante est utilisée.

La création d'un ensemble des nanofils verticaux peut être faite par deux méthodes ou synthèses de gravure une physique et l'autre chimique. La gravure physique, comme nous avons vu précédemment, permet de créer des nanofils selon un motif bien défini par l'électrolithographie. La gravure chimique, quant à elle, permet de produire des nanofils par l'utilisation d'un métal catalyseur. La densité des nanofils est grande mais leur emplacement n'est pas contrôlé. Par contre, si l'endroit ou la position de catalyseur est bien défini par un motif, le contrôle de la taille et d'emplacement des nanofils produits devient possible. Ces nanofils obtenus sont positionnés avec précision et sa forme est uniforme sur la surface d'un substrat (Beaudoin, 2013).

Les techniques de lithographie et de gravure sont limitées en résolution, ce qui rend difficile la définition de caractéristiques plus petites et la qualité des nanostructures diminue (Joyce, 2009).

II.1.5. Nanofils de silicium

II.1.5.1. Définition des NFSi

Parmi les nanofils fabriqués, les nanofils de silicium présentent des différents avantages et se sont des objets très prometteurs. En effet, l'industrie de silicium est très avancée de point de vue des procédés de fabrication telle que la gravure, ce matériau bénéficie de plusieurs facilités:

- Les nanofils de silicium reçoivent tout un savoir-faire technique acquis des procédés silicium usuels ;
- La croissance des nanofils repose sur un matériel conforme dans l'industrie microélectronique ;
- La possibilité d'utilisation à grande échelle ;
- L'éventualité de l'incorporation dans les chaînes de production existantes.

Un procédé de fabrication standard, est utilisé pour la synthèse des nanofils de silicium, est le dépôt chimique en phase vapeur, est basé sur des dépôts industriels de couches minces (Oehler, 2007).

II.1.5.2. Croissance des nanofils

Parmi les méthodes ascendantes qui permettent la fabrication des nanofils de silicium, trois principaux modes de croissance des nanofils sont utilisés à savoir le mode VLS (Vapeur-Liquide-Solide), le mode VSS (Vapeur-Solide-Solide) et le mode SLS (Solide-Liquide-Solide) (Lehoucq, 2010; Boukhicha, 2011).

a) Croissance VLS (Vapeur-Liquide-Solide)

- Définition

Le principe de la croissance de monocristaux selon la méthode VLS n'est pas récent, il a été étudié au cours des années soixante (Li, 2011). Ce mécanisme de croissance a été interprété pour la première fois par Ellis et Wagner et revu par la suite par Wagner et Givargizov (Boukhicha, 2011; Li, 2011).

Le point essentiel dans le mécanisme de croissance VLS est le fait que la goutte forme un alliage liquide à la température de croissance généralement supérieure à celle de l'eutectique (Boukhicha, 2011). Ce procédé permet de contrôler le diamètre, la position et la direction de croissance des nanofils.

Il convient de mentionner ici que d'autres mécanismes de croissance analogues à la VLS ont été développés, tels que le solide vapeur solide (VSS), la solution-liquide-solide (SLS) et le supercritique fluides-liquide-solides (SFSL) (Zardo, 2010). Le processus VLS comprend trois étapes différentes qui peuvent déterminer le taux de croissance :

1. L'étape d'incorporation: l'incorporation sélective des espèces à faire croître depuis la phase vapeur dans la goutte métallique, les molécules précurseurs sont fissurées à la surface du catalyseur et les éléments de composition de nanofil sont incorporés dans la gouttelette avec une vitesse dite d'incorporation (atomes/s);
2. L'étape de diffusion: la diffusion de ces espèces à travers et sur la surface de la goutte, les éléments diffusent par la goutte à l'interface de goutte de nanofil;
3. L'étape de cristallisation: la cristallisation à l'interface entre la goutte et le substrat. Les éléments cristallisent à l'interface liquide-solide et forment le nanofil avec une vitesse dite de cristallisation (atomes/s).

Les observations expérimentales apparemment contradictoires peuvent être expliquées de manière cohérente en supposant qu'il ne s'agit pas d'une seule étape qui détermine le taux de croissance, mais de l'interaction de la vitesse d'incorporation et de cristallisation à des conditions d'équilibre (Zardo, 2010).

- Mécanisme de croissance des NFSi

Son nom découle du fait que le silicium est introduit sous forme gazeuse (en général le silane SiH_4), avant d'être décomposé catalytiquement pour passer en phase liquide dans un alliage et finalement précipiter pour former un nanofil monocristallin (Lehoucq, 2010). Le mécanisme de croissance de nanofils de silicium catalysée par de l'or est présenté à la figure II.5 Le catalyseur est d'abord chauffé au-dessus de la température eutectique du système or/silicium, il forme des gouttes (clusters).

Le gaz réactif (le silane SiH_4) est alors apporté, il se décompose à la surface de la goutte. Par la présence continue de ce gaz, la concentration en silicium dans la goutte augmente jusqu'à atteindre le seuil de saturation.

Lorsque celui-ci est atteint, il y a précipitation du silicium à l'interface goutte/substrat, ce qui conduit à la nucléation du silicium solide. La croissance du nanofil continue ensuite à l'interface solide-liquide (Lehoucq, 2010).

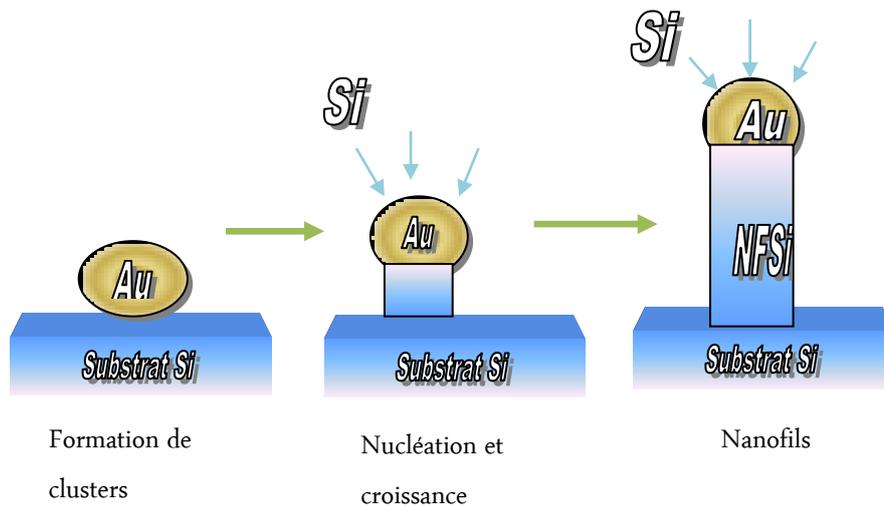


Figure II. 5 Principe de la croissance VLS (Lehoucq, 2010)

L'existence d'un catalyseur métallique tel que l'or, encourage sélectivement une cinétique de dissolution des espèces dans la goutte. Autrement dit, le silane se décompose sans la présence de la goutte d'or mais avec une cinétique de dissolution lente, l'ajout de goutte d'or accélère cette cinétique (Boukhicha, 2011) .

b) Croissance VSS (Vapeur-Solide-Solide)

Le mécanisme vapeur-solide-solide a récemment été proposé pour expliquer la température de croissance des nanofils de Si catalysés par Ti sous le point eutectique du catalyseur et de l'alliage de composant de nanofil. Ce mécanisme est similaire au mécanisme VLS sauf que le catalyseur est en phase solide pendant la croissance du nanofil (Zhang, 2015). Généralement, l'explication du processus de croissance des nanofils par la présence d'un catalyseur métallique est plus facile par le mécanisme VLS.

c) Croissance SLS (Solide-Liquide-Solide)

Ce mécanisme de croissance dit Solide-Liquide-Solide SLS, est caractérisé par l'absence de gaz précurseur pour l'espèce à faire croître. Dans l'exemple de croissance des nanofils de Si, la diffusion des atomes de Si à haute température à partir du substrat du silicium jusqu'à l'arrivée au alliage Au-Si. Ces atomes de Si répartissent à l'intérieur de la goutte, une fois la sursaturation est aboutie, la cristallisation des nanofils débute. Dans ce cas de mécanisme, seul le substrat qui fournit le silicium (Boukhicha, 2011).

II.1.5.3. Direction de croissance des nanofils

Le contrôle du diamètre et de la position des nanofils est essentiel pour toute application technologique. A cet égard, la cristallographie des nanofils est un paramètre important.

Les propriétés optiques, électriques et mécaniques des nanofils devraient dépendre de la direction de croissance, des plans cristallins des facettes latérales et de la qualité cristalline. En conséquence, le contrôle de la direction de croissance des nanofils implique la possibilité d'ajuster leurs propriétés (Zardo, 2010).

Bien que différents facteurs soient pertinents pour déterminer la direction de croissance, la minimisation de l'énergie libre totale joue le rôle clé. A cet égard, le paramètre crucial est le diamètre du nanofil. La croissance des nanofils a lieu à l'interface liquide-solide sous la goutte de catalyseur, où peu de couches d'atomes sont à l'état fondu (Zardo, 2010).

II.1.5.4. Dopage des NFSi

Le silicium intrinsèque est un semi-conducteur à large bande interdite. Le dopage peut réduire la bande interdite. Le dopage de SiNFs pour fabriquer des matériaux de type n et de type p est crucial pour la fabrication de dispositifs et de technologies électroniques nanoscopiques pratiques. La fabrication est possible, des jonctions p-n, un transistor bipolaire et des onduleurs complémentaires sur des SiNFs par dopage sélectif de diverses régions des nanofils (Tahir, 2015).

La caractérisation des nanofils de Si comme des NFSi de type n ou de type p est faite par des techniques de mesure de transport électronique. Une grande importance est donnée à la recherche sur Si à base des nanomatériaux en 1998 dès la synthèse des nanofils de diamètres inférieurs à 20 nm et de longueurs supérieurs à 1 μ m par la méthode d'ablation laser. La recherche des dispositifs à base des nanofils de Si était accélérée par le premier rapport sur les transistors à effet de champs basé sur les nanofils de Si en 2004.

Les études théoriques et expérimentales sur le transport présentées dans la littérature ont principalement porté sur les propriétés électroniques étudiées des SiNFs telles que l'écart entre les bandes, la division de la vallée et les masses efficaces en tant que fonctions de la dimension du fil.

II.1.5.5. Propriétés des NFSi

a) Propriétés électroniques des NFSi

Les nanofils semi-conducteur ont des propriétés uniques telles que l'effet de confinement quantique, la sensibilité de surface et les faibles courants de fuite. Le diamètre, la longueur, la direction de croissance, la composition chimique et le niveau de dopage des

nanofils influencent les propriétés des nanofils et des dispositifs fabriqués à partir de ces nanofils.

Les NFSi comme tout autre type de nanofils sont des fils quantiques, montrant des effets de confinement quantique. Dans les NFSi, le confinement quantique affecte la masse efficace des porteurs et le gap. L'étendue de l'effet du confinement quantique dépend de la terminaison de surface des nanofils (Tahir, 2015).

Les propriétés électroniques des NFSi dépendent de la direction de croissance, de la morphologie, de la taille et de la fonctionnalisation de surface. Les petites tailles de NFSi rendent leurs propriétés électroniques et électriques fortement dépendantes de la direction de croissance, de la taille, de la morphologie et de la reconstruction de surface (Hasan et al, 2013).

Le diamètre des NFSi et l'écart de bande des NFSi, sont inversement proportionnel, lorsque le diamètre diminue, l'écart de bande augmente et se dévie. Les nanofils de petit diamètre présentent une propriété de confinement quantique. D'autres phénomènes sont éventuellement observables comme la résistance différentielle négative, la magnétorésistance linéaire ainsi que l'oscillation de conductance due à l'interférence quantique (Tahir, 2015).

b) Propriétés optiques des NFSi

Il est remarquable cependant que la croissance des nanofils le long de la plupart des orientations cristallographiques présente un écart de bande direct, ce qui signifie que le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction se produisent au même point dans l'espace k . Cette propriété a permis d'envisager l'utilisation des NFSi comme matériaux optiquement actifs pour des applications photoniques.

La possibilité de contrôler la largeur de la bande interdite est extrêmement intéressante pour les applications optoélectroniques, non seulement les NFSi peuvent avoir une bande interdite directe, ce qui augmente l'efficacité optique, mais sa largeur peut en principe être réglée (Hasan et al, 2013).

c) Dopage du nanofils du silicium

Les propriétés électroniques sont modifiées par l'addition d'impuretés ou de dopants. Les éléments externes tels que le bore et le phosphore peuvent changer la conductivité des NFSi. L'addition d'impuretés pentavalentes comme le phosphore, l'arsenic et l'antimoine donne des nanofils semi-conducteurs de type n dans lesquels les électrons sont les porteurs de

charge majoritaires tandis que l'addition de bore (une impureté trivalente) conduit à un semi-conducteur de type p dans lequel les trous sont des porteurs de charge majoritaires (Aslan, 2015).

La concentration du dopant peut être déterminée par des mesures à quatre sondes. Habituellement, le dopant doit être incorporé par substitution dans le réseau de Si par l'implantation ionique. Le dopage des nanofils de Si peut également se produire en raison de catalyseurs métalliques pendant la croissance des nanofils par ablation laser ou méthode CVD utilisant des catalyseurs. Le niveau de dopage détermine la densité d'états dans les nanofils. La concentration de Dopant modifie également la mobilité de la masse de Si de sorte que la mobilité des trous et des électrons diminue à mesure que l'augmentation de la concentration des impuretés, en raison des atomes d'impuretés ionisés agissent comme des centres de diffusion pour les porteurs de charge (Aslan, 2015).

d) Propriétés mécaniques de NFSi

Les comportements mécaniques des nanofils semi-conducteurs sont difficiles à déterminer en raison de la taille. Mais les propriétés mécaniques des nanofils semi-conducteurs dans le dispositif sont importantes puisque les électrodes de contact qui fournissent le courant aux nanofils changent la température donc les nanofils sont soumis à l'expansion ou quand la mesure est effectuée à basse température, les nanofils sont soumis à la contrainte.

Les changements de contraintes changent la conductivité électrique des NFSi, puisqu'ils peuvent générer une dislocation à l'intérieur du nanofil. Le niveau de contrainte dans le nanofil doit donc être déterminé. A partir des mesures de contraintes, la détermination du module de Young est possible, qui est défini comme le rapport de la contrainte sur la contrainte (Tahir, 2015).

II.1.6 Couche d'absorbeur

Outre les faibles coûts de production et l'utilisation de matières premières abondantes, les cellules solaires à couche mince à base de silicium ont l'avantage d'être construites comme des dispositifs multifonctions comme les cellules solaires en tandem ou à triple jonction. Dans une configuration en tandem basée sur la technologie micromorphe (Si amorphe et Si microcristallin), les rendements stabilisés dépassent 12% (Maydell et al., 2014).

Par contre, le rendement est de 13,4% d'une cellule solaire reposant sur une technologie à triple jonction constituée de couches absorbantes amorphes et microcristallines.

Un inconvénient de la technologie est l'épaisseur d'absorbeur de cellule inférieure (Bottom cell) relativement importante. Une façon de surmonter ce problème, est d'introduire l'utilisation d'alliages microcristallins hydrogénés de SiGe ($\mu\text{c-SiGe:H}$) qui pourraient être favorables en raison d'une absorption plus élevée de la lumière incidente (Maydell et al., 2014).

II.1.7 Oxyde métallique

La synthèse et l'application de nanostructures dans les cellules solaires ont attiré beaucoup d'attention. Les réseaux de nanofils d'oxyde métallique avec une grande superficie et une courte longueur de diffusion pour les porteurs minoritaires représentent une nouvelle classe de matériaux photoélectrodes qui sont très prometteurs pour les applications photovoltaïques.

Diverses nanostructures d'oxyde métallique telles que TiO_2 , ZnO , Fe_2O_3 , ZrO_2 , Nb_2O_5 , Al_2O_3 et CeO_2 ont été utilisées avec succès comme photoélectrodes dans des semi-conducteurs (Peng et al., 2011). Parmi ces nanostructures d'oxyde métallique, deux meilleurs candidats en photoélectrode utilisés dans les semi-conducteurs, ce sont le TiO_2 et le ZnO , l'avantage offert par l'augmentation de la surface spécifique du nanofil est compromis par l'efficacité de la collecte des charges par l'électrode.

Dans notre travail, nous avons choisi l'oxyde de zinc, car comparé au TiO_2 , le ZnO présente une mobilité électronique plus élevée avec de bande de gap et des énergies de bande de conduction similaires. ZnO est un semi-conducteur à large bande interdite directe ($E_g = 3,4$ eV) avec une grande énergie de liaison d'excitons (~ 60 meV), ce qui le fait un candidat prometteur pour les appareils luminescents et laser à température ambiante stable.

Par conséquent, les nanofils de ZnO sont des candidats alternatifs pour des semi-conducteurs de haut rendement.

Le dopage ou le traitement thermique affecte les propriétés électriques, optiques et structurales des ZnO . Le dopage de ZnO est employé pour porter une amélioration de ces propriétés électriques et optiques, ou nombreux éléments sont utilisés pour doper ZnO , tels qu'Al, Ga et In, etc. Des recherches sont menées sur d'autres types de dopage tel qu'au fluor mais aussi au bore ou encore au lithium. Tous les dopages cités ci-dessus affermissent le type n des oxydes transparents conducteurs semi-conducteurs.

Des nombreux travaux ont décrit le dopage du ZnO par l'aluminium. La préparation des couches minces de ZnO par la méthode de pulvérisation ensuite les dopées par Al.

La résistivité de ces couches est comprise entre $1,4 \times 10^{-3}$ et $1,9 \times 10^{-4}$ Ωcm . En effet, un niveau de dopant est créé sous la bande de conduction et l'augmentation du dopage engendre une bande d'énergie chevauchant cette bande. En conséquence, l'augmentation de la conduction par dopage est due au fait qu'un grand nombre d'électrons participent à la conduction (Dahou, 2011).

II.1.8 Couches antireflet

La réduction de la réflectance de surface avant d'une cellule solaire en silicium cristallin présente une possibilité d'amélioration du rendement de la cellule. Un revêtement antireflet est appliqué pour minimiser la réflectance de surface. Plusieurs matériaux avec des indices de réfraction compris entre 1,4 et 2,7 peuvent être utilisés comme revêtement antireflet sur les cellules solaires en silicium.

Le dioxyde de titane a été le choix industriel pour les revêtements antireflets. Actuellement, le nitrure de silicium déposé par dépôt chimique en phase vapeur amélioré par plasma est le revêtement anti-réfléchissant dominant pour les cellules solaires en silicium, en raison de son indice de réfraction optimal et un avantage supplémentaire des propriétés de passivation en masse (Xakalashé et al., 2011).

Des matériaux composés apparaissent et attirent l'attention dans nombreux de recherches, sous forme des couches minces, ce sont les oxynitrides de silicium (SiO_xN_y). Ces matériaux produits à partir de l'oxyde de silicium SiO_2 et le nitrure de silicium Si_3N_4 , réunie des propriétés complémentaires de ces deux composés.

SiO_2 quant à lui, montre une bonne transparence dans le visible dû à son indice de réfraction de 1.46, des bonnes qualités diélectriques ($E_g \sim 10$ eV) et des faibles contraintes mécaniques. Son inconvénient majeur est la constitution d'une mauvaise barrière à la diffusion des ions et dopants. D'autre part, le nitrure de silicium d'indice de 2.02 et sa densité élevée, forme donc une meilleure barrière à la diffusion. En contrepartie, c'est un diélectrique médiocre ($E_g \sim 5.5$ eV) et des contraintes mécaniques importantes le rend peu résistant aux fissurations.

L'élaboration et la caractérisation de couches minces d'oxynitrides de silicium sont employées dans nombreux domaines d'applications, dû à leurs caractéristiques. Dans les cellules solaires, ce sont de bons candidats pour la réalisation des doubles couches antireflet.

II.2. Techniques utilisées dans la fabrication

Le principal problème dans la fabrication est d'avoir un processus reproductible, qui est particulièrement important pour la production par lots. Chaque problème concernant les paramètres du processus doit être considéré avant d'exposer les périphériques aux processus. Sinon, une grande perte de temps peut venir à travers aux ingénieurs, ainsi que d'énormes problèmes financiers. Par conséquent, l'optimisation du processus de fabrication est une obligation dans la fabrication de la microstructure (Yasinok, 2006).

II.2.1. Photolithographie

Dans la fabrication de dispositifs semi-conducteurs, la photolithographie est utilisée pour transférer une conception de motif d'un réticule (photomasque) à une surface sur un substrat. Typiquement, dans la fabrication de semi-conducteurs, le substrat est du silicium cristallin formé en une plaquette. D'autres matériaux de substrat pourraient être utilisés comme : le verre, saphir et divers métaux (Rucker, 2006).

Le micro-usinage et la fabrication microélectronique commence par la lithographie, la technique utilisée pour transférer des copies d'un modèle maître sur la surface d'un matériau solide, tel qu'une tranche de silicium. Le procédé de photolithographie est essentiellement un processus de transfert de motifs à partir de masques sur un film mince; Ce processus est une combinaison d'alignement précis et d'exposer une série de motifs successifs, ce qui conduit à des structures multicouches complexes.

La photolithographie a mûri rapidement et constamment améliorée dans sa capacité à résoudre les caractéristiques de plus en plus petites. L'amélioration de la résolution a empêché l'adaptation de techniques alternatives de lithographie à haute résolution, telles que la lithographie au rayon X (Kortikar, 2004).

La résine photosensible est un composé organique (polymère) présente une sensibilité au rayonnement UV. Il existe principalement deux types de résine photosensible utilisés dans le procédé de photolithographie.

II.2.1.1. Résine positive

La réaction photochimique pendant l'exposition d'une réserve affaiblit typiquement le polymère par rupture ou scission des chaînes polymères principales et latérales, et la réserve exposée devient plus soluble dans les solutions de développement. Le taux de développement de la résine exposée est plus rapide que le taux de développement de la réserve non exposée.

La plupart des résines positives sont fortement solubles dans la solution alcaline et développent un alcalin doux (Kortikar, 2004).

II.2.1.2. Résine négative

La réaction photochimique pendant l'exposition d'une résine renforce typiquement le polymère par réticulation aléatoire des chaînes principales ou des chaînes latérales pendantes, devenant moins soluble (dissolution plus lente). Le taux de développement de la résine exposée est plus lent que le taux de développement de la résine non exposée. La plupart des résistances négatives disponibles dans le commerce sont basées sur des procédés de photoréticulation initiés par des radicaux libres de chaînes latérales de polymères principales ou pendantes rendant la partie exposée insoluble (Kortikar, 2004).

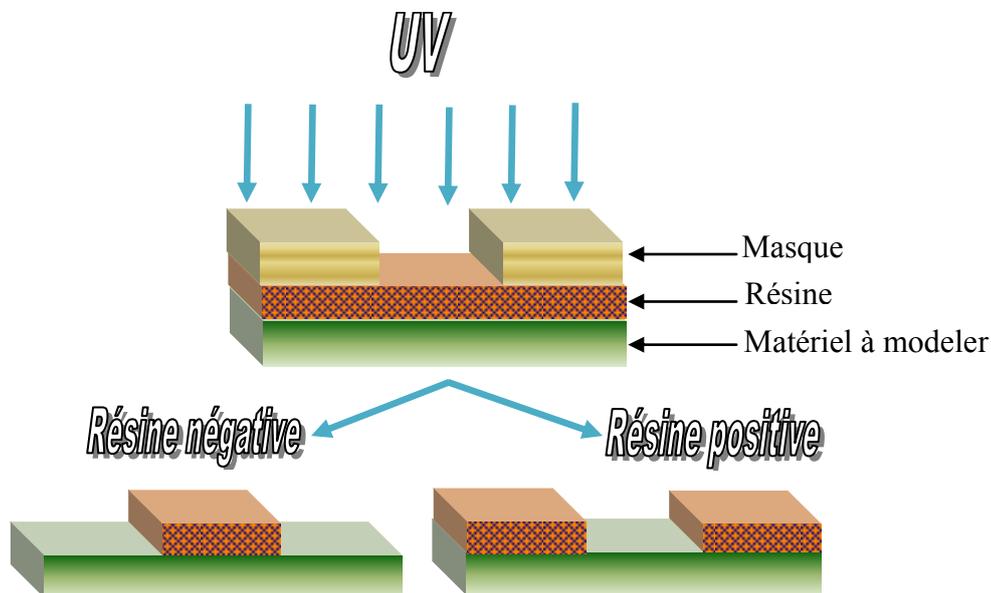


Figure II. 6 Principe de la photolithographie (Bouaraba, 2012)

II.2.2. Gravure

Le terme de gravure est utilisé pour décrire toute technique par laquelle un matériau peut être éliminé de façon uniforme d'une plaquette ou éliminé localement comme dans le transfert de motifs pendant la fabrication d'un microcircuit. Pour de nombreux matériaux, la microstructure n'est révélée que par un agent de gravure approprié.

La production de contraste d'image est nécessaire pour l'observation de la microstructure. Il existe de nombreuses façons d'obtenir le contraste. Ces méthodes peuvent être chimiques et physiques. Les solutions de gravure chimique standard sont les plus couramment utilisées pour produire des conditions «gravées» pour l'examen de structure.

La gravure est essentiellement un processus de corrosion contrôlée résultant d'une action électrolytique entre des surfaces de potentiel différent. Les solutions chimiques utilisées pour la gravure ont été développées principalement par essais et erreurs avec la connaissance du comportement de corrosion du matériau (Güven, 1992).

II.2.2.1. Gravure chimique humide

Le mécanisme de base des attaques chimiques humides de semi-conducteurs est la formation d'un oxyde ou d'oxydes à la surface et la dissolution ultérieure des produits oxydés par des acides ou des bases (Hays, 1999; Güven, 1992). La gravure chimique humide de n'importe quel matériau peut être considérée comme une séquence de cinq étapes:

- Transport du réactif à la surface ;
- Adsorption du réactif ;
- Réaction à la surface ;
- Désorption des produits de réaction ;
- Enlèvement des produits de réaction loin de la surface.

Chacune de ces étapes peut fonctionner comme un limiteur de vitesse et dominer tout le processus. Si la vitesse de gravure est contrôlée par la vitesse à laquelle les espèces réactives peuvent atteindre la surface, ou la vitesse à laquelle les produits de réaction sont éliminés, on dit que le procédé est limité à la diffusion. Si le taux de gravure est seulement limité par le taux de réactions chimiques à la surface, alors le procédé est dit limité à la vitesse de réaction (Hays, 1999; Güven, 1992).

II.2.2.2. Gravure physique et sèche

Ainsi, la technologie de gravure à sec est importante pour la fabrication de tous les types de dispositifs micro et nanométriques. Cette technologie est basée sur l'utilisation d'un plasma contenant des ions dans une chambre à vide, avec la présence d'échantillon à graver. Un masque est fait par la photolithographie pour protéger l'échantillon.

Une anisotropie élevée est généralement obtenue en utilisant des gaz inertes comme le chlore et le brome dans un système de gravure sèche. Ces gaz sont ionisés et envoyés vers la cible afin d'arracher ces atomes. Cette technologie montre plusieurs avantages, elle est bien contrôlée, anisotrope, sélective et propre. Cependant, les gaz utilisés sont extrêmement corrosifs pour une serrure de charge et une chambre de réacteur.

Par conséquent, un gaz moins corrosif, par exemple l'hexafluorure de soufre (SF_6), est souhaitable qui est également moins toxique et écologiquement meilleur tout en continuant à fournir des vitesses de gravure élevées et des sélectivités (Rucker, 2006; Bouaraba, 2012).

II.2.2.3. Gravure ionique réactive

La gravure ionique réactive est un procédé de gravure sèche à base de plasma qui est caractérisé par une combinaison de pulvérisation physique à partir d'ions énergétiques et de gravure chimique d'espèces radicalaires typiquement réactives. Ce procédé de gravure permet à un matériau d'avoir une anisotropie de gravure sélective, de graver de façon directionnelle sans utiliser d'orientation cristalline, de transférer des motifs de photoréserve définis lithographiquement dans des couches sous-jacentes, est un procédé relativement propre et est compatible avec les technologies de traitement sous vide (Rucker, 2006).

II.2.3. Métallisation

Concernant le processus de métallisation côté avant, une réduction de toutes les pertes optiques et électriques, est nécessaire pour optimiser la performance de la cellule solaire. Les pertes optiques dues à la réflexion de la lumière incidente sur la grille métallique et les pertes électriques dues à la résistance en série doivent être équilibrées. La résistance en série affecte principalement le facteur de forme d'une cellule solaire.

II.2.3.1 Sérigraphie

La technologie de métallisation à couche épaisse qui soit capable d'améliorer la structure du côté avant de manière significative est la sérigraphie. Le remplacement de la technologie d'impression sérigraphique sera difficile. L'impression sérigraphique est une technologie relativement peu coûteuse avec des débits élevés. En outre, la technologie de sérigraphie a une expérience avancée dans le domaine de la production de masse de cellules solaires de plus de 15 ans (Mette, 2007).

Cependant, avec une largeur de contact rétrécissant, la conductivité de la ligne est également réduite. Aussi si le même rapport d'aspect que pour les grandes lignes peut être atteint, la division par deux la largeur de ligne conduit à une diminution de conductivité d'environ un facteur de quatre. Un autre inconvénient pour les contacts à film épais est le fait que l'émetteur sous-jacent doit être fortement dopé pour obtenir une résistance de contact acceptable.

II.2.3.2 Concept à deux couches

Pour surmonter ces limitations, une structure de contact à deux couches est la «balle magique» pour la métallisation côté avant. Ceci a le grand avantage que les deux couches peuvent être optimisées individuellement. La première couche doit former un bon contact électrique et mécanique avec l'émetteur faiblement dopé préférable, stable dans l'environnement oxydant. Elle a une bonne caractéristique de dispositif et une longue durée de vie (Mette, 2007).

La seconde couche doit avoir une bonne conductivité de ligne pour minimiser les pertes de résistivité dans la structure, ce qui explique pourquoi l'argent est favorisé (conductivité argent: $63 \cdot 10^6$ S/m) ou le cuivre (conductivité cuivre: $59,6 \cdot 10^6$ S/m). Si le cuivre, moins coûteux, est utilisé, la première couche doit en outre agir comme une barrière de diffusion pour empêcher le cuivre de se diffuser dans la masse de silicium et la surface du cuivre doit être recouverte d'une couche mince, D'étain ou d'argent pour le protéger contre une réaction préjudiciable avec le matériau du module (Mette, 2007).

L'application de cette structure de contact à deux couches modifie les exigences pour la couche de contact et donc aussi pour la technologie de dépôt. La demande probablement la plus importante pour la technologie de déposition appliquée est la capacité à créer des contacts de largeurs fines. La hauteur de contact, facteur de limitation de nombreuses technologies de dépôt antérieurement, revêt une importance secondaire.

Des plaquettes en métaux ont été traitées à l'aide de titane-palladium, de palladium, d'argent, de nickel et d'aluminium en tant que couche de contact sur le côté avant. Des rendements élevés ont été obtenus de 21,4% pour les cellules avec des contacts Ti-Pd-Ag et de 21,5% pour celui avec contact Ni-Ag, alors que le rendement pour les cellules de contact Pd-Ag était légèrement inférieure en raison du facteur de forme réduit.

Le meilleur des cellules solaires en Al a atteint un rendement de 16,6% à un facteur de forme réduit de 66%. Le facteur de forme de la plupart des autres cellules solaires avec de Al comme première couche était encore plus bas. Pour les cellules contenant d'Ag comme matériau de contact, l'adhérence à la surface de silicium était médiocre. La couche Ag complète a été enlevée lors du processus de décollage. L'utilisation d'Ag et d'Al évaporés ne conviennent pas en tant que couche de contact à une surface du silicium faiblement dopé de type n, alors que les contacts Ni, Ti et Pd donnent de bons résultats (Mette, 2007).

II.3. Conclusion

Le silicium est un matériau sur lequel repose l'industrie des semi-conducteurs. Les technologies de film mince ont gagné beaucoup d'intérêt en raison de leur potentiel pour le faible coût, la fabrication de grande surface. L'absorption optique en couches minces est généralement faible aux longueurs d'onde infrarouges. Si amorphe, est un matériau de film mince bien établi en photovoltaïque et en grande surface, a un coefficient d'absorption élevé. Cependant, L'absence de la notion d'ordre atomique à longue distance entraîne également des densités de défauts élevées, limitant l'épaisseur du film à des valeurs $\sim 300-500$ nm pour une collecte efficace des charges.

Par conséquent, l'amélioration du rendement des cellules a un intérêt continu tout en maintenant l'avantage à grande échelle de faible coût de la technologie de film mince. L'introduction des nanostructures dans les cellules solaires à base de silicium en couches minces répond à cette exigence.

Plus particulièrement, les NFSi ont récemment été présentés comme de bons candidats pour des applications photovoltaïques. L'utilisation du NFSi comme matériau est une perspective séduisante dans le sens où ce matériau est abondant, peu coûteux, et dispose, de part l'industrie de la microélectronique, d'une large infrastructure et d'un savoir-faire pour sa fabrication et sa manipulation.

Chapitre III
Environnement
du simulateur
Silvaco

Chapitre III: Environnement du simulateur Silvaco

Le processus suivi par la plupart des centres de recherche et les fabricants de cellules photovoltaïques, est la construction de prototypes expérimentaux. Bien qu'il soit le procédé le plus fiable pour évaluer la performance d'une cellule, il est toujours coûteux et prend du temps. D'autre part, la modélisation en utilisant des logiciels simulateurs physique de différents dispositifs électroniques, fournit un moyen rapide, cohérent et relativement peu coûteux à concevoir des cellules solaires. La modélisation et la simulation ont permis à des milliers de combinaisons d'être étudiées avant la fabrication des exemples réels.

III.1. Simulateur TCAD

La simulation physique de différents dispositifs électroniques est effectuée à l'aide d'un simulateur TCAD (Technology Computer-Aided Design), un ensemble complet d'outils autonomes, où l'aspect conception technologique est associé à la simulation électrique, afin de réduire le temps et le coût de développement, de découvrir et d'optimiser des solutions dans le but d'améliorer les performances des dispositifs. Parmi les simulateurs existants sur le marché, nous trouvons ISE, SYNOPSIS, SILVACO, etc. Ces logiciels renferment le même principe de fonctionnement.

III.1.1 Simulateur TCAD-Silvaco

La simulation sous Silvaco 'Silicon Valley Corporation' permet la conception, la modélisation et la prévention des performances des dispositifs à base des semi-conducteurs. Les processus de fabrication des composants intégrés sont simulés par une suite de logiciels offerts par le TCAD-Silvaco. Son principe de base repose sur la résolution des équations différentielles issues de la physique du composant. La conception d'un dispositif est faite par deux principaux logiciels complémentaires composant généralement la suite d'outils de TCAD-Silvaco, le simulateur du procédé de fabrication ATHENA et le simulateur des effets électriques ATLAS.

Le premier permet la fabrication des dispositifs physiques selon la production industrielle réelle telle qu'elle est réalisée à l'industrie. Il comprend les étapes d'implantation d'ions, de dépôt, de gravure, de recuit et d'oxydation, etc. Par contre, le second permet de prédire par simulation le comportement électrique du composant créé. Le composant est représenté comme une structure maillée où chaque nœud a des propriétés qui lui sont associées telles que le type de matériau, la concentration en dopant, le champ électrique, etc.

III.1.2 Simulateur du procédé de fabrication ATHENA

ATHENA est un simulateur du procédé de fabrication qui fournit des capacités générales pour la simulation numérique bidimensionnelle du traitement des semi-conducteurs. Il dispose d'une architecture modulaire qui comprend les outils et les extensions suivants : SSUPREM4, ELITE et OPTOLITH. Cet outil effectue l'initialisation et la manipulation de la structure et fournit des installations de base de découpage et de gravure.

III.1.3 Utilisation d'ATHENA avec d'autres logiciels de SILVACO

ATHENA est normalement utilisé en conjonction avec les outils VWF INTERACTIVE. Ces outils incluent DECKBUILD, TONYPLOT, DEVEDIT, MASKVIEWS et OPTIMIZER. DECKBUILD définit les programmes de simulation à travers des commandes spécifiques, il fournit un environnement de temps d'exécution interactif. De multiples simulateurs considérés comme des entrées peuvent être utilisés avec le DECKBUILD comme ATHENA et ATLAS, sachant que chaque outil de simulation possède son propre langage de programmation.

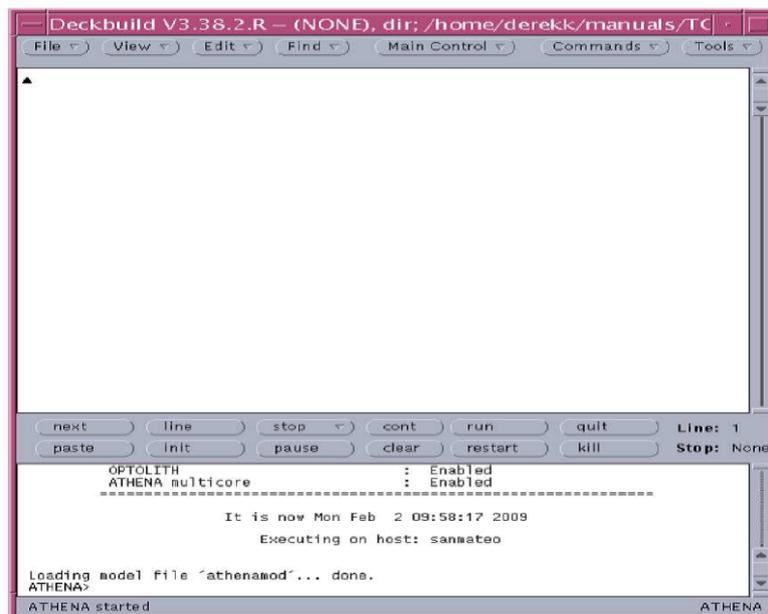


Figure III. 1 Environnement DECKBUILD.

- Outil TONYPLOT

TONYPLOT est un outil de traitement graphique fournissant des capacités de visualisation des résultats de simulation. Il peut fonctionner autonome, ou avec d'autres outils pour tous les simulateurs Silvaco, il est une partie intégrante des outils VWF. En pratique, plusieurs paramètres sont mesurés et la simulation est alors accordée à ces valeurs, cet outil

permet de visualiser et analyser les caractéristiques des résultats de simulation (structure des dispositifs obtenue, l'épaisseur la caractéristique IV, le profil de dopage, etc.). Il contient certaines fonctionnalités et interfaces plus faciles à exploiter pour les utilisateurs. Cependant l'affichage résultant est également amélioré, il peut être en une dimension 1D, deux dimensions (2D) et voire trois dimensions (3D), selon la configuration de programme de simulation (VWF InteractiveTools, 2005).

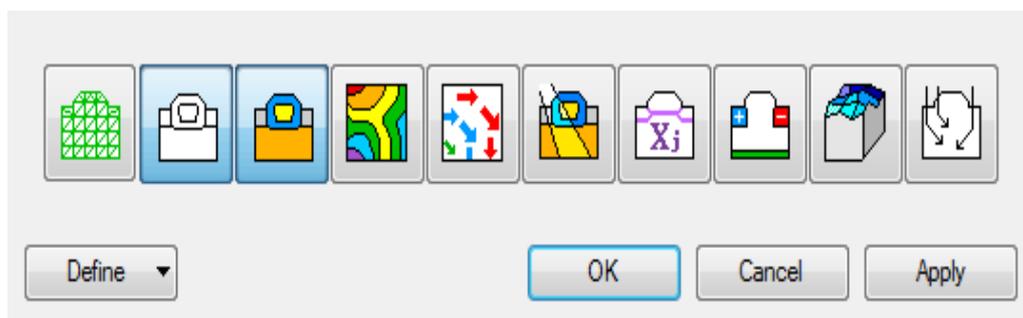


Figure III. 2 Outil TONYPLOT

- Utilisation d'ATHENA avec ATLAS

ATHENA est également fréquemment utilisé en conjonction avec le simulateur de dispositif ATLAS. ATHENA prédit les structures physiques qui résultent du traitement. Ces structures physiques sont utilisées comme entrée par ATLAS, qui prédit alors les caractéristiques électriques associées à des conditions de polarisation spécifiées. L'utilisation d'ATHENA et d'ATLAS permet de déterminer facilement l'impact des paramètres du processus sur les caractéristiques de dispositif (ATHENA user's manual, 2015).

III.1.4 Simulateur ATLAS

Les principaux avantages des simulateurs de composants sont tout d'abord la possibilité offerte de visualisation de phénomènes physiques difficilement accessible, et de s'appropriier au procédés de fabrication. Simulation d'une cellule photovoltaïque en ATLAS se fait à travers une plate-forme d'entrée de texte appelé DeckBuild, un environnement d'exécution dans lequel de nombreux paramètres différents de la structure cellulaire et la composition doivent être définies.

Vu qu'ATLAS est un simulateur de dispositif à base physique, la définition de la composition, est également importante. Une fois que les structures physiques sont spécifiées, la composition et les conditions de polarisation des déclarations conduisent ATLAS pour faire des prédictions des caractéristiques électriques de la cellule (Fotis, 2012).

Après la définition du maillage, chaque maille triangulée est ensuite divisée en régions et des matériaux différents sont affectés dans chacune de ces régions. Ensuite, les électrodes afin d'obtenir les caractéristiques électriques de l'appareil ou pour toute région requise sont affectés. Ensuite, chaque matériau défini doit être associé à un dopage et autant que possible, les propriétés des matériaux doivent être déclarées pour la simulation la plus précise (ATLAS user's manual, 2015). La structure des états doit être suivie dans la séquence représentée sur le tableau IV.1.

Tableau III. 1 Groupe des commandes et déclarations pour un fichier Silvaco ATLAS

Groupe	Déclarations
1. Spécification de structure	MESH (Maillage) REGION (Région) ELECTRODE (Électrode) DOPING (Dopage)
2. Spécification des matériaux et des modèles	MATERIAL (Matériels) MODEL (Modèles) CONTACT INTERFACE
3. Sélection des méthodes numériques	METHOD (Méthodes)
4. Spécification des solutions	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Analyse des résultats	EXTRAT TONYPLOT

III.1.5 Etapes de la simulation sous ATLAS

III.1.5.1. Spécification de la structure

En utilisant ATLAS DECKBUILD, la première ligne à être lu par le programme lors de l'exécution est la commande GO ATLAS.

La définition de la structure est l'étape clé pour la simulation, car elle porte non seulement les dimensions physiques et les épaisseurs des différentes couches constituant la cellule, mais construit également un maillage pour la cellule à travers sa division fine (ATLAS user's manual, 2015).

- Maillage

Sa signification est que à des points de la grille, appelé nœuds, un ensemble d'équations différentielles sont résolues en vue de simuler le transport des porteurs de la cellule et de

permettre une étude du comportement de la cellule (ATLAS user's manual, 2015; Fotis, 2012).

La simulation numérique par Silvaco Atlas est basée sur la résolution numérique de trois équations fondamentales de transport de charges à semi-conducteurs, qui sont respectivement l'équation de Poisson, l'équation de continuité pour les électrons et les trous et l'équation de courant (ATLAS user's manual, 2015).

- **Equation de Poisson**

$$\Delta \psi = -\frac{e}{\varepsilon} (N_d - N_a + p - n) \quad (\text{III.1})$$

Où

Ψ est le potentiel électrostatique ;

e : est la charge électrique élémentaire ;

ε : est la permittivité diélectrique du semi-conducteur ;

N_d et N_a sont les concentrations de donneurs et d'accepteurs ionisés ;

n et p sont les densités d'électrons et de trous libres.

- **Equation de continuité pour les électrons et les trous**

Les courants d'électrons et de trous résultent de la somme de deux termes: un gradient de concentration et un gradient de potentiel électrostatique:

$$\begin{cases} J_n = ne\mu_n E + eD_n \overrightarrow{\text{grad}n} \\ J_p = pe\mu_p E + eD_p \overrightarrow{\text{grad}p} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Où

n et p sont les densités d'électrons et de trous libres,

e : est la charge électrique élémentaire,

μ_n et μ_p : la mobilité des électrons et des trous,

D_n et D_p : le coefficient de diffusion des électrons et des trous.

- **Equation de courant**

Pour décrire les phénomènes de transport des porteurs, on utilise les équations de continuité pour les électrons et pour les trous, qui régissent la condition d'équilibre dynamique des porteurs de charge dans le semi-conducteur.

Elles donnent la relation entre les courants, les mécanismes de génération et de recombinaison et la distribution spatiale et temporelle des porteurs de charges libres :

$$\begin{cases} \frac{\delta n}{\delta t} = G_n - U_n + \frac{1}{e} \operatorname{div} \bar{J}_n \\ \frac{\delta p}{\delta t} = G_p - U_p + \frac{1}{e} \operatorname{div} \bar{J}_p \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Où

n et p sont les densités d'électrons et de trous libres ;

G_n et G_p : représentent les taux de génération des électrons et des trous ;

U_n et U_p : représentent les taux de recombinaison des électrons et des trous ;

J_n et J_p : la densité de courant des électrons et des trous ;

e : la charge électrique élémentaire.

L'accumulation se compose d'un maillage bien défini sur lequel la cellule est construite. La résolution de la simulation est déterminée par la densité de nombreux triangles de maillage et désigne le temps nécessaire pour les itérations du programme et la précision de la représentation de la cellule (ATLAS user's manual, 2015).

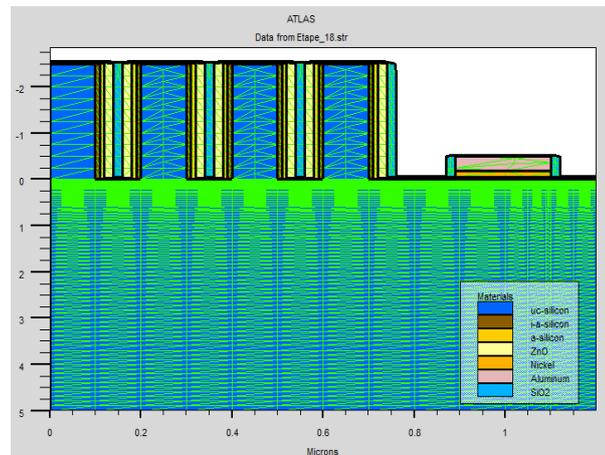


Figure III. 3 Maillage typique dans ATLAS.

- Régions

L'étape suivante dans la création d'un dispositif semi-conducteur est de séparer le maillage créé en régions (Chowdhury, 2015). En définissant une région, tous les emplacements de la maille sont divisés en zones numérotées, où chacune est associée à un matériau spécifique. Le type de matériau détermine l'élément ou le composé de cette région et doit être disponible dans la bibliothèque ATLAS (ATLAS user's manual, 2015).

- Electrodes

Les électrodes spécifient les emplacements et les noms des électrodes dans le maillage défini précédemment. Une fois les régions réglées, les électrodes doivent être affectées à la région désirée pour pouvoir être analysées électriquement. L'électrode peut être affectée à n'importe quelle région ou portion d'une région comprenant le haut ou supérieur (Top) et le bas ou inférieur (Bottom) comme c'est le cas dans nos travaux.

Cet emplacement peut être une région spécifique, une électrode cathode, et une électrode anode ont été affectées dans les cellules solaires étudiées (ATLAS user's manual, 2015).

- Dopage

La dernière entrée requise de la spécification de structure de dispositif est l'instruction de dopage. Elle est utilisée pour attribuer le niveau de dopage dans les régions précédemment affectées. Elle spécifie les profils de dopage dans la structure, soit analytiquement ou à partir d'un fichier d'entrée.

III.1.5.2. Spécification des méthodes et des modèles

La spécification des modèles est essentiel à la modélisation précise d'un phénomène particulier car il définit des indicateurs pour ATLAS pour indiquer l'inclusion de différents modèles mathématiques, mécanismes physiques et autres paramètres globaux tels que la température du substrat (Chowdhury, 2015).

Une fois que nous définissons le maillage, la géométrie et les profils de dopage, nous pouvons modifier les caractéristiques des électrodes, changer les paramètres du matériau par défaut et choisir les quels des modèles physiques ATLAS sera utiliser lors de la simulation de dispositif.

- Matériau

La déclaration des matériaux relie les paramètres physiques aux matériaux affectés au maillage. La région définie et dopée précédemment doit être associée à des matériaux spécifiques. Ces matériaux, leurs propriétés et leurs paramètres physiques peuvent être choisis dans la base de données ATLAS, sont déjà définis et ne nécessitent donc aucune modification, parmi un certain nombre d'éléments, des composés et des alliages (ATLAS user's manual, 2015).

- **Modèle physique**

La prochaine étape pour l'utilisateur est de choisir parmi les différents modèles, de trouver ce qui est le plus approprié pour l'évaluation de la structure, et de réaliser un meilleur aperçu pour la simulation de cellule spécifique. Une spécification d'un faisceau de lumière éclaire la cellule dans des conditions réelles, simulant différentes régions du spectre solaire, selon le faisceau choisi.

Les modèles physiques sont regroupés en cinq catégories: la mobilité, la recombinaison, les statistiques des porteurs, impact d'ionisation et tunnels. Les détails de chaque modèle sont contenus dans le mode manuel d'ATLAS (ATLAS user's manual, 2015).

- **Contact**

Les instructions d'électrode attribuant la cathode et l'anode au semi-conducteur sont suffisantes pour calculer le courant à travers la jonction.

- **Interface**

L'instruction 'INTERFACE' permet de définir la densité de charge d'interface et la vitesse de recombinaison de surface aux interfaces entre les semi-conducteurs et les isolateurs (ATLAS user's manual, 2015).

III.1.5.3. Sélection des méthodes numériques

En outre, la sélection d'une méthode, parmi les différents proposés par la bibliothèque ATLAS, est nécessaire pour résoudre les équations différentielles à travers lequel les caractéristiques de fonctionnement de la cellule se présentent (ATLAS user's manual, 2015). Plusieurs méthodes numériques sont contenues dans la bibliothèque d'ATLAS, mais il existe trois types principaux.

La méthode de 'GUMMEL' est utilisée pour les équations du système faiblement couplés, avec seulement la convergence linéaire. La méthode de 'NEWTON' est utilisée pour les équations du système fortement couplés, avec la convergence quadratique, nécessitant ATLAS de passer plus de temps à résoudre pour les quantités qui sont essentiellement constantes ou faiblement couplées. Pour obtenir et assurer la convergence, une approximation plus précise est nécessaire du système. Enfin, la méthode de BLOCK fournit des simulations plus rapides lorsque la méthode de NEWTON est incapable de fournir une solution fiable (ATLAS user's manual, 2015).

Faisceau optique

Un faisceau optique est modélisé comme une source de collimation. Ce faisceau est automatiquement divisé en une série de rayons de telle sorte que la somme des rayons couvrant toute la largeur de la fenêtre d'illumination. Lorsque le faisceau est divisé, ATLAS résout automatiquement discontinuités le long des limites de la région de dispositif. Les rayons sont également divisés au niveau des interfaces entre les régions en un rayon transmis et un rayon réfléchi (ATLAS user's manual, 2015).

III.1.5.4. Spécification de solution

ATLAS peut calculer le courant direct DC, et le courant alternatif AC d'un petit signal, et des solutions transitoires. L'obtention de solutions est similaire à la mise en place des équipements de test paramétrique pour les tests de dispositif. L'utilisateur définit généralement les tensions sur chaque électrode dans le dispositif. ATLAS calcule ensuite le courant à travers chaque électrode et les quantités internes, telles que les concentrations de porteurs et les champs électriques à travers le dispositif (ATLAS user's manual, 2015).

La spécification de solution peut être divisée en quatre parties: LOG, SOLVE, LOAD, et SAVE. Ces instructions LOG, SOLVE, et LOAD sont utilisées pour créer des fichiers de données dans des simulations ATLAS. Ces instructions travaillent ensemble pour fournir des données à analyser par d'autres fonctions. Elles sont utilisées comme un outil pour vérifier les points de polarisation, les diagrammes de bande d'énergie et les concentrations de porteurs.

III.1.5.5. Analyse des résultats

L'extraction des données et le traçage, ce sont les dernières sections de la plate-forme d'entrée. L'instruction EXTRACT, est fournie dans l'environnement DECKBUILD. Une syntaxe flexible permet à l'utilisateur d'extraire les paramètres de dispositif et la construction EXTRACT spécifique routines.

III.2. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le logiciel de simulation Silvaco, ses modules et ses outils de simulation. Les deux simulateurs essentiels utilisés du Silvaco, celui de la modélisation des dispositifs : ATHENA et celui de la caractérisation : ATLAS, ont été présentés dans ce chapitre.

Chapitre IV
Modélisation et Simulation
des cellules
solaires étudiées

Chapitre IV : Modélisation et simulation des cellules solaires étudiées

Dans ce qui suit, nous allons procéder à la modélisation de notre structure d'étude où nous allons incorporer des nanofils de silicium dans une structure simple jonction (a-Si:H/NFSi:H/ $\mu\text{c-Si:H}$) qui représente la structure de base de notre étude. Cette structure choisie parmi d'autres structures, que nous avons étudiées, nous paraît importante pour la compréhension de nos travaux. Nous allons citer les étapes de procédés nécessaires à la réalisation de cette structure. La modélisation des structures étudiées est faite sous environnement Silvaco avec le module ATHENA.

IV.1. Modélisation des structures

IV.1.1. Conception d'une cellule solaire à simple jonction avec des nanofils

IV.1.1.1. Définition du maillage

La spécification du maillage dans la modélisation et la simulation est une étape très importante dans l'étude. Le nombre de nœuds dans la grille influe directement sur la précision et le temps de la simulation. Un exemple de mailles à la fois fines et grossières destinées à ATHENA est représenté dans la figure suivante (Figure IV.1).

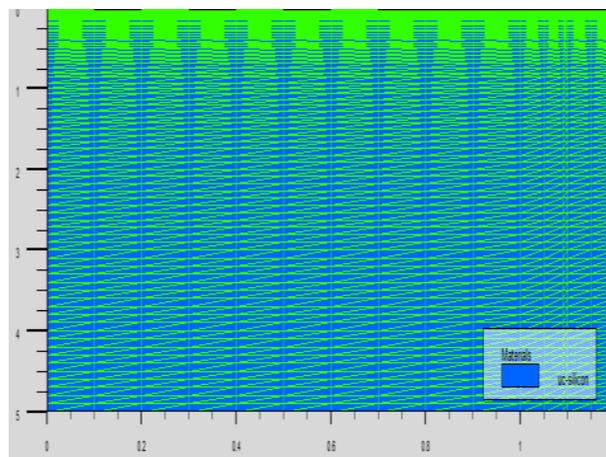


Figure IV. 1 Définition du maillage.

IV.1.1.2. Définition du substrat initial

L'étape suivante est l'initialisation de la région du substrat. Nous définissons ses points, nœuds, ses triangles, son dopage, son orientation, et quelques paramètres supplémentaires. Nous avons choisi un substrat en Silicium microcristallin avec une orientation 111.

Cette orientation est généralement utilisée car elle présente une symétrie de surface hexagonale. La longueur du substrat est de 5 μm , et sa largeur est de 1 μm . La taille de la

cellule élémentaire est $5 \mu\text{m}^2$. Il est uniformément dopé par une concentration de Bore de 10^{15} atomes/ cm^3 .

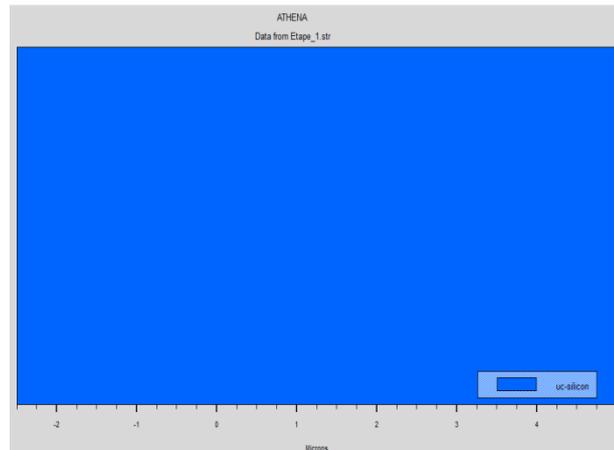


Figure IV. 2 Définition du substrat

IV.1.1.3. Dépôt et gravure d'une couche de Silicium microcristallin

L'étape suivante du processus de la simulation est la création des nanofils. Une dépôt d'une couche mince de silicium microcristallin par l'épitaxie est nécessaire, suivie de l'étape de la gravure de cette couche pour obtenir des nanofils de silicium de taille désirée. Notre couche de nanofils ainsi préparée correspond à des nanofils de diamètre 100 nm et de longueur de $2.5 \mu\text{m}$. Ces nanofils sont dopé par du Bore avec une concentration de $10^{20}/\text{cm}^3$ (Voir Figure IV.3).

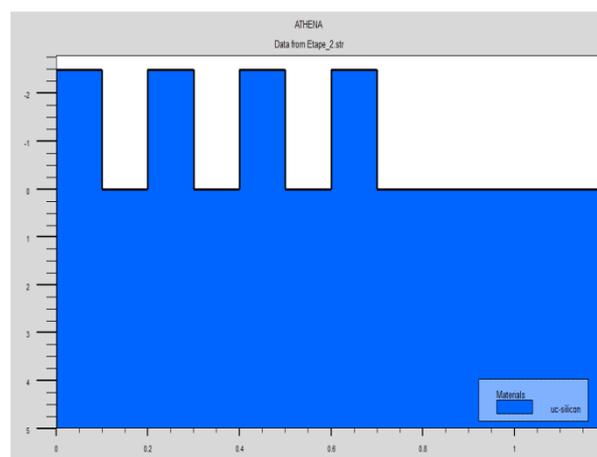


Figure IV. 3 Gravure des nanofils NFSi

IV.1.1.4. Dépôt et gravure d'une couche amorphe intrinsèque

Sans les couches intrinsèques a-Si:H entre l'hétérojonction p-a-Si:H/n- $\mu\text{c-Si:H}$, l'effet tunnel est causé par de nombreux états localisés dans la couche dopée.

Il en résulte que les V_{CO} élevés ne peuvent être atteints. Cette couche mince intrinsèque a pour but de réduire le phénomène de recombinaison des porteurs et d'améliorer les propriétés électriques au niveau de l'interface (Monga, 2015).

Une fois les nanofils réalisés, nous passons à l'étape de déposition de la couche mince de silicium amorphe intrinsèque par l'épitaxie. Elle est suivie par l'étape de la gravure de cette couche. Ceci, pour obtenir une couche très mince de 10 nm d'épaisseur (Voir Figure IV.4).

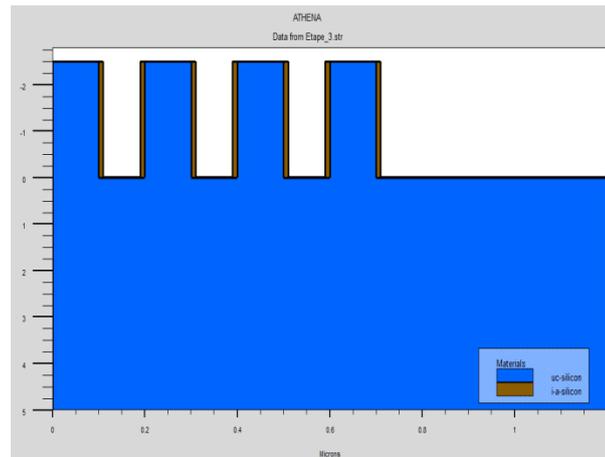


Figure IV. 4 Epitaxie et Gravure d'une couche de silicium amorphe intrinsèque

IV.1.1.5. Déposition et gravure d'une couche amorphe de type n

Une bonne qualité de passivation de surface et un dopage des zones, est réussi si nous procédons à un dépôt unique du silicium amorphe hydrogéné, différemment aux cellules à homojonctions classiques. L'insertion des impuretés dopantes modifie les propriétés de passivation. Dans l'industrie, la déposition d'une couche du silicium amorphe a-Si:H d'épaisseur de quelques nm est réalisée par la technique de CVD assistée par plasma ou par filament chaud (Desrues, 2009).

Dans notre cas, nous procédons à la déposition d'une couche de silicium amorphe de type n par l'épitaxie, suivie par l'étape de gravure de celle-ci. Ceci, pour obtenir une couche très mince de 10 nm d'épaisseur (Voir Figure IV.5).

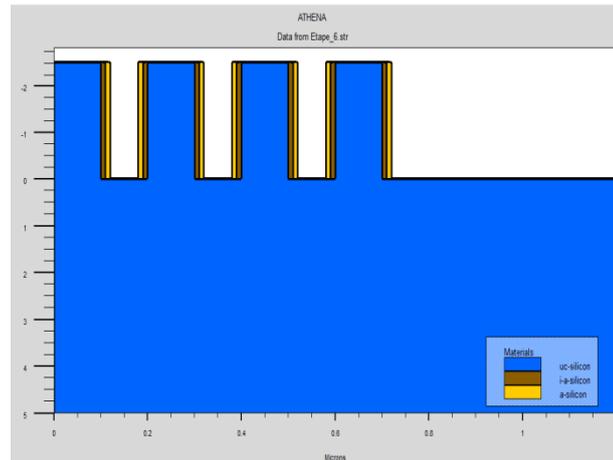


Figure IV. 5 Epitaxie et Gravure d'une couche de silicium amorphe type n

IV.1.1.6. Déposition et gravure d'une couche conductrice transparente

La déposition d'une couche de ZnO dopée par de l'Aluminium assez mince, permet le passage de la lumière. Ceci est dû à son coefficient d'absorption qui est très élevé, qui permet d'absorber un maximum de photons incidents. Le dépôt est fait par l'épitaxie, suivi par l'étape de gravure de cette couche. Ce qui nous donne une couche mince de 10 nm d'épaisseur (Voir Figure IV.6).

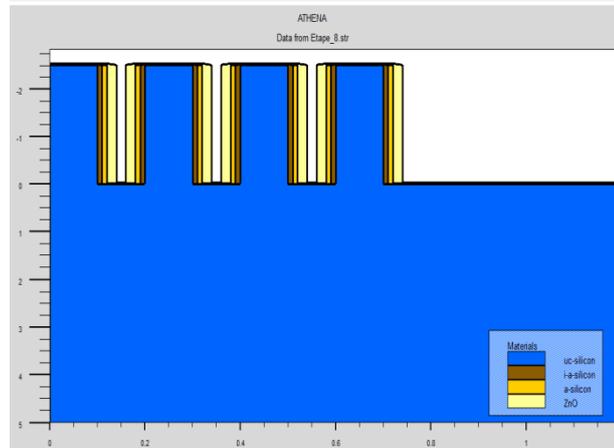


Figure IV. 6 Epitaxie et Gravure d'une couche d'oxyde de zinc ZnO:Al

IV.1.1.7. Déposition d'une couche de Nickel et d'une couche d'Aluminium

Le développement de nouveaux concepts pour la métallisation frontale a été conçu pour les structures de contact à deux couches. Cette structure présente l'avantage d'optimiser chaque couche individuellement. L'exigence pour la première couche est une petite largeur de contact, une faible résistance de contact, une adhérence suffisante à la surface de Si sous-jacente ainsi qu'une bonne adhérence au métal de la seconde couche.

La deuxième couche sert à recueillir le courant à partir de première, de sorte que son paramètre critique, la conductivité ligne, soit élevée (Mette, 2007).

Nous avons choisi Ni comme métal pour la première couche, et Al comme métal pour la deuxième couche. Un premier dépôt de la couche mince de Nickel de 10 nm d'épaisseur suivi par un autre dépôt d'une couche mince d'Al (Voir Figure IV.7).

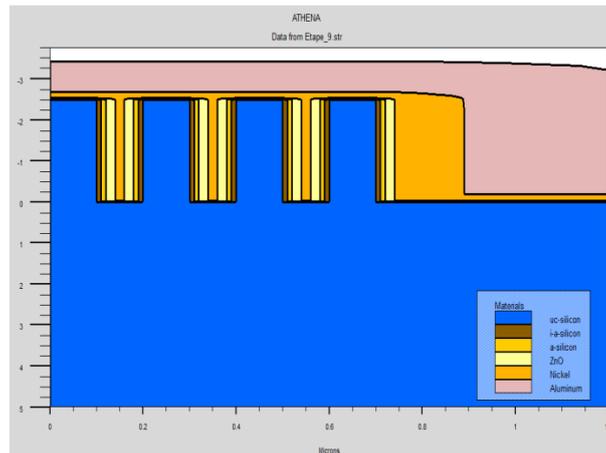


Figure IV. 7 Epitaxie de couches de Nickel et Aluminium

IV.1.1.8. Déposition d'une couche de résine

Après la déposition des deux couches métalliques Ni et Al pour former le contact à deux couches, nous procédons à la photolithographie. Pour cela, un dépôt d'une couche mince de la résine photosensible, de 100 nm nanomètres d'épaisseur, est déposée sur le dessus de deux couches minces métalliques cités précédemment (Voir Figure IV.8).

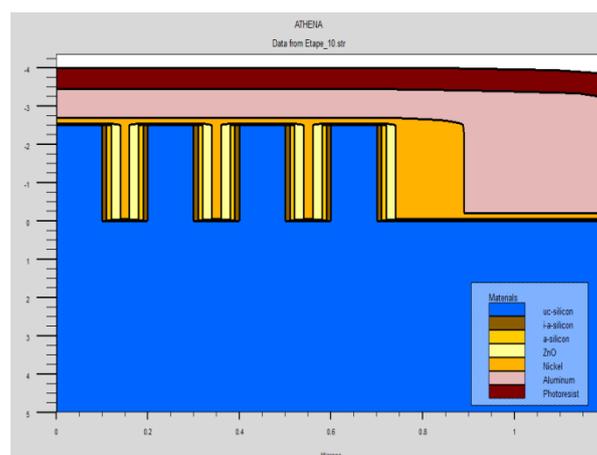


Figure IV. 8 Epitaxie d'une couche de résine

IV.1.1.9. Gravure de la couche de résine

Après la déposition de la couche mince de la résine photosensible, l'étape de gravure est essentielle pour protéger la partie concernée des deux couches métalliques Ni et Al (Voir Figure IV.9).

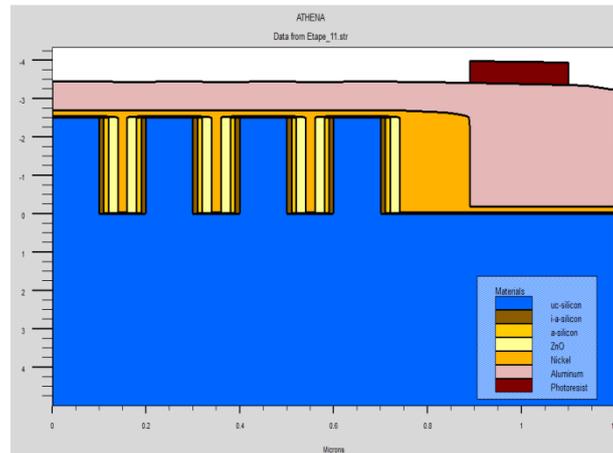


Figure IV. 9 Gravure de la couche de résine

IV.1.1.10. Gravure de couches de Nickel et d'Aluminium

Après la gravure de la couche mince de la résine photosensible, une étape de gravure est essentielle pour garder la partie concernée des deux couches métalliques Ni et Al et enlever la partie non désirée (Voir Figure IV.10).

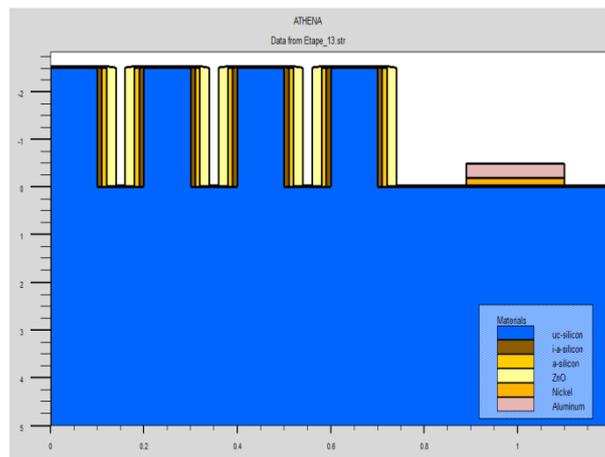


Figure IV. 10 Gravure de la couche de Nickel et la couche d'Aluminium

IV.1.1.11. Déposition d'une couche antireflet

La déposition d'une couche antireflet de SiO_2 limite les pertes optiques du rendement, qui affectent fortement le courant de court-circuit I_{cc} , dans les cellules photovoltaïques.

Le dépôt se fait par l'épitaxie, suivi par l'étape de gravure de cette couche pour obtenir une couche mince de 20 nm d'épaisseur (Voir Figure IV.11).

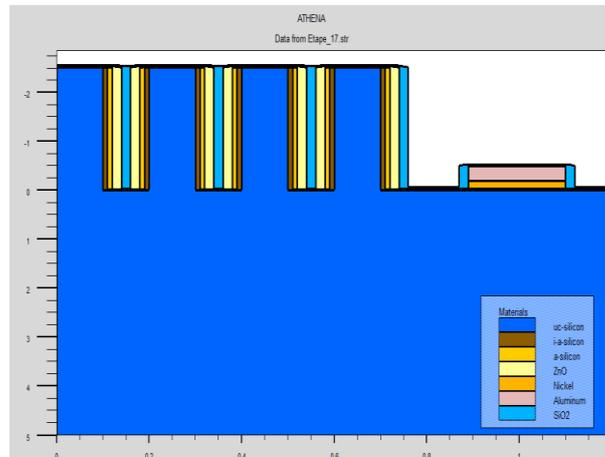


Figure IV. 11 Epitaxie et Gravure d'une couche d'oxyde de silicium

IV.1.1.12. Spécification des électrodes

Dans notre étude, nous choisissons la double métallisation Ni/Al (cathode) pour le contact avant et Aluminium (anode) l'électrode arrière (Voir Figure IV.12).

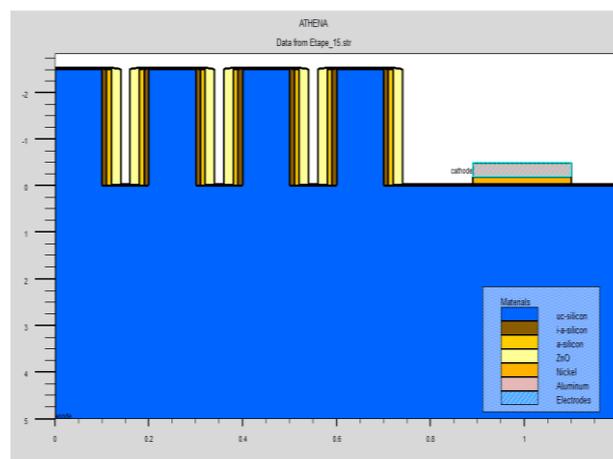


Figure IV. 12 Définition des électrodes

IV.1.1.13. Structure finale

Après toutes les étapes décrites précédemment nous sommes arrivés à notre structure finale de base représentée sur la Figure IV.13.

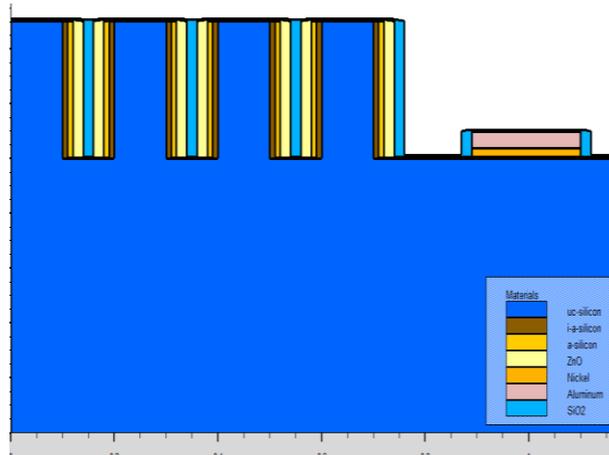


Figure IV. 13 Structure obtenue après simulation.

IV.1.2. Conception d'une cellule solaire à double jonction

IV.1.2.1. Introduction

Grâce à la simulation et la caractérisation, l'élaboration des matériaux sous forme de couches minces a progressé de façon importante ces dernières années. En effet, la réalisation de films minces planaires a atteint des épaisseurs nanométriques. Alors, la nature quantique de ces structures ultraminces engendre des phénomènes physiques nouveaux. Ceci introduit de nouvelles propriétés liées à l'effet des interfaces entre couches (Leprince-wang, 2003).

IV.1.2.2. Structure à simuler

La structure de la cellule solaire Tandem (double jonctions) à couches minces à simuler est la mise en contact de deux cellules de base simple jonction étudiée précédemment. La cellule supérieure (TOP Cell) est constituée du silicium amorphe hydrogéné a-Si:H avec une jonction p-i-n. la cellule inférieure (Bottom Cell) est constituée du silicium microcristallin hydrogéné μ c-Si:H avec une jonction p-i-n (Voir Figure IV.14).

Pour procéder à la simulation des paramètres électriques, nous nous sommes basés sur les valeurs trouvées dans la littérature des paramètres technologiques tels que les épaisseurs, les concentrations, le type de matériaux, etc.

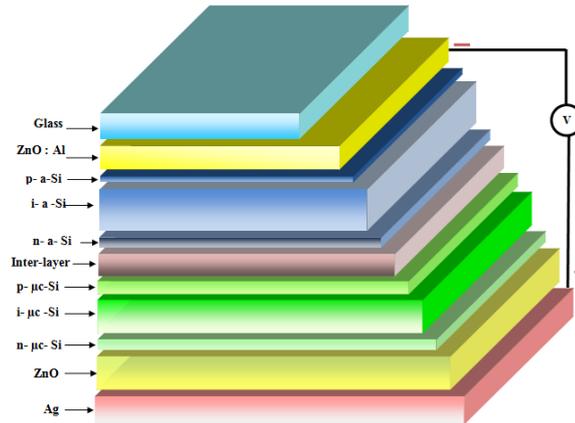


Figure IV. 14 Structure d'une double jonction amorphe/microcristallin a-Si:H/ μ c-Si:H (Zeman, 2010)

Le procédé de modélisation, sous environnement Silvaco-ATHENA, de la cellule solaire à double jonctions est le même que celui de la simple jonction, décrit précédemment. La figure IV.15 représente la structure modélisée à étudier.



Figure IV. 15 Structure obtenue après simulation

IV.1.3. Conception d'une cellule solaire à Triple jonction

IV.1.3.1 Introduction

L'écart entre l'énergie des photons et l'énergie de la bande interdite du matériau photovoltaïque est l'un des principaux facteurs de perte d'énergie dans une cellule solaire. Aucune absorption ne se produirait si l'énergie du photon était plus petite que l'énergie de la bande interdite.

Seule l'égalité entre l'énergie du photon et l'énergie de la bande interdite pourrait être extraite comme puissance électrique, l'excès d'énergie est dépensé comme chaleur si elle est plus grande.

La déposition de multicouches des matériaux photovoltaïques de différentes énergies de bande interdite est donc couramment utilisée pour des cellules solaires à haut rendement. Ceci, afin de réduire les pertes d'énergie et d'absorber plus efficacement l'énergie photonique du spectre solaire en profitant de l'accord des énergies de bande de gap et des constantes de réseau (Tanabe, 2008).

IV.1.3.2 Structure à étudier

Le procédé de modélisation, sous environnement Silvaco-ATHENA, de la cellule solaire à triple jonctions est le même que celui de la simple et de double jonction, décrits précédemment. La figure IV.16 représente la structure modélisée à étudier.

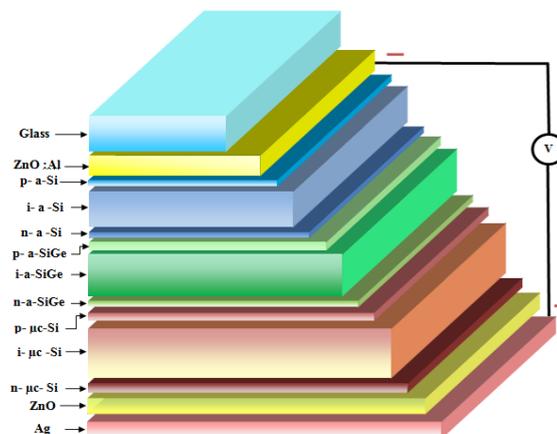


Figure IV. 16 Structure typique d'une cellule solaire à multijonctions a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si:H

IV.2. Simulation et caractérisation des structures étudiées

Afin de déterminer les différents paramètres physiques liés à la conversion photovoltaïque, nous étudions les modèles de cellules photovoltaïques à couches minces multijonctions conçues et modélisées précédemment.

Le premier modèle est notre structure de référence double jonctions (a-Si:H/ μ c-Si:H), puis la triple jonction (a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si:H) et enfin notre structure d'étude où nous allons incorporer des nanofils de silicium dans une structure simple jonction (a-Si:H/NFSi:H/ μ c-Si:H) qui nous permet d'améliorer les performances de notre cellule photovoltaïque.

La simulation des paramètres physiques des structures étudiées se fera sous environnement Silvaco avec le module ATLAS. La caractéristique I-V nous permet de définir les paramètres physiques importants d'un semi-conducteur. Tout le long de notre étude nous allons interpréter cette caractéristique.

IV.2.1. Caractéristiques de cellule solaire de référence

Les paramètres de la cellule solaire à double jonctions (a-Si:H/ μ c-Si:H) prise comme référence sont : une couche d'Al (200 nm), une couche d'Ag (10 nm), une couche de ZnO (10 nm). Une cellule inférieure (Bottom Cell), constituée de trois couches minces de Si déposées comme suit n- μ c-Si:H (15 nm) / i- μ c-Si:H (2.2 μ m) / p- μ c-Si:H (20 nm) avec un fort dopage de 10^{20} at/cm³. Une cellule supérieure (Top Cell) composée de trois couches minces de Si amorphe déposées comme suit n-a-Si:H (15 nm) / i-a-Si:H (200 nm) / p-a-Si:H (10 nm) avec un fort dopage de 10^{20} at/cm³, une couche de ZnO (500 nm), une couche de SiO₂ (500 nm), (Zeman et al., 2008), Voir Figure IV.17.

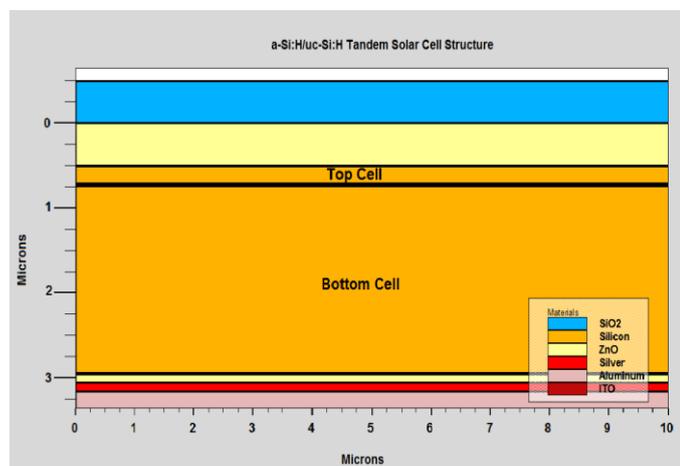


Figure IV. 17 Structure de la cellule de référence micromorphe a-Si:H/ μ c-Si:H

Dans des cellules solaires à hétérojonctions, la superposition des couches amorphes et des couches microcristallines crée un décalage de bande. Ceci car le dopage des couches avant a-Si:H est de type n et celui des couches arrière c-Si est de type p. Comme la bande interdite de la cellule amorphe supérieure (Top Cell) est supérieure à celle de la cellule microcristalline inférieure (Bottom Cell) (1,7 eV et 1,1 eV), il y a un élargissement de bande aux jonctions (μ c-Si / a-Si). Cela contribue à la collecte des porteurs minoritaires aux deux jonctions.

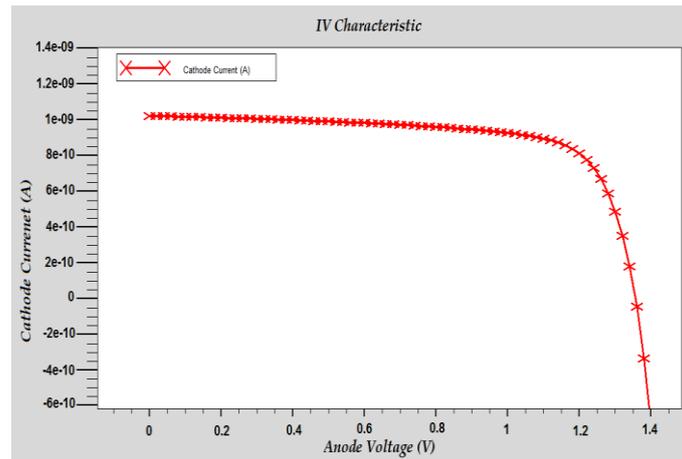


Figure IV. 18 Caractéristique I-V de la cellule micromorphe a-Si:H/ μ c-Si:H

La figure IV.18, représente la caractéristique I-V obtenue après la simulation de la cellule a-Si:H/ μ c-Si:H. Nous obtenons une valeur de tension à vide $V_{CO}=1.356$ V et une valeur du courant de court-circuit $I_{cc}=10.21$ mA/cm². Ce qui donne un facteur de forme de 71.95% et un rendement électrique de 9.9613 %.

IV.2.2. Caractéristiques de la cellule solaire à double jonctions

Les paramètres de la cellule solaire à double jonctions (a-SiGe:H/ μ c-Si:H) sont : une couche d'Al (200 nm), une couche d'Ag (10 nm), une couche de ZnO (10 nm). Une cellule inférieure (Bottom Cell), constituée de trois couches minces de Si déposées comme suit *n- μ c-Si:H* (15 nm) / *i- μ c-Si:H* (2,2 μ m) / *p- μ c-Si:H* (20 nm) avec un fort dopage de 10²⁰ at/cm³. Une cellule supérieure (Top Cell) composée de trois couches minces de SiGe amorphe déposée comme suit *n-a-SiGe:H* (15 nm) / *i-a-SiGe:H* (200 nm) / *p-a-SiGe:H* (20 nm) avec un fort dopage de 10²⁰ at/cm³ ; une couche de ZnO (500 nm), une couche de SiO₂ (500 nm).

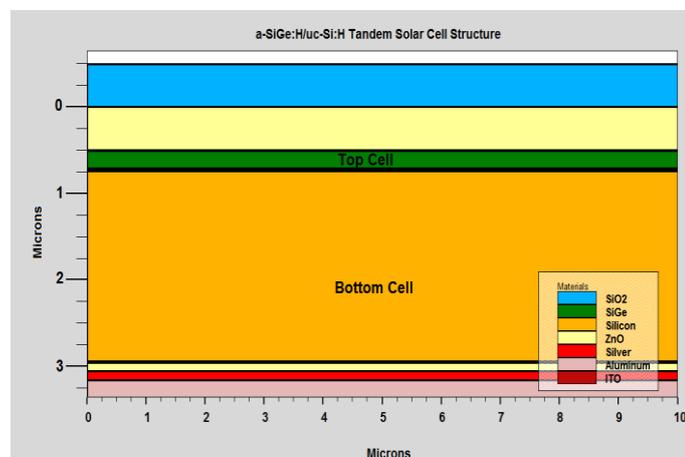


Figure IV. 19 Structure de la cellule micromorphe a-SiGe:H/ μ c-Si:H

IV.2.2.1. Spécification des électrodes

La couche ZnO utilisée généralement comme photoélectrode (anode) offre un grand avantage électrique. En effet, elle augmente la collecte de charge par l'électrode due à la mobilité des électrons très élevée engendrée par l'écart de bandes. Sa large bande interdite directe fait de lui un candidat prometteur comme photoélectrode pour les cellules photovoltaïques. Ceci améliore le rendement de conversion.

Pour la cathode, nous utilisons la métallisation à double contact, où la première couche en Ag. Elle forme un bon contact électrique et mécanique et a une bonne conductivité. La deuxième couche en Al présente une bonne conductivité de ligne pour minimiser les pertes de la résistivité dans la structure. Elle est stable dans l'environnement oxydant et a une longue durée de vie.

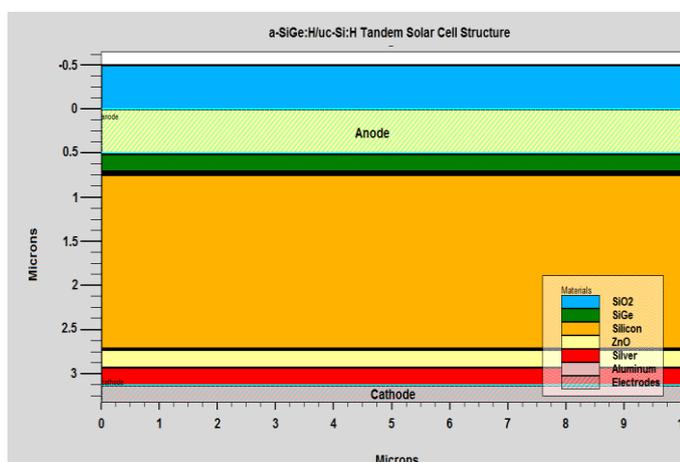


Figure IV. 20 Spécification des électrodes dans la structure a-SiGe:H/ μ c-Si:H

IV.2.2.2. Caractéristique I-V de la cellule a-SiGe:H/ μ c-Si:H

- Sans l'ajout d'une couche intermédiaire

La figure IV.21, présente la caractéristique I-V de la cellule solaire, où nous avons juxtaposé de deux jonctions p-i-n (une jonction amorphe et une microcristalline).

Nous remarquons d'après la figure IV.21, que la juxtaposition de deux jonctions donne une mauvaise allure de I-V du point de vu électrique. D'où la nécessité d'ajouter une couche intermédiaire sous forme d'une électrode pour séparer les deux jonctions.

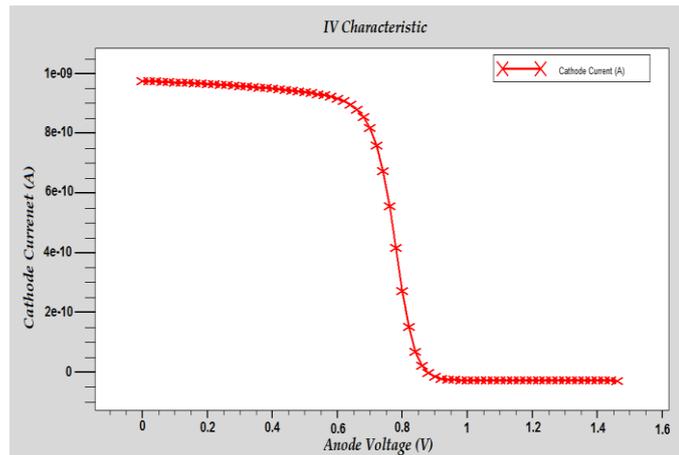


Figure IV. 21 Caractéristique I-V de la cellule micromorphe a-SiGe:H/ μ c-Si:H sans une couche intermédiaire

- Avec l'ajout d'une couche intermédiaire

L'ajout d'une couche intermédiaire de l'oxyde d'Indium-Etain (ITO) sous forme d'une troisième électrode permet le passage entre les couches de SiGe amorphe et les couches de Si microcristallin. Cette électrode superpose exactement la couche intermédiaire avec la liaison d'une résistance localisée, force le flux de courant de l'anode à la cathode et empêche tout courant dans l'électrode. Cette cathode est nommée Com, ce qui est représenté sur la figure IV.22.

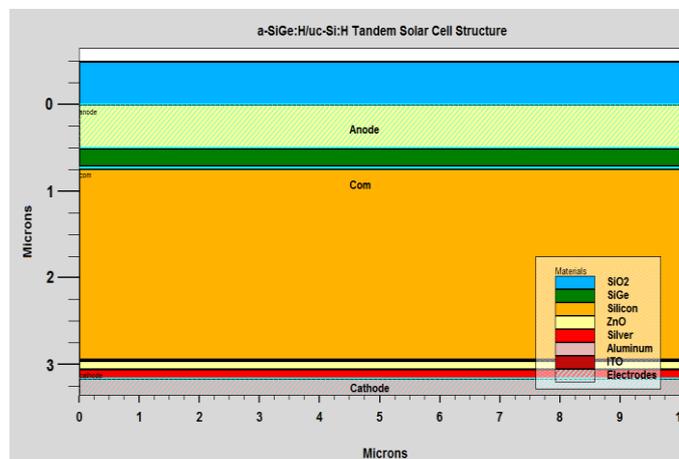


Figure IV. 22 Ajout d'une 3^{ème} électrode dans la structure a-SiGe:H/ μ c-Si:H

Physiquement, elle peut être justifiée par le fait que la couche intermédiaire agit comme une résistance sans pour cela quitter la limitation significative de courant. La valeur de la résistance peut être utilisée pour ajuster la quantité de courant qui circule à travers l'autre électrode en commandant ainsi la résistance de la couche intermédiaire.

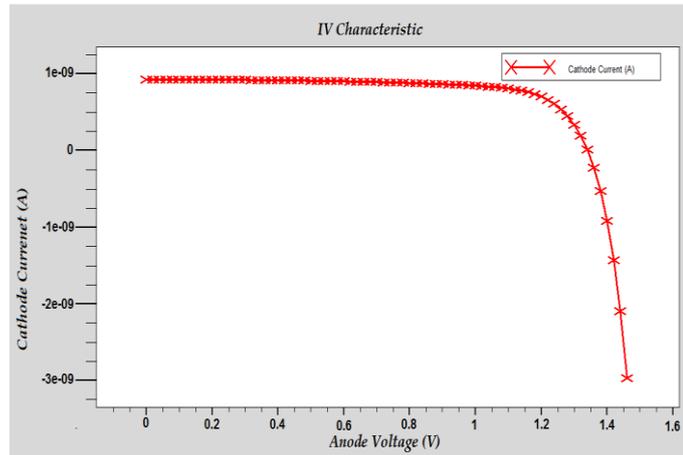


Figure IV. 23 Caractéristique I-V de la cellule micromorphe a-SiGe:H/ μ c-Si:H avec l'ajout d'une 3^{ème} électrode.

La figure IV.23, nous donne : une valeur de la tension à vide $V_{CO} = 1.3734$ V et une valeur du courant de court-circuit $I_{cc} = 10.4676$ mA/cm². Ce qui donne un facteur de forme de 72.8534 % et un rendement électrique de 10.4735 %.

IV.2.2.3. Optimisation des dimensions

Dans une cellule solaire à multijonctions, chaque cellule se comporte comme une source de courant. Toutes les sources de courant sont connectées en série. En conséquence, le courant total généré par la structure est le minimum des courants subcellulaires (Chowdhury, 2015). Pour cette raison, les dimensions doivent être optimisées pour obtenir le meilleur courant possible afin de maximiser le rendement de conversion. Nous faisons varier l'épaisseur de chaque cellule individuellement et nous voyons quelles sont les dimensions des épaisseurs qui nous donnent des meilleurs résultats. La figure IV.24, représente la variation de I_{cc} avec l'épaisseur de la cellule supérieure (Top Cell) de 150 à 260 nm.

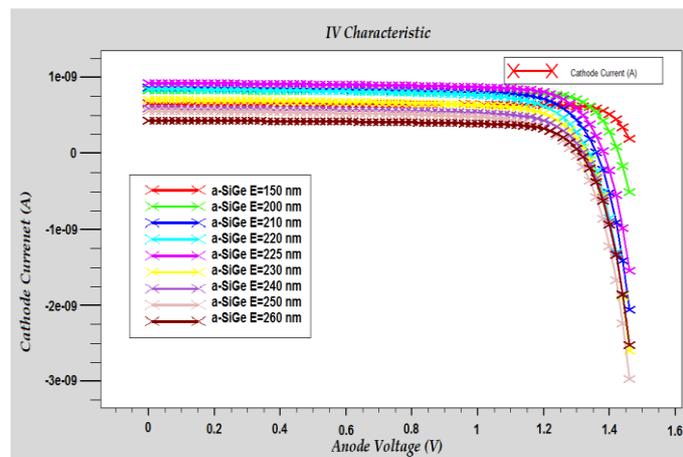


Figure IV. 24 Caractéristiques I-V en variant l'épaisseur de cellule supérieure 'Top Cell' a-SiGe

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.1).

Tableau IV. 1 Résultats de la variation de l'épaisseur de la cellule supérieure.

	V_{co} (V)	I_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
E=150 nm	1.43314	8.5591	81.2948	9.97193
E=200 nm	1.42709	8.29133	81.0804	9.59382
E=210 nm	1.39633	9.8439	77.3142	10.6271
E=220 nm	1.39109	10.0017	76.5579	10.6517
E=225 nm	1.39155	9.98796	76.1695	10.5866
E=230 nm	1.38628	10.1512	75.8719	10.6770
E=240 nm	1.38196	10.2898	75.0663	10.6745
E=250 nm	1.37753	10.4162	74.3507	10.6683
E=260 nm	1.37301	10.5276	73.6214	10.6416

A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.24 et tableau IV.1), nous remarquons qu' I_{cc} maximal est donné pour une épaisseur de la cellule supérieure de 230 nm, ce qui correspond au meilleur rendement électrique avec une valeur de 10.677 %.

La figure IV.25, représente la variation de I_{cc} avec l'épaisseur de la cellule inférieure (Bottom Cell) de 1 à 3 μm .

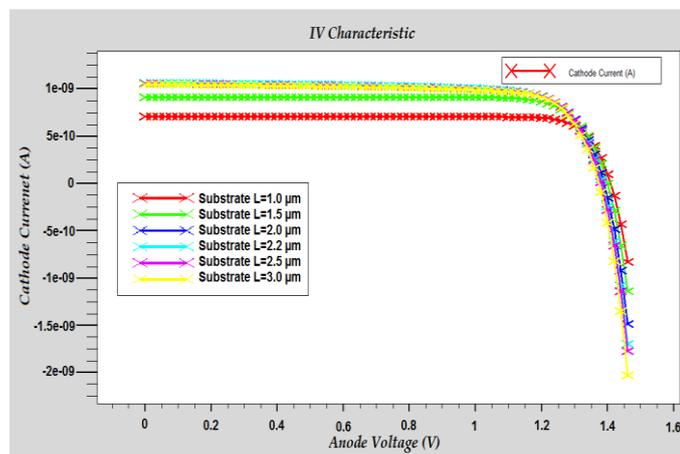


Figure IV. 25 Caractéristiques I-V en variant l'épaisseur de cellule inférieure 'Bottom Cell'.

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.2).

Tableau IV. 2 Résultats de la variation de l'épaisseur de la cellule inférieure 'Bottom Cell'.

	V _{co} (V)	I _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
E=1.0 μm	1.40864	07.06283	84.7204	08.42882
E=1.5 μm	1.39974	09.1475	80.9974	10.37100
E=2.0 μm	1.38847	10.6095	74.8593	11.02750
E=2.2 μm	1.38622	10.6784	74.9733	11.09800
E=2.5 μm	1.38298	10.6538	75.6475	11.14589
E=3.0 μm	1.38115	10.5225	76.2010	11.07440

A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.25 et tableau IV.2), nous remarquons que I_{cc} maximal est donné pour une épaisseur de cellule inférieure de 2.5 μm, ce qui correspond au meilleur rendement avec une valeur de 11.14589 %.

IV.2.2.4. Choix du matériau

Les matériaux semi-conducteurs les plus largement utilisés sont Si et Ge. Si est le matériau le plus utilisé en électronique compte tenu de son abondance naturelle, de la facilité de son usinage, de son faible coût et de sa non toxicité. C'est l'élément de base des premières générations de cellules photovoltaïques (Demichel, 2010).

Par contre, Ge est plus coûteux à mettre en œuvre à l'échelle industrielle, mais il présente des propriétés de transport intéressantes avec notamment une mobilité des charges plus élevée que celle du Si (Boukhicha, 2011). Par ailleurs, le Ge est un matériau compatible en intégration avec la technologie basée sur Si. Si et Ge présentent des similitudes structurales en cristallographie et en électronique. Le désaccord de maille entre Si et Ge est de 4,2%.

Tout ceci fait que le Ge est intéressant pour des applications photovoltaïques (sous forme dopée).

- Cellule supérieure (Top Cell)

Pour voir l'effet de l'incorporation du Ge dans la structure, nous avons étudié trois cellules amorphes différentes : la première est à base du Si, la deuxième est à base du Ge et la troisième à base du SiGe.

La figure suivante présente la caractéristique I-V de la structure micromorphe avec la variation des couches absorbantes de la cellule supérieure amorphe.

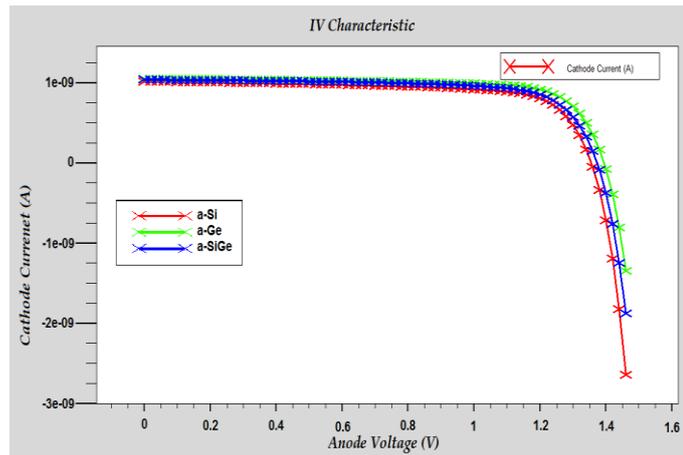


Figure IV. 26 Caractéristiques I-V de la cellule supérieure ‘Top Cell’ pour a-Si:H, a-Ge:H et a-SiGe:H

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant (tableau IV.3).

Tableau IV. 3 Résultats de la variation du matériau de la cellule supérieure.

	V_{co} (V)	I_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
a-Si	1.35582	10.2192	71.9486	09.96876
a-Ge	1.39428	10.6208	75.1589	11.12980
a-SiGe	1.37338	10.4676	72.8534	10.47339

La figure IV.26 et le tableau IV.3, montrent que les cellules en Ge et SiGe amorphes ont un meilleur rendement que celle en Si. Cependant, le rendement de la cellule en Ge amorphe reste le plus élevé. Par conséquent, l’incorporation du Ge dans le Si augmente le rendement.

- Cellule inférieure (Bottom Cell)

La figure suivante présente la caractéristique I-V de la structure micromorphe avec trois cellules inférieures microcristallines différentes tout en gardant la même épaisseur. La première est Si, la seconde est en Ge et la troisième en SiGe. Ceci, dans un but d’étudier l’effet de l’incorporation du Ge dans la structure.

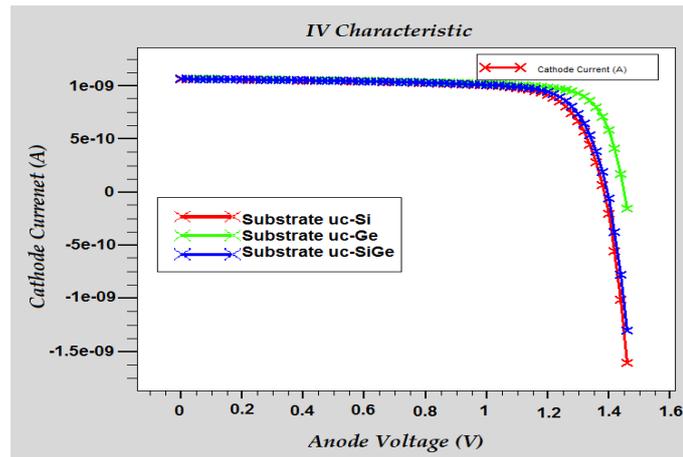


Figure IV. 27 Caractéristiques I-V de la cellule inférieure ‘Bottom Cell’ pour $\mu\text{c-Si}$, $\mu\text{c-Ge}$ et $\mu\text{c-SiGe}$

Les résultats représentés dans la figure IV.27, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.4).

Tableau IV. 4 Résultats de la variation du matériau de la cellule inférieure.

	V_{co} (V)	I_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
$\mu\text{c-Si}$	1.38516	10.6552	75.0056	11.07019
$\mu\text{c-Ge}$	1.45056	10.6961	78.4785	12.17620
$\mu\text{c-SiGe}$	1.39553	10.6713	76.2981	11.36240

A partir de la figure IV.27 et le tableau IV.4, nous remarquons, que I_{cc} maximal est celui de la cellule en Ge ce qui donne le rendement le plus élevé. Aussi, l’introduction du Ge dans le Si, permet d’augmenter le rendement.

IV.2.2.5. Effet du dopage sur la cellule

La figure IV.28, représente la variation du I_{cc} avec le dopage de la cellule supérieure amorphe (Top Cell) de 10^{15} à 10^{20} at/cm³. La cellule étudiée contient trois couches minces : la première est de type n, la deuxième est de type p et une troisième est intrinsèque. Les deux dopants utilisés sont respectivement l’As et le B.

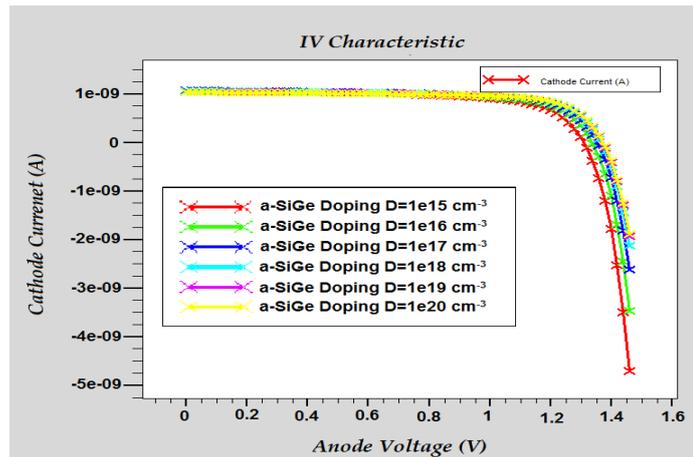


Figure IV. 28 Caractéristiques I-V de la cellule supérieure pour différents dopages.

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.5).

Tableau IV. 5 Résultats de la variation du dopage de la cellule supérieure.

	V_{co} (V)	I_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
$D=10^{15}$ cm ⁻³	1.31143	10.7504	66.4826	09.37298
$D=10^{16}$ cm ⁻³	1.33849	10.7902	68.3411	09.87021
$D=10^{17}$ cm ⁻³	1.35505	10.8011	69.7607	10.21019
$D=10^{18}$ cm ⁻³	1.36646	10.7064	71.1394	10.40759
$D=10^{19}$ cm ⁻³	1.37181	10.5700	72.3398	10.48929
$D=10^{20}$ cm ⁻³	1.37338	10.4676	72.8534	10.47339

A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.28 et tableau IV.5), nous remarquons que I_{cc} maximal est donné pour un dopage de cellule supérieure (Top Cell) de 10^{19} at/cm³. Nous arrivons donc à la conclusion que pour la cellule supérieure, le meilleur rendement est obtenu lorsqu'elle est fortement dopée.

La figure IV.29, représente la variation de I_{cc} avec le dopage de la cellule inférieure microcristalline (Bottom Cell) de 10^{15} à 10^{20} at/cm³. Cette cellule contient trois couches minces : la première est de type n, la deuxième est de type p et la troisième est intrinsèque. Les deux dopants utilisés sont respectivement As et B.

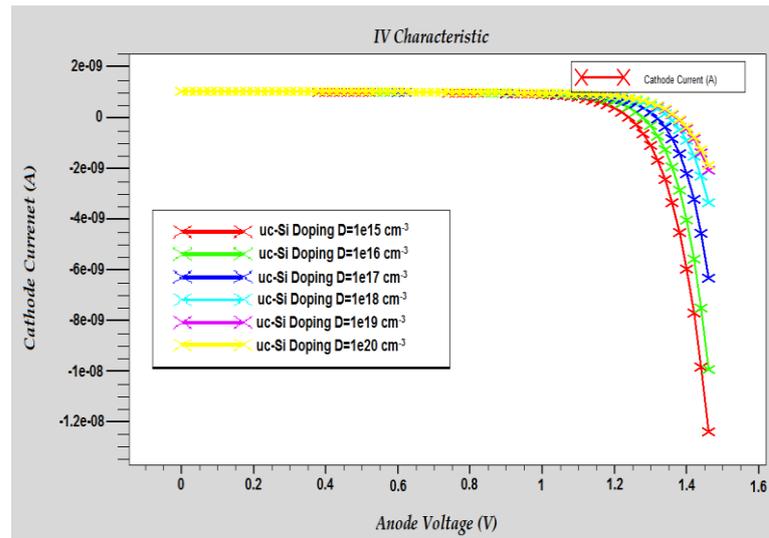


Figure IV. 29 Caractéristiques I-V de la cellule inférieure pour différents dopages
Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.6).

Tableau IV. 6 Résultats de la variation du dopage de la cellule inférieure.

	V_{co} (V)	I_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
$D=10^{15}$ cm ⁻³	1.24083	10.3472	71.0021	09.11604
$D=10^{16}$ cm ⁻³	1.27961	10.4257	72.798	09.71186
$D=10^{17}$ cm ⁻³	1.31591	10.4552	73.4782	10.10920
$D=10^{18}$ cm ⁻³	1.35089	10.4649	73.3766	10.37319
$D=10^{19}$ cm ⁻³	1.37005	10.4673	72.9440	10.46069
$D=10^{20}$ cm ⁻³	1.37338	10.4676	72.8534	10.47339

A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.29 et tableau IV.6), nous remarquons que I_{cc} maximal est donné pour un dopage de la cellule inférieure de 10^{20} at/cm³. Nous arrivons donc à la conclusion que pour la cellule inférieure, le meilleur rendement est obtenu lorsqu'elle est fortement dopée.

IV.2.2.6. Rendement quantique

Les recombinaisons de surface avant et arrière de la cellule, ainsi que la faible longueur de diffusion des porteurs sont des facteurs qui réduisent le rendement quantique. D'où la nécessité d'avoir une bonne passivation des surfaces d'une cellule afin de diminuer les recombinaisons en surface avant et arrière de la cellule, et de réduire les pertes du rendement quantique (Maydell et al., 2014).

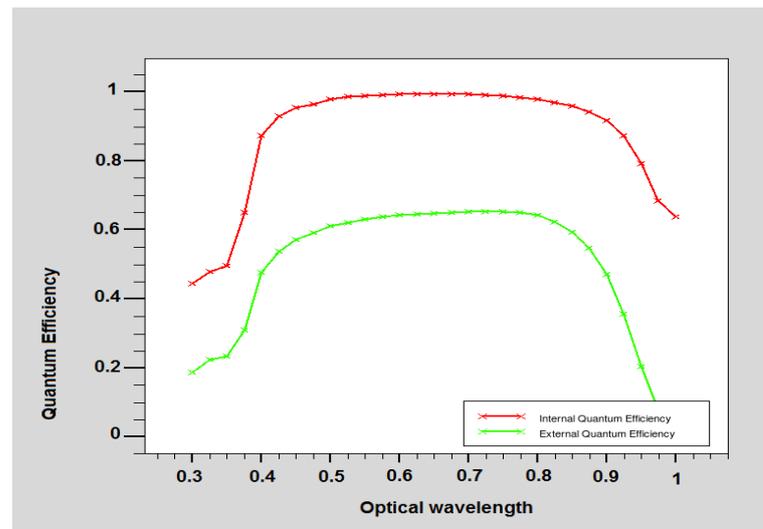


Figure IV. 30 Rendement quantique de la cellule

La figure IV.30 montre que l'incorporation du Ge dans le Si, augmente le coefficient d'absorption. En effet, l'épaisseur de la couche de l'absorbeur restant constante, implique que l'incorporation de Ge provoque une augmentation du rendement quantique externe et par conséquent l'augmentation du rendement électrique.

IV.2.2.7. Paramètres de la structure optimisée

Les paramètres de la cellule solaire à double jonctions (a-SiGe:H/ μ c-Si:H) obtenus après l'optimisation, sont 230 nm pour l'épaisseur de la cellule supérieure et 2.5 μ m pour la cellule inférieure et les deux sont fortement dopées (10^{20} at/cm³). Le meilleur rendement obtenu est 11.14589 %.

IV.2.3. Caractéristiques de la cellule solaire à triple jonction

IV.2.3.1 Introduction

Les caractéristiques I-V de la cellule solaire à triple jonction modélisée précédemment sont étudiées séparément pour chaque sous-cellule puis pour la cellule globale, pour différents paramètres (épaisseurs, dopage, dimensions, etc.).

Les dimensions sont alors optimisées pour obtenir le maximum de I_{cc} possible et la composition de la cellule globale est modifiée, afin d'analyser son effet sur le rendement global de la cellule. Enfin, une structure optimale est sélectionnée avec le rendement le plus élevé et ses couches supplémentaires sont encore optimisées pour obtenir le plus haut rendement de la cellule.

IV.2.3.2 Structure simulée

Les paramètres structuraux de la cellule solaire à triple jonction modélisée et simulée sont : une couche *d'Al* (200 nm), une couche de *ZnO* (10 nm) ; Une cellule inférieure (Bottom Cell) composée de trois couches de Si microcristallin déposées comme suit : *n- μ c-Si:H* (15 nm) / *i- μ c-Si:H* (2,2 μ m) / *p- μ c-Si:H* (20 nm) avec un fort dopage. Une cellule en milieu (Middle Cell) constituée de trois couches de SiGe amorphe déposées comme suit : *n-a-SiGe:H* (15 nm)/*i-a-SiGe:H* (500 nm)/*p-a-SiGe:H* (20 nm) avec un dopage fort (10^{20} at/cm³). Une cellule supérieure (Top Cell) contient trois couches de Si amorphe déposées comme suit *n-a-Si:H*(15 nm) / *i-a-Si:H* (200 nm) / *p-a-Si:H*(10 nm) avec un fort dopage (10^{20} at/cm³) une couche de *ZnO:Al* (500 nm), une couche de SiO₂ (500 nm). (Zeman, 2010), Voir figure IV.31.

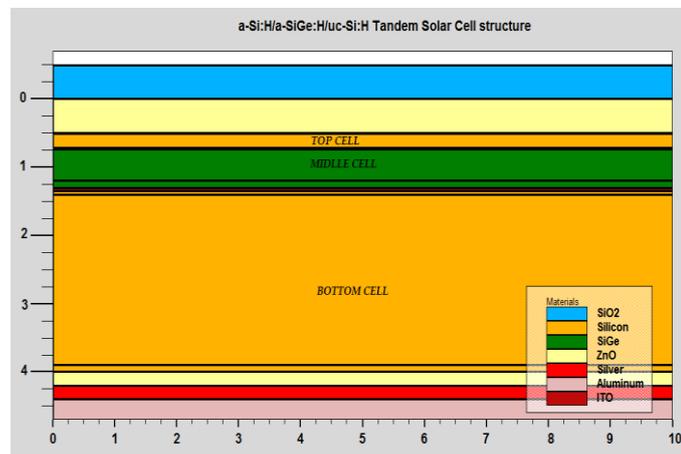


Figure IV. 31 Structure de la cellule à triple jonctions a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si:H

IV.2.3.3 Spécification des électrodes

Comme c'était cité dans le cas d'une cellule à double jonctions, l'emploi du ZnO comme photoélectrode (anode), augmente la collecte de charge par l'électrode, et augmente la mobilité des électrons. Ceci facilite le transport des électrons et améliore le rendement de conversion.

Pour la cathode, la métallisation à double contact est utilisée, où la première couche est Ag, pour sa bonne conductivité. La deuxième couche en Al présente une bonne conductivité et minimise les pertes de résistivité dans la structure.

IV.2.3.4 Caractéristique IV obtenue

- Sans l'ajout des couches intermédiaires

La juxtaposition de trois jonctions p-i-n, chacune est constituée d'une jonction p-i-n est réalisée par la déposition d'une jonction à base de Si amorphe, une autre jonction à base de SiGe amorphe et une dernière jonction à base de Si microcristallin. La figure IV.32, présente la caractéristique IV de la cellule solaire à triple jonction obtenue.

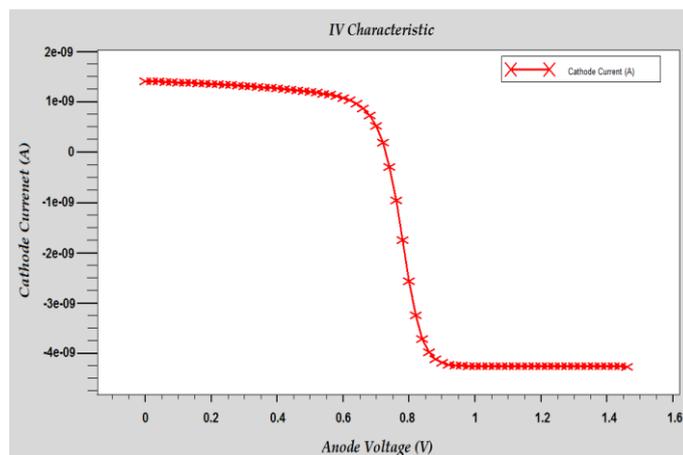


Figure IV. 32 Caractéristique I-V de la cellule a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si:H sans couches intermédiaires

Nous remarquons d'après la figure IV.32, que la juxtaposition de deux jonctions donne une mauvaise allure de I-V du point de vu électrique. D'où la nécessité de l'ajout d'une couche intermédiaire sous forme d'une électrode pour séparer deux jonctions successives.

- Avec l'ajout d'une couche intermédiaire

L'ajout de deux couches intermédiaires de l'oxyde d'Indium-Etain (ITO), sous forme des électrodes, permet le passage d'une part, à l'interface entre les couches de Si amorphe et les couches de SiGe amorphe, et d'autre part, à l'interface entre les couches de SiGe amorphe et les couches de Si microcristallin. Ces deux électrodes superposent exactement les deux couches intermédiaires.

Physiquement, elles peuvent être justifiées par le fait que les deux couches intermédiaires agissent comme des résistances sans quitter la limitation significative de courant. Les valeurs des résistances peuvent être utilisées pour ajuster la quantité de courant à circuler à travers l'autre électrode en commandant ainsi les résistances des couches intermédiaires.

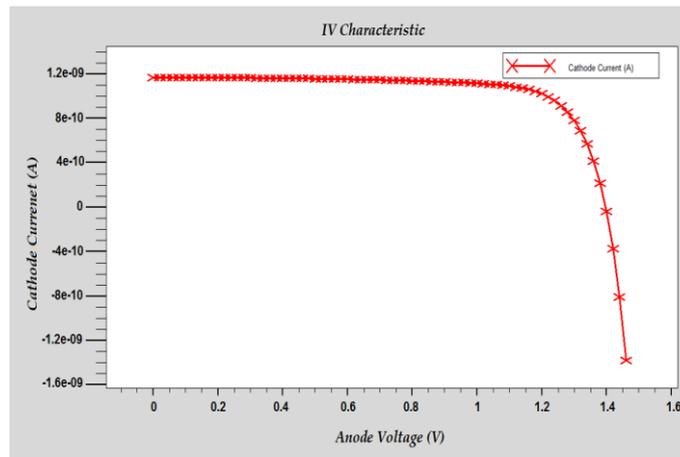


Figure IV. 33 Caractéristique I-V de la cellule a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si:H avec deux couches intermédiaires

La figure IV.33, représente la caractéristique I-V obtenue après la simulation de la cellule a-Si:H /a-SiGe:H/ μ c-Si:H. Nous obtenons une valeur de tension $V_{CO}=1.3966$ V et une valeur de $I_{cc}=11.477$ mA/cm². Ce qui donne un facteur de forme de 77.1403 % et un rendement électrique de 12.36467 %.

IV.2.3.5 Optimisation des dimensions

Dans une configuration en double jonction, l'épaisseur de la couche absorbante est dans la plage de 1,3 à 1,7 μ m. Pour la triple jonction, l'épaisseur de la couche absorbante de la couche inférieure doit être augmentée à environ 2,5 μ m en raison de la faible absorption du matériau. Cela présente en fait l'inconvénient d'avoir des temps de contact longs dans la production et donc des coûts de production élevés (Maydell et al., 2014).

Une solution pour surmonter ce problème est d'optimiser le piégeage de la lumière en utilisant des contacts frontaux d'oxyde conducteur transparent de haute diffusion et de nouvelles structures de rétrodiffusion. D'autre part, il est également possible d'augmenter le taux de dépôt.

Un autre moyen intéressant est de diminuer l'épaisseur de la couche absorbante. Cependant, dans le meilleur des cas, tous les points mentionnés ci-dessus doivent être optimisés (Maydell et al., 2014). Nous avons choisi de diminuer l'épaisseur du film est d'augmenter le coefficient d'absorption des matériaux utilisés.

Dans une cellule solaire à multijonctions, chaque cellule se comporte comme une source de courant. Toutes les sources de courant sont connectées en série. En conséquence, le courant total généré par la structure est le minimum des courants subcellulaires (Chowdhury, 2015).

Pour cette raison, les dimensions doivent être optimisées pour obtenir le meilleur courant possible afin de maximiser le rendement de conversion.

Nous faisons varier l'épaisseur de chaque cellule individuellement et nous voyons quelles sont les dimensions des épaisseurs qui donnent les meilleurs résultats.

La figure IV.34, représente la variation de I_{cc} avec l'épaisseur de la cellule supérieure (Top Cell) de 200 à 260 nm.

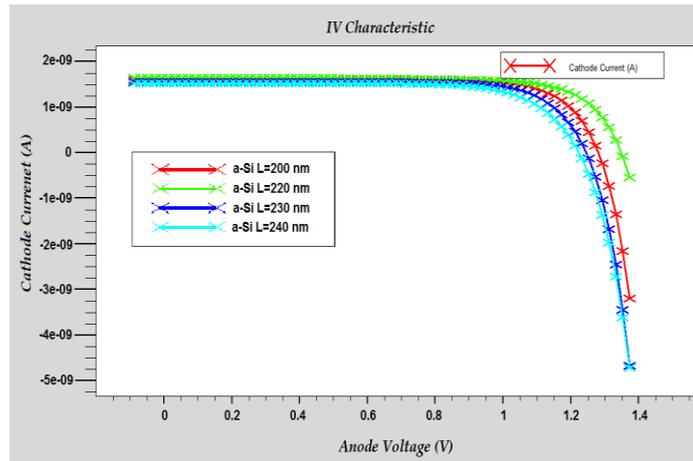


Figure IV. 34 Caractéristiques I-V en variant l'épaisseur de cellule supérieure a-Si:H

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.7).

Tableau IV. 7 Résultats de la variation de l'épaisseur de la cellule supérieure.

	V_{co} (V)	I_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
L=200 nm	1.3696	12.1056	74.1032	12.2862
L=220 nm	1.3714	12.1064	74.1039	12.3033
L=230 nm	1.3689	12.1045	74.1011	12.2784
L=240 nm	1.3687	12.1043	73.9841	12.2571

A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.34 et tableau IV.7), nous remarquons que I_{cc} maximal est donné pour une épaisseur de la cellule supérieure de 220 nm, ce qui correspond au meilleur rendement avec une valeur de 12.3033 %.

La figure IV.35, représente la variation de I_{cc} avec l'épaisseur de la cellule moyenne (Middle Cell) de 300 à 700 nm.

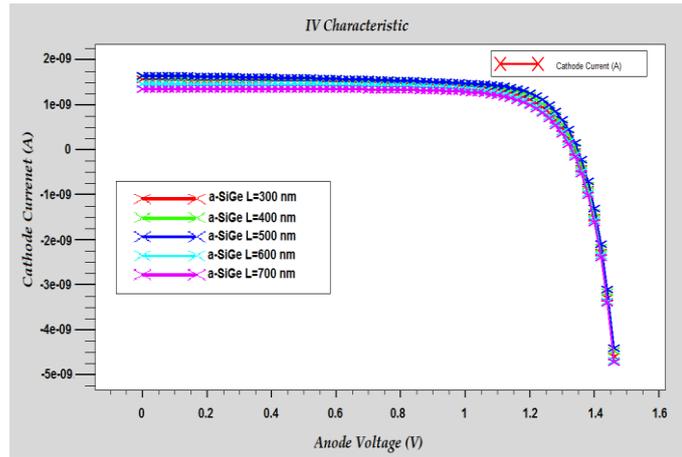


Figure IV. 35 Caractéristiques I-V de la cellule moyenne ‘Middle Cell’ a-SiGe:H pour différentes épaisseurs. Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.8).

Tableau IV. 8 Résultats de la variation de l’épaisseur de la cellule moyenne

	V _{co} (V)	I _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
L=300 nm	1.3940	12.0955	71.6414	12.07954
L=400 nm	1.3787	12.1458	72.4045	12.12443
L=500 nm	1.3766	12.2224	72.4810	12.19518
L=600 nm	1.3820	11.8853	72.7918	11.95640
L=700 nm	1.3885	11.8119	72.691	11.92192

A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.35 et tableau IV.8), nous remarquons que la valeur maximale de I_{cc} est donnée pour une épaisseur de la cellule moyenne de 500 nm. Ce qui correspond au meilleur rendement avec une valeur de 12.1952 %.

La figure IV.36, représente la variation de I_{cc} avec l’épaisseur de la cellule inférieure (Bottom Cell) de 1.5 à 3 μm.

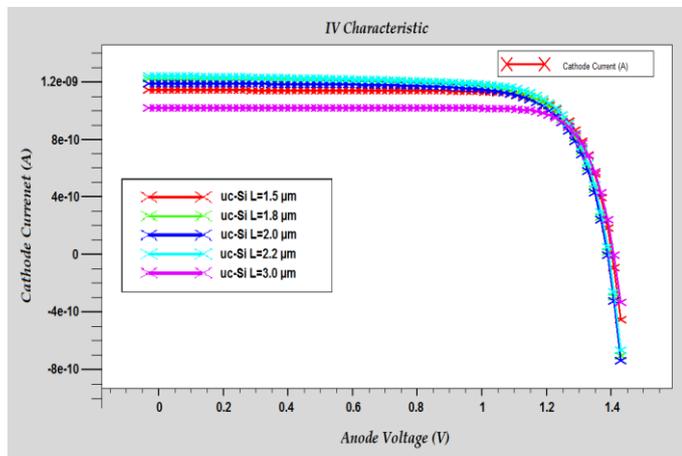


Figure IV. 36 Caractéristiques I-V en variant l’épaisseur de cellule inférieure (Bottom Cell)

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.9).

Tableau IV. 9 Résultats de la variation de l'épaisseur de la cellule inférieure.

	V _{co} (V)	I _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
L=1.5 μm	1.3924	12.1424	71.1697	12.0327
L=1.8 μm	1.3923	12.2660	71.1708	12.1545
L=2.0 μm	1.3921	12.2565	71.7842	12.2480
L=2.2 μm	1.3922	12.2670	72.4340	12.3703
L=3.0 μm	1.3924	10.9120	75.0360	10.7931

A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.36 et tableau IV.9), nous remarquons que la valeur maximale obtenue de I_{cc} est donné pour une épaisseur de la cellule inférieure de 2.2 μm, ce qui correspond au meilleur rendement avec une valeur de 12.3703 %.

A partir des résultats obtenus dans les trois figures ci-dessus (figure IV.34, figure IV.35 et figure IV.36), nous arrivons donc à la conclusion que pour la structure a-SiGe/a-SiGe/μc-Si, I_{cc} le plus élevé est obtenu lorsque l'épaisseur de cellule inférieure est de 2.2 μm, une épaisseur de cellule moyenne de 500 μm et l'épaisseur de cellule supérieure est de 220 nm. Le meilleur rendement est de 12.36 %.

IV.2.3.6 Choix du matériau de la cellule moyenne (Middle Cell)

Pour étudier l'influence du matériau de la cellule moyenne (Middle Cell), nous utilisons de type de matériaux: le SiGe amorphe et le SiGe microcristallin.

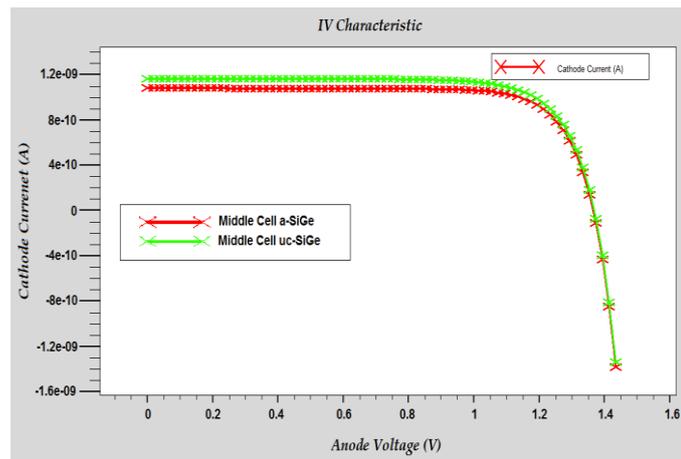


Figure IV. 37 Caractéristiques I-V de la cellule moyenne 'Middle Cell' : a-SiGe et μc-SiGe

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.10).

Tableau IV. 10 Résultats de la variation du matériau de la cellule moyenne.

	V _{co} (V)	I _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
a-SiGe	1.3966	11.4770	77.1403	12.3646
μc-SiGe	1.41805	11.6136	78.8662	12.9882

D'après les résultats représentés dans la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.37 et tableau IV.10), nous remarquons que I_{cc} maximal est donné par le matériau μc-SiGe. Nous arrivons donc à la conclusion que l'emploi du SiGe microcristallin comme couche absorbante est mieux que SiGe amorphe.

IV.2.3.7 Dopage de la cellule

- Dopage de la cellule supérieure (Top Cell)

La figure suivante (figure IV.38) représente la variation de I_{cc} avec le dopage de la cellule supérieure (Top Cell) de 10¹⁵ à 10²⁰ at/cm³. Cette cellule contient trois couches minces : la première est de type n, la deuxième est de type p et la troisième est intrinsèque. Les deux dopants utilisés sont respectivement As et le B.

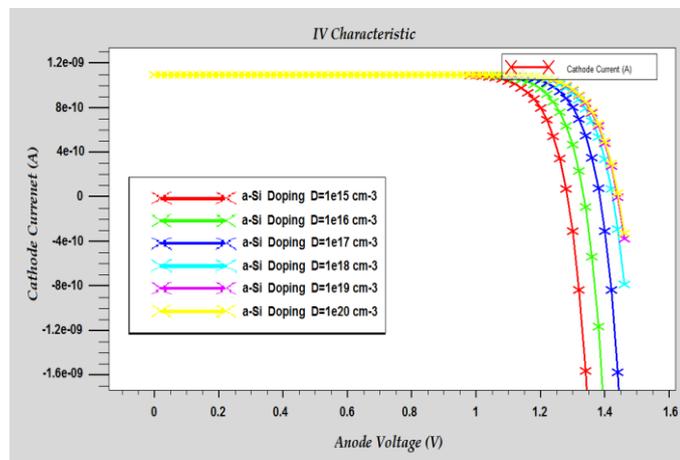


Figure IV. 38 Caractéristiques I-V de la cellule supérieure 'Top Cell' pour différents dopages

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.11).

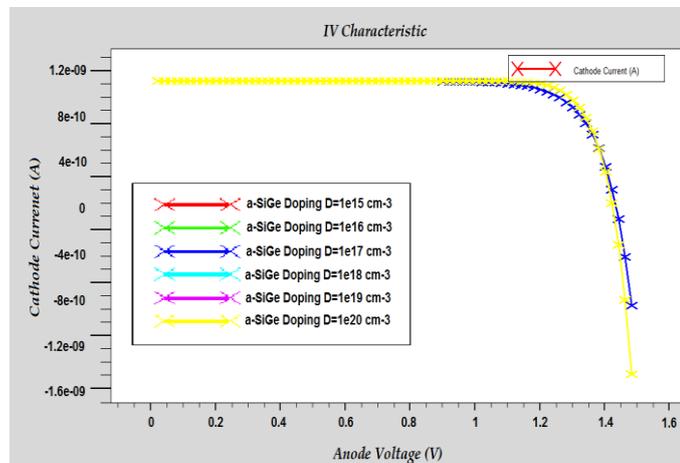
Tableau IV. 11 Résultats de la variation du dopage de la cellule supérieure.

	V _{co} (V)	I _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
D=10 ¹⁵ cm ⁻³	1.3720	10.8976	74.6998	11.1687
D=10 ¹⁶ cm ⁻³	1.3894	10.8878	75.7184	11.4543
D=10 ¹⁷ cm ⁻³	1.3981	11.3647	75.4334	11.9856
D=10 ¹⁸ cm ⁻³	1.4078	11.6579	74.3862	12.2082
D=10 ¹⁹ cm ⁻³	1.4439	11.7130	73.1218	12.3666
D=10 ²⁰ cm ⁻³	1.4440	11.7130	73.1218	12.3675

A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.38 et tableau IV.11), nous observons que I_{cc} maximal est donné pour un dopage de la cellule supérieure (Top Cell) de 10²⁰ at/cm³, ce qui correspond au meilleur rendement avec une valeur de 12.3675 %.

- Dopage de la cellule moyenne (Middle Cell)

La figure IV.39, représente la variation de I_{cc} avec le dopage de la cellule moyenne (Middle Cell) de 10¹⁵ à 10²⁰ at/cm³. Cette cellule contient trois couches minces : la première est de type n, la deuxième est de type p et la troisième est intrinsèque. Les deux dopants utilisés sont respectivement As et le B.

**Figure IV. 39** Caractéristiques IV de la cellule moyenne (Middle Cell) pour différents dopages

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.12).

Tableau IV. 12 Résultats de la variation du dopage de la cellule moyenne.

	V _{co} (V)	I _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
D=10 ¹⁵ cm ⁻³	1.3965	11.5168	76.8747	12.3639
D=10 ¹⁶ cm ⁻³	1.3965	11.5168	76.8747	12.3639
D=10 ¹⁷ cm ⁻³	1.3965	11.5168	76.8747	12.3639
D=10 ¹⁸ cm ⁻³	1.3965	11.5168	76.8747	12.3639
D=10 ¹⁹ cm ⁻³	1.3966	11.5160	76.8758	12.3641
D=10 ²⁰ cm ⁻³	1.3966	11.5160	76.8758	12.3641

A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.39 et tableau IV.12), nous observons que I_{cc} maximal est donné pour un dopage de la cellule moyenne de 10²⁰ at/cm³, ce qui correspond au meilleur rendement avec une valeur de 12.3641%.

- Dopage de la cellule inférieure 'Bottom Cell'

La figure suivante (figure IV.40), représente la variation du I_{cc} avec le dopage de la cellule inférieure (Bottom Cel)' de 10¹⁵ à 10²⁰ at/cm³. Cette cellule contient trois couches minces : la première est de type n, la deuxième est de type p et la troisième est intrinsèque. Les deux dopants utilisés sont respectivement As et le B.

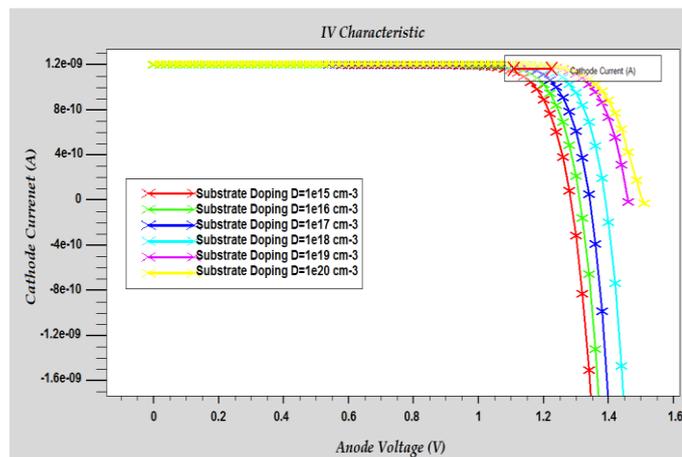


Figure IV. 40 Caractéristiques I-V de la cellule inférieure $\mu\text{-Si:H}$ pour différents dopages

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.13).

Tableau IV. 13 Résultats de la variation du dopage de la cellule inférieure.

	V _{co} (V)	I _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
D=10 ¹⁵ cm ⁻³	1.3869	10.5677	71.4080	10.4658
D=10 ¹⁶ cm ⁻³	1.3904	11.3969	72.4760	11.4847
D=10 ¹⁷ cm ⁻³	1.4090	11.4201	73.1001	11.7625
D=10 ¹⁸ cm ⁻³	1.4199	11.4590	74.9766	12.1992
D=10 ¹⁹ cm ⁻³	1.4312	11.7440	73.1984	12.3032
D=10 ²⁰ cm ⁻³	1.4455	11.5303	74.1887	12.3651

A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.40 et tableau IV.13), nous remarquons que la valeur maximale obtenue de I_{cc} est donné pour un dopage de la cellule inférieure de 10²⁰ at/cm³, ce qui correspond au meilleur rendement avec une valeur de 12.3651 %.

A partir des trois figures ci-dessus (figure IV.37, figure IV.38 et figure IV.39), nous arrivons donc à la conclusion que pour la structure a-Si:H/a-SiGe:H/μc-Si:H, I_{cc} le plus élevé est obtenu lorsque les couches sont fortement dopées et le meilleur rendement de cette structure atteint 12.3651 %.

IV.2.2.8. Paramètres de la structure optimisée

Les paramètres de la cellule solaire à triple jonctions (a-SiGe:H/a-SiGe:H/μc-Si:H) obtenus après l'optimisation, sont 220 nm pour l'épaisseur de la cellule supérieure, 500 nm pour l'épaisseur de la cellule moyenne et 2.2 μm pour l'épaisseur de la cellule inférieure dont ces trois cellules sont fortement dopées (10²⁰ at/cm³). Le meilleur rendement obtenu est 12.3651 %.

IV.2.4. Caractéristiques de la cellule solaire à simple jonction avec nanofils

Les paramètres structuraux de la cellule solaire à simple jonction p-i-n modélisée et simulée sont : une couche de *SiO₂* (10 nm), une couche de *ZnO:Al* (20 nm), une couche du Si amorphe *n-a-Si:H* (20 nm), une couche du Si amorphe intrinsèque *i-a-Si:H* (50 nm), des nanofils du Su microcristallin *p-μc-NFs-Si:H* (*L*=2.5μm-*D*=100 nm), une couche du Si microcristallin *p-μc-Si:H* (5 μm) et une couche *d'Al* (150 nm), tel que le montre la figure suivante (Figure VI.41).

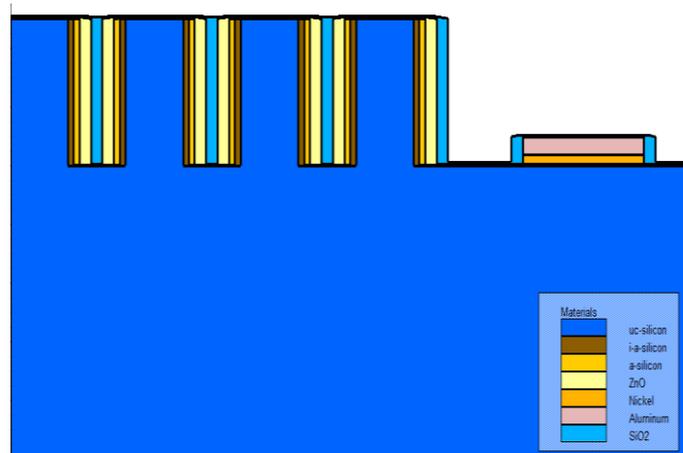


Figure IV. 41 Structure d'cellule solaire à simple jonction après simulation

Les cellules solaires doivent répondre à deux critères. Premièrement, elles doivent absorber la lumière, donc elles ont besoin d'un matériau actif suffisamment épais pour avoir une absorption maximale. Elles ont également besoin de collecter les électrons issus des paires électron-trou créées par les photons absorbés. Les nanofils offrent une alternative intéressante à cette problématique.

- D'une part, les nanofils peuvent absorber le long de leur longueur de grandes quantités de lumière ;
- D'autre part, l'intérêt des nanofils est de diminuer la distance qui existe entre la jonction n-p et le collecteur d'électrons (Brahiti, 2012).

La structure de la cellule solaire présentée dans la figure IV.41, rend plus facile et efficace la collecte de porteurs de charges minoritaires et la couche amorphe a-Si:H utilisée fournit une bonne passivation pour la surface et aide à la collecte des charges en même temps. (Monga, 2015).

IV.2.4.1. Caractéristique I-V de la cellule obtenue

La plus simple jonction semi-conductrice qui est utilisée dans les cellules solaires pour la séparation des porteurs de charge photogénérés est la jonction p-n. Pour faire varier la conductivité d'un semi-conducteur nous procédons à son dopage.

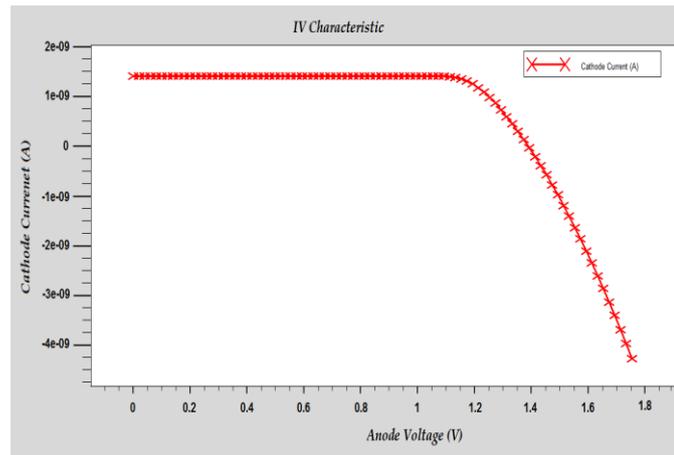


Figure IV. 42 Caractéristique I-V obtenue de cellule a-Si:H/NFSi/ μ c-Si:H après simulation

La figure IV.42 représente la caractéristique I-V obtenue de la cellule **a-Si:H/NFSi/ μ c-Si:H**, après simulation. La valeur de la tension en circuit ouvert est de 1.405 V et la valeur de courant de court-circuit est 13.03 mA/cm². Ce qui donne un facteur de forme de 71,69 % et un rendement électrique d'environ de 13.1244 %.

IV.2.4.2. Choix du matériau

- Nanofils

Pour étudier l'influence du matériau des nanofils sur notre structure d'étude, nous utilisons plusieurs matériaux : le Si, le Ge et le SiGe microcristallins.

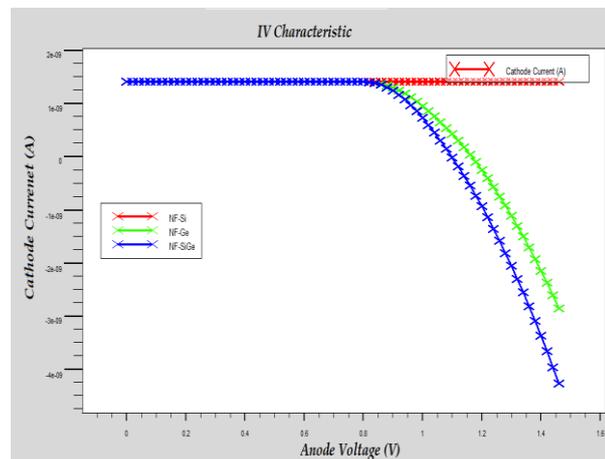


Figure IV. 43 Caractéristiques I-V de cellule à base de Nanofils de Si, Ge et SiGe

La figure IV.43 représente la caractéristique I-V de la cellule à base des nanofils de Si, Ge et de SiGe. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.14), en montrant la variation de I_{cc} avec le type du matériau des nanofils.

Tableau IV. 14 Résultats de la cellule simple jonction pour des nanofils Si, Ge et SiGe.

	V_{co} (V)	I_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
NFSi	1.4050	13.0300	71.6900	13.1244
NFGe	1.4294	13.2546	74.9874	14.2072
NFSiGe	1.4129	13.1078	72.2155	13.3743

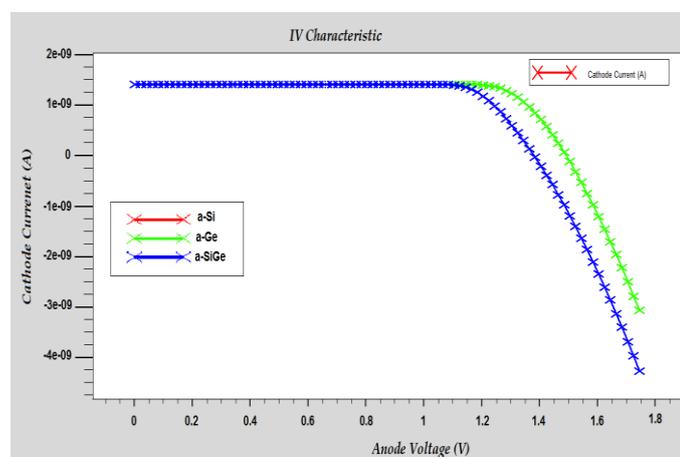
A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.43 et tableau IV.14), nous remarquons que I_{cc} maximal ainsi que le rendement le plus élevé sont donnés pour les nanofils de Ge. Aussi, l'incorporation du Ge dans Si, donc les nanofils de SiGe augmentent la valeur du courant tout en avoisinant à celle au Ge, leur rendement atteint 13.3743 %.

En effet, l'intérêt porté au Ge provient du fait qu'il a une grande mobilité des porteurs et un rayon de Bohr plus large que celui du silicium (Ge : 11 nm et Si : 4,3 nm). Les effets de confinement quantiques sont d'autant plus importants que le rayon des nanostructures est plus petit que le rayon de Bohr (Lauhon et al., 2002). Donc, les effets de confinement quantiques sont plus importants pour un diamètre de nanofil plus grand pour Ge que pour Si.

- Couche silicium-germanium amorphe (a-SiGe)

Malgré le développement récent des cellules solaires de Si microcristallin (μc -Si) et leur potentiel de remplacer des matériaux a-SiGe, celles à base de matériaux SiGe amorphe sont très utilisées, car elles présentent une tension en circuit ouvert plus élevée (V_{oc}), une bande de gap accordable, un bon rendement et un coût moins élevé (Wang et al., 2011).

Pour étudier l'effet du matériau de la couche amorphe, nous utilisons plusieurs matériaux : Si, Ge et SiGe amorphes.

**Figure IV. 44** Caractéristiques I-V des couches amorphes de Si, Ge et SiGe

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.15).

Tableau IV. 15 Résultats de la cellule pour des couches amorphes Si, Ge et SiGe.

	V_{co} (V)	I_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
a-Si	1.4050	13.0300	71.6900	13.1244
a-Ge	1.4234	13.2161	75.1344	14.1341
a-SiGe	1.4190	13.1049	72.7255	13.4755

A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.44 et tableau IV.15), nous remarquons que la couche amorphe en Ge présente la valeur la plus élevée de I_{cc} par rapport à la couche amorphe en Si. Aussi, l'introduction du Ge augmente la valeur de I_{cc} et celle du rendement de conversion qui atteint 13.4755 %.

- Couche silicium-germanium microcristalline ($\mu\text{c-SiGe}$)

Les couches silicium-germanium microcristallines $\mu\text{c-SiGe:H}$ peuvent être utilisées comme des couches absorbantes ultra-minces dans des cellules solaires multijonctions à base de Si. Plusieurs recherches ont confirmé qu'une concentration de Ge dans la couche supérieure à 20% conduit à une formation de défauts élevés (Maydell et al., 2014). Pour cela, dans nos travaux, pour $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ la variation de la concentration x de Ge est limitée à un maximum de 20%.

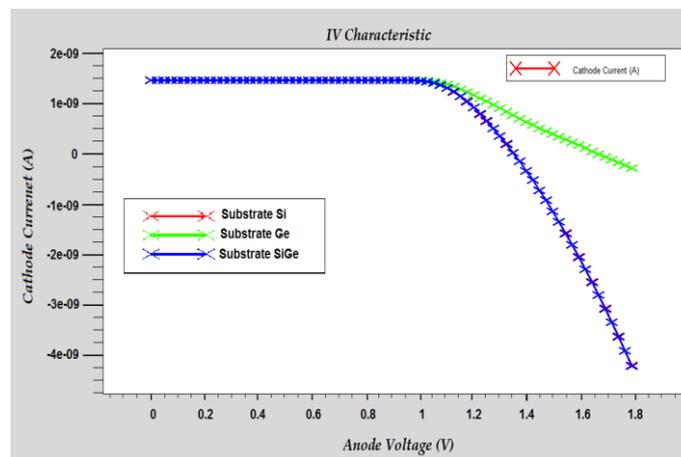


Figure IV. 45 Caractéristiques I-V des substrats de Si, Ge et SiGe

La figure IV.45, présente la caractéristique I-V de la structure micromorphe avec et sans Ge, pour voir l'effet de l'incorporation du Ge dans la structure. Les résultats montrés dans cette figure, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.16), montrent la variation de I_{cc} avec le matériau du substrat.

Tableau IV. 16 Résultats de la variation du matériau du substrat.

	V _{co} (V)	I _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
μc-Si	1.4050	13.0300	71.6900	13.1244
μc-Ge	1.4507	13.0420	77.5148	14.6656
μc-SiGe	1.4079	13.0310	72.0155	13.2122

A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.45 et tableau IV.16), nous remarquons que les valeurs de I_{cc} et le rendement sont plus élevées pour un substrat du Ge par rapport au substrat en Si. Aussi, l'utilisation du substrat de SiGe, augmente la valeur de I_{cc} et celle du rendement. Nous arrivons donc à la conclusion que l'incorporation du Ge dans un substrat en Si augmente le rendement de la cellule. Celui-ci atteint 13.2122 %.

- Couche de l'oxyde transparent conducteur

Dû à la faible conductivité de l'a-Si par rapport à celle du c-Si, nous poussons à ajouter une couche conductrice sur toute la surface de la couche amorphe pour une meilleure collecte du courant. Concernant la face illuminée de la cellule, l'oxyde transparent conducteur (OTC) collecte le courant. Il joue à la fois, le rôle de la couche conductrice et de la couche antireflet. Il fournit en conséquence, un bon contact avec les électrodes métalliques (Laurent, 2008; Peng et al., 2011).

Dans notre cas, nous utilisons le ZnO pour toutes les raisons citées auparavant.

En absence de l'éclairage de la face arrière des cellules, l'oxyde transparent conducteur est remplacé par un simple métal déposé sur la couche amorphe.

IV.2.4.3. Optimisation des dimensions

Afin de déterminer la structure optimale d'une cellule solaire à simple jonction étudiée, nous optimiserons les dimensions pour obtenir le meilleur courant possible dans le but de maximiser le rendement de conversion. Pour cette raison, nous faisons varier l'épaisseur de chaque partie de la cellule solaire pour définir les dimensions des épaisseurs optimales qui donnent le meilleur rendement.

- Dimension du substrat

La figure IV.45, représente la variation de I_{cc} avec l'épaisseur du substrat de la cellule de 1.5 à 5 μm.

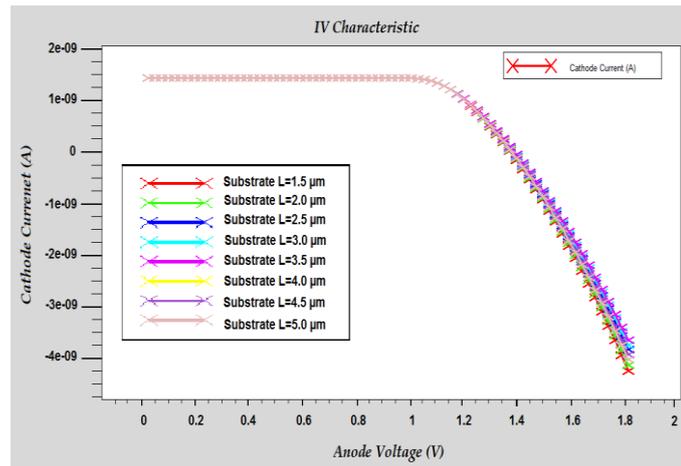


Figure IV. 46 Caractéristiques I-V pour des différentes longueurs du substrat

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.17).

Tableau IV. 17 Résultats de la variation de la longueur du substrat.

	V_{co} (V)	I_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
L=1.5 μm	1.4256	11.0201	78.8551	12.3883
L=2.0 μm	1.4188	11.9270	78.7147	13.3700
L=2.5 μm	1.4167	12.7462	77.9721	14.0798
L=3.0 μm	1.4124	12.7562	74.3845	13.3408
L=3.5 μm	1.4101	12.8761	73.1219	13.2764
L=4.0 μm	1.4094	12.9758	72.1718	13.1988
L=4.5 μm	1.4067	13.0015	71.9618	13.1612
L=5.0 μm	1.4050	13.0300	71.6900	13.1244

D'après les résultats obtenus à partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.46 et le tableau IV.17), nous remarquons que la valeur la plus élevée de I_{cc} est obtenue pour une longueur du substrat de 2.5 μm , ce qui correspond au meilleur rendement avec une valeur de 14.0798 %.

- Longueur des nanofils

La figure IV.46, représente la variation de I_{cc} avec la longueur des nanofils de 1 à 4 μm .

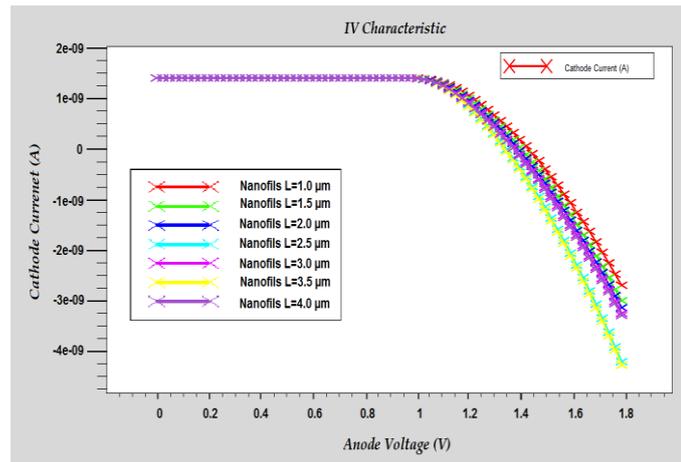


Figure IV. 47 Caractéristiques I-V des Nanofils à différentes longueurs

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.18).

Tableau IV. 18 Résultats de la variation de la longueur des nanofils.

	V_{co} (V)	I_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
L=1.0 μm	1.4216	12.1466	75.1742	12.9808
L=1.5 μm	1.4163	12.3158	74.8925	13.0921
L=2.0 μm	1.4121	12.9630	72.5873	13.1624
L=2.5 μm	1.4050	13.0300	71.6900	13.1244
L=3.0 μm	1.3995	13.0318	70.8729	12.9258
L=3.5 μm	1.3852	12.9736	70.1475	12.6062
L=4.0 μm	1.3779	12.5435	69.9618	12.0921

D'après la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.47 et tableau IV.18), nous remarquons que I_{cc} maximal est donné pour une longueur de nanofils de 2 μm , ce qui donne une valeur du rendement la plus élevée, soit 13.1624 %.

- Diamètre des nanofils

La figure IV.47, représente la variation de I_{cc} avec le diamètre des nanofils de la cellule de 50 à 120 nm.

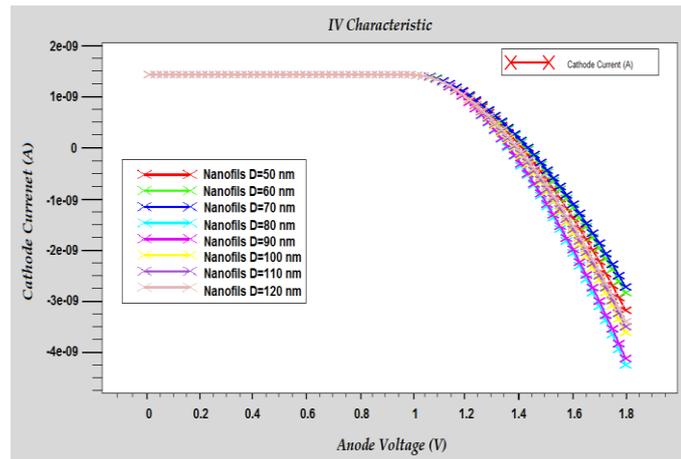


Figure IV. 48 Caractéristiques I-V des Nanofils à différents diamètres

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.19).

Tableau IV. 19 Résultats de la variation du diamètre des nanofils.

	V_{co} (V)	I_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
D=50 nm	1.4265	12.3554	72.4955	12.7773
D=60 nm	1.4264	12.6172	72.7825	13.0988
D=70 nm	1.4327	12.6640	72.8129	13.2100
D=80 nm	1.3987	13.0248	70.5284	12.8487
D=90 nm	1.3999	13.0287	70.7549	12.8966
D=100 nm	1.4050	13.0300	71.6900	13.1244
D=110 nm	1.4010	13.0304	71.7110	13.0913
D=120 nm	1.4006	13.0307	71.7108	13.0878

D'après la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.48 et tableau IV.19), la valeur la plus élevée de I_{cc} est obtenue pour un diamètre de nanofils de 70 nm, ce qui correspond au meilleur rendement avec une valeur de 13.21 %. Typiquement, quand le diamètre décroît la conductivité électrique décroît aussi.

Des recherches ont prouvé l'existence d'une taille critique de changement de direction des nanofils pour deux familles de diamètres 60 et 100 nm (Boukhicha, 2011). Cette dernière est estimée à 80 nm sur un substrat de Si(111). D'après la figure IV.48, nous remarquons qu'un saut remarquable de la valeur de I_{cc} est obtenu à partir du diamètre critique de 80 nm.

- Epaisseur de la couche amorphe extrinsèque

Dans le cas d'un dispositif solaire à base de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), l'absorption décroît dans la région de longueur d'onde de 600 à 800 nm.

Par conséquent, plusieurs micromètres sont nécessaires pour absorber complètement la lumière. Une couche a-Si:H plus épaisse conduit à une instabilité de la lumière par l'effet bien connu de Staebler-Wronski (Fotis, 2012). La densité de défaut de Si amorphe augmente avec l'exposition à la lumière, ceci conduit à la recombinaison de la couche en vrac et abaisse le rendement de conversion d'énergie.

La figure IV.49, représente la variation du I_{cc} avec l'épaisseur de la couche amorphe extrinsèque de 5 à 45 nm.

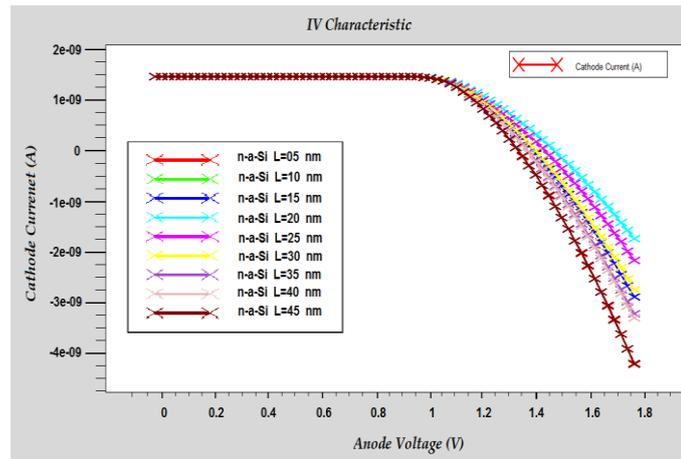


Figure IV. 49 Caractéristiques I-V à différentes épaisseurs de couche amorphe n-a-Si:H

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.20).

Tableau IV. 20 Résultats de la variation de l'épaisseur de la couche amorphe.

	V_{co} (V)	I_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
L=05 nm	1.3977	13.0250	71.4298	13.0038
L=10 nm	1.3998	13.0290	71.6894	13.0751
L=15 nm	1.4044	13.0292	71.6897	13.1179
L=20 nm	1.4050	13.0300	71.6900	13.1244
L=25 nm	1.4034	13.0314	71.6897	13.1108
L=30 nm	1.4024	13.0336	71.6806	13.1020
L=35 nm	1.3987	13.0344	71.6549	13.0635
L=40 nm	1.3981	13.0348	71.6246	13.0528
L=45 nm	1.3974	13.0360	71.6186	13.0464

D'après la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.49 et tableau IV.20), nous remarquons que la valeur la plus élevée de I_{cc} est donné pour une épaisseur de la couche amorphe extrinsèque de 20 nm, où le rendement est de 13.1244 %.

- Epaisseur de la couche amorphe intrinsèque

La figure IV.50, représente la variation de I_{cc} avec l'épaisseur de la couche amorphe intrinsèque de 10 à 100 nm.

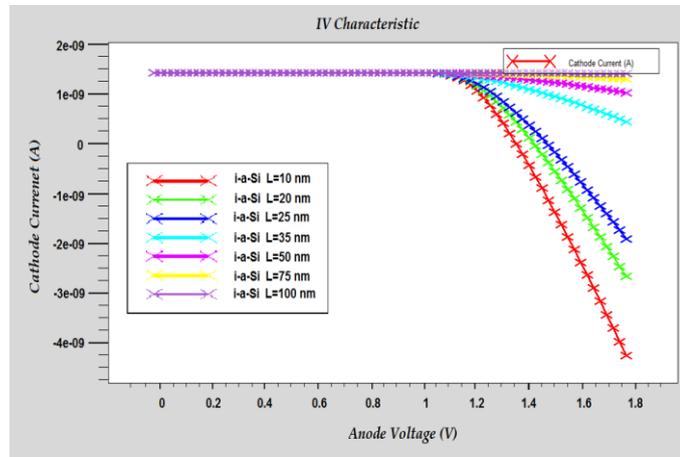


Figure IV. 50 Caractéristiques I-V à différentes épaisseurs de couche amorphe i-a-Si:H

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.21).

Tableau IV. 21 Résultats de la variation de l'épaisseur de la couche i-a-Si.

	V_{co} (V)	I_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
L=10 nm	1.3902	12.9768	70.9870	12.8063
L=20 nm	1.3919	12.9987	70.9957	12.8452
L=25 nm	1.3952	13.0120	71.2816	12.9407
L=35 nm	1.3971	13.0220	71.4951	13.0071
L=50 nm	1.4050	13.0300	71.6900	13.1244
L=75 nm	1.4175	12.8949	71.7160	13.1086
L=100 nm	1.4215	12.8453	71.7866	13.1079

D'après la figure et le tableau ci-dessus (la figure IV.50 et le tableau IV.21), la valeur la plus élevée de I_{cc} est obtenue pour une épaisseur de la couche amorphe intrinsèque de 50 nm, ce qui correspond au meilleur rendement avec une valeur de 13.1244 %.

IV.2.4.4. Effet du dopage sur la simple jonction

Pour étudier l'effet du dopage sur la cellule, nous faisons varier le dopage de chaque partie de la cellule séparément de 10^{15} à 10^{20} at/cm³.

La figure IV.51, représente la variation de I_{cc} avec le dopage des nanofils de 10^{15} à 10^{20} /cm³. Le dopant utilisé est B.

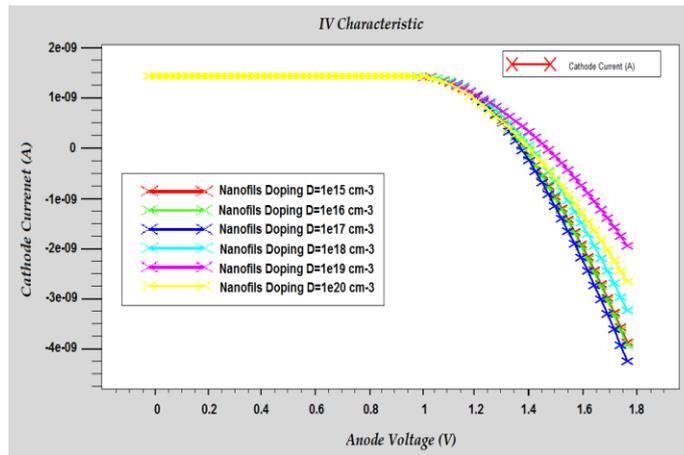


Figure IV. 51 Caractéristiques I-V de la cellule pour différents dopages des NFs
 Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.22).

Tableau IV. 22 Résultats de la variation du dopage des nanofils.

	V _{co} (V)	I _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
D=10 ¹⁵ cm ⁻³	1.4247	12.5756	72.1923	12.9343
D=10 ¹⁶ cm ⁻³	1.4184	12.7154	72.1403	13.0119
D=10 ¹⁷ cm ⁻³	1.3984	12.7088	71.1422	12.6434
D=10 ¹⁸ cm ⁻³	1.4249	12.7749	71.6514	13.0426
D=10 ¹⁹ cm ⁻³	1.4251	12.8936	71.3581	13.1118
D=10 ²⁰ cm ⁻³	1.4050	13.0300	71.6900	13.1244

A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.51 et tableau IV.22), nous remarquons que la valeur la plus élevée de I_{cc} est donnée pour un dopage des nanofils de 10²⁰ at/cm³, ce qui correspond au meilleur rendement avec une valeur de 13.1244 %. La figure IV.52, représente la variation de I_{cc} avec le dopage du substrat de 10¹⁵ à 10²⁰ cm⁻³. Le dopant utilisé est B.

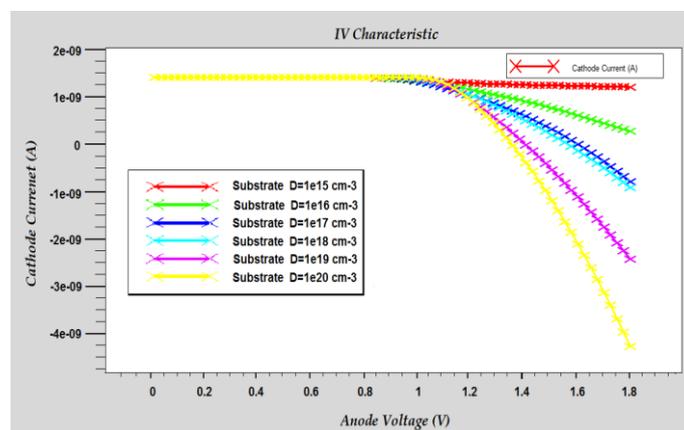


Figure IV. 52 Caractéristiques I-V de la cellule pour différents dopages du substrat

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.23).

Tableau IV. 23 Résultats de la variation du dopage du substrat.

	V _{co} (V)	I _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
D=10 ¹⁵ cm ⁻³	1.4050	13.0300	71.6900	13.1244
D=10 ¹⁶ cm ⁻³	1.4048	13.0295	71.4413	13.0765
D=10 ¹⁷ cm ⁻³	1.3987	12.9201	71.3546	12.9346
D=10 ¹⁸ cm ⁻³	1.3845	12.8989	70.5189	12.5858
D=10 ¹⁹ cm ⁻³	1.3767	12.7617	70.1541	12.3254
D=10 ²⁰ cm ⁻³	1.3728	12.7124	69.6456	12.1542

A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.52 et tableau IV.23), nous remarquons que la valeur la plus élevée de I_{cc} est donné pour un dopage du substrat est de 10¹⁵ at/cm³, ce qui correspond au meilleur rendement avec une valeur de 13.1244 %. La figure IV.52, représente la variation de I_{cc} avec le dopage de couche n-a-Si de 10¹⁵ à 10²⁰ at/cm³. Le dopant utilisé est As.

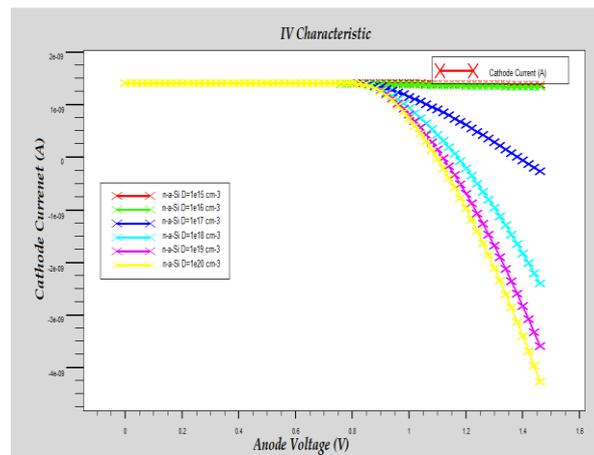


Figure IV. 53 Caractéristiques I-V de la cellule pour différents dopages de couche amorphe n-a-Si

Les résultats obtenus, sont résumés dans le tableau suivant (tableau IV.24).

Tableau IV. 24 Résultats de la variation du dopage de la couche amorphe.

	V _{co} (V)	I _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
D=10 ¹⁵ cm ⁻³	1.4132	12.6200	72.1072	12.8600
D=10 ¹⁶ cm ⁻³	1.4125	12.7450	72.0831	12.9766
D=10 ¹⁷ cm ⁻³	1.4114	12.8940	71.4699	13.0065
D=10 ¹⁸ cm ⁻³	1.4092	13.0037	71.3394	13.0728
D=10 ¹⁹ cm ⁻³	1.4074	13.0089	71.6708	13.1220
D=10 ²⁰ cm ⁻³	1.4050	13.0300	71.6900	13.1244

A partir de la figure et le tableau ci-dessus (figure IV.53 et tableau IV.24), nous remarquons que I_{cc} maximal est donné pour un dopage de la couche amorphe de 10^{20} at/cm³, ce qui correspond au meilleur rendement avec une valeur de 13.1244%.

IV.2.2.9. Paramètres de la structure optimisée

Les paramètres de la cellule solaire simple jonction avec nanofils (a-SiGe:H// μ c-NF/ μ c-Si:H) obtenus après l'optimisation, sont 20 nm pour n-a-Si, 50 nm pour l'épaisseur de i-a-Si, 2 μ m pour la longueur de nanofils et 70 nm pour leur diamètre de 2.5 μ m pour l'épaisseur du substrat dont les nanofils et la couche amorphe sont fortement dopés et le substrat est faiblement dopé. Le meilleur rendement obtenu est 14.0798%.

IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre, trois simulations complètes des cellules sont effectuées. Pour la cellule à simple jonction, nous avons qu'une cellule à considérer, par contre la cellule à double jonctions, nous avons deux sous cellules. Celles-ci sont analysées individuellement et ensuite ensemble dans une configuration empilée. La même procédure a été faite pour la cellule à triple jonctions. En outre, la composition du matériau de différentes cellules est modifiée et plusieurs paramètres sont optimisés. L'outil de simulation Silvaco-ATLAS, nous a donné les paramètres électriques (I_{cc} , V_{CO} et η) des cellules solaires étudiées à travers la caractéristique I-V.

L'étude des trois structures (Simple, double et triple jonction) modélisées et simulées nous montre que l'incorporation de couches minces de Si amorphe et de SiGe amorphe et microcristallin augmente l'absorption et par conséquent le rendement électrique.

L'épaisseur totale de la cellule solaire à jonctions multiples est similaire à une cellule solaire à jonction unique conventionnelle, où chaque cellule la composant est plus mince et donc moins sensible aux défauts induits par la lumière.

Un avantage supplémentaire d'une structure de cellules à jonctions multiples est que chaque cellule composant peut être adaptée à une partie spécifique du spectre solaire, prolongeant de ce fait une partie utilisable du spectre et augmentant ainsi le rendement de conversion des cellules solaires.

Conclusion générale

L'utilisation de logiciel de simulation Silvaco pour modéliser et simuler une cellule solaire à base de nanofils et de couches minces sur un substrat en silicium nous a permis d'évaluer les performances de différentes variantes de cellules photovoltaïques. L'optimisation de la conception a été effectuée en modifiant séparément les paramètres physiques et électroniques essentiels de la cellule tels que l'épaisseur et la taille des nanofils et des couches minces, ainsi que le dopage.

Un bon accord entre l'énergie des photons entrants, à partir de différentes parties du spectre et l'énergie de la bande interdite des absorbeurs semi-conducteurs permet une utilisation efficace de l'énergie du spectre solaire. Les cellules solaires à jonctions multiple comme tandem a-SiGe:H/ μ c-Si:H micro morphes, et triple jonction comme a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si: H cellules solaires, permettent cette utilisation efficace.

En général, les cellules solaires traditionnelles utilisent du silicium cristallin, offrant un bon rendement de conversion de puissance à environ 25%. Cependant, les cellules solaires à base de silicium cristallin sont coûteuses à fabriquer. En conséquence, les scientifiques ont accentué leurs efforts de recherche vers les technologies de cellules solaires à base de nanomatériaux, plus particulièrement les nanofils.

Lorsque la taille physique des matériaux diminue jusqu'à l'échelle nanométrique, les effets mécaniques quantiques deviennent significatifs, et ces matériaux à faibles dimensions comme les nanofils montrent des propriétés significativement différentes à leurs homologues massifs.

Nous avons vu qu'il y a des changements significatifs dans les propriétés électroniques et optiques des nanofils de silicium comparativement aux mêmes matériaux massifs. Le changement de certaines propriétés dépend de la taille, de la forme et du positionnement des nanostructures. L'étude suggère que, la production minutieuse de nanofils de taille et de forme voulues permettrait de manipuler des propriétés telles que le gap, la masse effective et l'absorption optique. Nous avons également vu que les nanofils de silicium peuvent être produits par différentes méthodes de croissance. L'or (Au) et l'argent (Ag) sont les catalyseurs les plus utilisés pour la synthèse de nanofils de silicium.

L'utilisation de couches minces de silicium-germanium microcristallins comme des matériaux absorbeurs dans des cellules solaires en silicium à couche mince a été étudiée. En raison de l'incorporation de Ge dans le réseau Si, le coefficient d'absorption augmente.

L'incorporation de Ge provoque une augmentation du RQE du spectre et donc un courant accru alors que l'épaisseur de la couche absorbante reste constante. Des cellules solaires à base des couches minces $\mu\text{-SiGe:H}$ optimisées ont été obtenues par une concentration de Ge d'environ 20%. L'application de ces résultats, dans les cellules solaires en tandem a-Si:H/ $\mu\text{-SiGe:H}$, montre que l'épaisseur de l'absorbeur pourrait être réduite de 60% par rapport aux cellules solaires a-Si:H/ $\mu\text{-Si:H}$. Ce résultat montre que le temps de dépôt dans la production de cellules solaires en silicium à couche mince peut être réduit de manière significative. Ce sera encore plus significatif pour les cellules de base dans les concepts de triple jonction (Maydell et al., 2014).

La couche de silicium amorphe ainsi que la couche d'oxyde de ZnO jouent des rôles très importants dans la réalisation d'une cellule solaire à haut rendement. Cette partie supérieure agit comme une membrane semi-perméable qui contrôle l'écoulement des porteurs, ce qui permet de maintenir des densités de porteurs élevées à l'intérieur de la cellule à la puissance maximale. Ceci avec une faible recombinaison de porteurs entraîne une plus grande durée de vie du porteur résultant en une tension de circuit ouvert élevée V_{CO} (Monga, 2015).

Les cellules solaires sont des candidats intéressants pour l'énergie propre et renouvelable avec la miniaturisation. Elles pourraient également servir de sources d'énergie. L'utilisation de nanostructures ou de matériaux nanostructurés représente une approche générale pour réduire à la fois le coût et la taille et améliorer l'efficacité dans le photovoltaïque.

Les pertes optiques affectent drastiquement la puissance délivrée par la cellule photovoltaïque en diminuant le I_{cc} . L'utilisation d'une couche antireflet, combinée à la texturisation du substrat de silicium, permet de réduire considérablement ces pertes. Plusieurs matériaux sont utilisés comme CAR notamment le nitrure de silicium SiN pour son indice de réfraction qui peut être ajusté en faisant varier les conditions de dépôt.

Pour augmenter le nombre de photons transmis à la cellule photovoltaïque, il faut choisir un indice de réfraction et une épaisseur adéquats, de manière à exploiter les phénomènes d'interférences destructives et obtenir l'annulation de la réflexion à la longueur

d'onde considérée. Cependant, il faut tenir compte de l'absorption de la CAR, car le coefficient d'extinction augmente avec son indice de réfraction.

L'intérêt dans l'utilisation des nanofils de germanium sur substrat de silicium est de s'affranchir du problème d'épaisseur critique pour des matériaux présentant un désaccord de maille. Les nanofils de germanium offrent la possibilité de réaliser des croissances à plus basse température que pour le silicium.

Pour atteindre les principaux objectifs de l'énergie photovoltaïque, le rendement de conversion des cellules solaires devrait être amélioré sans aucun compromis sur le coût de traitement de ces dispositifs. Cependant, malgré l'introduction de nouveaux matériaux tels que les nanofils et la déposition des couches de matériaux nanocristallins ultraminces, entre autres, le compromis rendement électrique coût reste toujours un défi à surmonter dans la technologie photovoltaïque.

Références Bibliographiques

- Abdo, F. (2007). Croissance de couches minces de silicium par épitaxie en phase liquide à basse température pour applications photovoltaïques. Thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, France.
- Adachi, M.M. (2012). Development and characterization of PECVD grown silicon nanowires for thin film photovoltaics. Ontario, university Waterloo, Canada.
- Aribisala, H. (2013). Improving the efficiency of solar photovoltaic power system.
- Aslan, T. (2015). Electronic transport properties of silicon nanowires synthesized by Laser ablation. Johannesburg.
- ATHENA user's manual, A. (2015). 2D process Simulation Software.
- ATLAS user's manual, A. (2015). 2D process simulation.
- Azzouzi, G. (2012). Theme study of silicon solar cells performances using the impurity photovoltaic effect.
- Beaudoin, A. (2013). Etude de la dynamique des porteurs dans des nanofils de silicium par spectroscopie térahertz. Thèse de doctorat, université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada.
- Bouaraba, F. (2012). Etude d'une LED à base d'InGaN pour l'émission de la lumière blanche. Mémoire de magister, université de Tizi Ouzou, Algérie.
- Boukhicha, R. (2011). Croissance et caractérisation de nanofils de silicium et de germanium obtenus par dépôt chimique en phase vapeur sous ultravide. Thèse de doctorat, université de Paris-Sud 11, France.
- Brahiti, N. (2012). Influence du pH sur les propriétés optiques et morphologiques des nanofils de silicium. Mémoire de magister, université de Boumerdes, Algérie.
- Chowdhury, S. (2015). Design and optimization of an InGaP/GaAs/Si_xGe_{1-x} solar cell considering recombination effects. Bangladesh university of engineering and technology, Bangladesh.
- Çiftçinar, E. H. (2014). Selective emitter formation via single step doping through laser patterned mask oxide layer for monocrystalline silicon solar cells. Master thesis, Middle East Technical University.
- Dahou, F. Z. (2011). Elaboration des Couches Minces Originales pour Réalisation de Cellules Solaires. Thèse de doctorat, université d'Oran, Algérie.
- Davies, S. (2007). The following is a short description on the various types of panels available and some of their characteristics. solarflex.
- Demichel, O. (2010). Propriétés Électroniques de Nanofils de Silicium obtenus par Croissance Catalysée. Thèse de doctorat, université de Joseph Fourier – Grenoble 1.
- Desrues, T. (2009). Développement de cellules photovoltaïques. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- Dhalluin, F. (2009). Nanofils de Silicium : Dépôt chimique en phase vapeur assisté par catalyseurs métalliques et prémices d'intégration. Thèse de doctorat, université Grenoble I - Joseph Fourier.
- Dick, K. (2007). Epitaxial Growth and Design of Nanowires and Complex Nanostructures. Doctoral thesis, Lund University, Sweden.

- Fotis, K. (2012). Modeling And Simulation Of A Dual-Junction Cigs Solar Cell Using Silvaco Atlas. master thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- Grau, M. (2012). Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres, Thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, France.
- Guyen, G. (1992). Chemical etching technique for porous and finegrain YBa_2Cu_{307-x} superconductors with or without silver addition. Lehigh University.
- Hasan M., Huq M F. et Mahmood Z.H. (2013). A review on electronic and optical properties of silicon nanowire and its different growth techniques. Springer Plus, 2:151.
- Hays, D. C. (1999). selective etching of compound semiconductors. University of Florida.
- Huang A.N, Tsai H., Kuo H.P et Pan W.C (2014). Non-vacuum method for formation of $CuIn_{0.7}Ga_{0.3}Se_2$ absorber thin film using screen printing and far infrared rapid thermal annealing, revue, The 6th International Conference on Applied Energy – ICAE2014, Elsevier Energy Procedia 61, pp 88 – 91, 2014.
- Huang, R.G. (2012). High-Performance Silicon Nanowire Electronics California Institute of Technology. Thesis for degree Doctor, Pasadena, California.
- IRENA. (2012).
- Janssen, R. (2005). Introduction to polymer solar cells. Eindhoven University of Technology, The Netherlands.
- Joyce, H.J. (2009). Growth and Characterisation of III–V Semiconductor Nanowires for Optoelectronic Device Applications. Thesis for degree Doctor, The Australian National University.
- Kessaissia, F.Z. (2013). Caractérisation de modules photovoltaïques de différents technologies. Mémoire de magister, université de Chlef, Algérie.
- Kohen, D. (2011). Étude des nanofils de silicium et de leur intégration dans des systèmes de récupération d'énergie photovoltaïque.
- Kortikar, S.N. (2004). fabrication and characterization of deterministic microasperities on thrust surfaces. University of Kentucky UKnowledge.
- Lauhon L.J, Gudiksen M.S, Wang D, et Lieber CM. (2002). Epitaxial core–shell and core–multishell. Nature , 57-66.
- Laurent, K. (2008). Etude expérimentale de la microstructure et des propriétés électriques et optiques de couches minces et de nanofils d'oxydes métalliques (d-Bi $2O_3$ et ZnO) synthétisés par voie électrochimique. Thèse de doctorat, université de Paris-Est, France.
- Lehoucq, G. (2010). Transistors à nano_ls de silicium top-down. Application à la détection biologique. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique, Paris tech, Paris, France.
- Leprince-wang, Y. (2003). Élaboration et caractérisation des matériaux à l'échelle micro- et nanométrique. Habilitation à diriger des recherches, universite De Marne La Vallee.
- Li, Z. (2011). Growth and Characterization of ZnSe and ZnTe Alloy Nanowires. University of Toronto.
- Linck, M. M. (2014). An Analysis Of The Fabrication, Characterization And Application Of Academically Developed Solar Cells. Pontificia Universidade Católica Do Rio Grande Do Sul.

- Masolin A., Bouchard P.O, Martini R., et Bernacki M. (2012). Thermo-mechanical and fracture properties in single crystal silicon. Belgium.
- Maydell K.v., Grunewald K., Kellermann M., Sergeev O., Klement P., Reininghaus N et Kilper T. (2014). Microcrystalline SiGe Absorber Layers in Thin-Film Silicon Solar Cells,. E-MRS Spring Meeting 2013 Symposium D - Advanced Inorganic Materials and Structures for Photovoltaics, 27-31 May 2013 (pp. 209 – 215). Strasbourg, France : Journal Elsevier, Energy Procedia 44.
- Mette, A. (2007). New Concepts for Front Side Metallization of Industrial Silicon Solar Cells. Thesis for degree of Doctor, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme Freiburg im Breisgau.
- Miles R.W., Hynes K.M, et Forbes I. (2005). Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues,. Elsevier , 1-42.
- Monga, T. (2015). Development of Thin Heterojunction Solar Cells with High Open Circuit Voltage. Arizona State University. Master Thesis, 2015.
- Navarro, J. M. (2008). Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible. Université De Toulouse.
- NEED. (2015). Exploring Photovoltaics.
- Oehler, F. (2007). Croissance et Caractérisation de Nanofils de Silicium. Université Claude Bernard Lyon 1.
- Olivier, D. (2010). Propriétés Électroniques de Nanofils de Silicium obtenus par Croissance Catalysée. Université Joseph Fourier – Grenoble 1.
- Peng K.Q, Wang X., Wu X.L and Lee S.T (2011). ZnO Nanowires and Their Application for Solar Cells, Nanowires -Implementations and Applications. Dr. Abbass Hashim (Ed.), ISBN: 978-953-307-318-7, InTech.
- Potsavage, W. (2011). Physics And Engineering Of Organic Solar Cells. Thesis for degree Doctor, Georgia Institute of Technology, 2011.
- Puyoo, E. (2010). Caractérisation thermique de nanofils de silicium pour des applications à la thermoélectricité. Thèse de doctorat, université de Bordeaux1, France.
- Rucker, R. B. (2006). Characterization of Processes used in Nanofabrication of Digital Electrostatic E-Beam Array Lithography (DEAL) Devices . University of Tennessee – Knoxville.
- Tahir, A. (2015). Electronic transport properties of silicon nanowires synthesized by laser ablation. Master thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg.
- Tanabe, K. (2008). Low-Cost High-Efficiency Solar Cells with Wafer Bonding and Plasmonic Technologies . California Institute of Technology Pasadena, California.
- VWF InteractiveTools, V. (2005). Device Simulation Software. 2D process Simulation Software, <http://www.silvaco.com>.
- Wang Q., Iwaniczko E., Yang J., Lord K., and Guha S.(2011). High-Quality 10 Å/s Amorphous Silicon Germanium Alloy Solar Cells by Hot-Wire CVD. NCPV Program Review Meeting Lakewood, Colorado.
- Xakalashé B.S.et Tangstad M. (2011). Silicon processing:from quartz to crystalline silicon solar cells. Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 2011.

- Yakushev M.V., Maiello P., Raadik T., Shaw M.J, Edwards P.R., Krustok J., Mudryi A.V., Forbes I., et Martin R.W. (2014). Investigation of the Structural, Optical and Electrical Properties of Cu_3BiS_3 Semiconducting Thin Films. Elsevier Energy Procedia, pp166–172, 2014.
- Yasinok, G. C. (2006). Development of electrochemical etch-stop techniques. Middle east of Thechical university.
- Zardo, I. (2010). Growth And Raman Spectroscopy Studies of Gold-Free Catalyzed Semiconductor Nanowires. Università Degli Studi Di Roma “Sapienza”.
- Zeman M. (2010). Advanced Thin-Film Silicon Solar Cells. Delft University of Technology, The Netherlands.
- Zeman M., Isabella O., Jäger K., Santbergen R., Solntsev S., Topic M.and Krc J. (2012). Advanced Light Management Approaches for Thin-Film Silicon Solar Cells, Elsevier, Energy Procedia 15, pp 189 – 199.
- M.Zeman and J.Krc (2008). Optical and electrical modeling of thin-film silicon solar cells. Journal of Materials Reserach, Vol 23, No. 4, April 2008.
- Zhang, Z. (2015). Investigation of Structural Characteristics of III-V Semiconductor Nanowires Grown by Molecular Beam Epitaxy . Thesis for degree Doctor, The University of Queensland, Australia.

Travaux scientifiques

1. Publications Internationales

Fatiha Benbekhti, Abdelhalim Benmansour, «Heterostructure nanowires/amorphous thin-film for solar cells», *Electrotehnică, Electronică, Automatică*, vol 64, N°1 (2016), ISSN: 1582-5175. <http://www.eea-journal.ro>

Fatiha Benbekhti, Abdelhalim Benmansour, « Study and Simulation of Silicon Solar Cells: Technology Evaluation for Photovoltaic Applications», *Electrotehnică, Electronică, Automatică*, vol 64, N°3 (2016), ISSN: 1582-5175. <http://www.eea-journal.ro>

2. Communications Internationales

Fatiha Benbekhti, Abdelhalim Benmansour, «Germanium nanowires-based Solar Cells: Design and Simulation», ICMERA 2015-ICREC 2015-ICCBM 2015, IACT-USA Conferences, 29-31 Octobre 2015, Bucharest, Romania.

Fatiha Benbekhti, Abdelhalim Benmansour, « Single-junction Nanowires/Amorphous Thin-Film Silicon Solar Cells», 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference IRSEC15, 10-13 Décembre 2015, Marrakeche & Ouarzazate, Maroc.

Fatiha Benbekhti, Abdelhalim Benmansour, « Intégration des nanofils de Germanium sur Substrat en Silicium-Germanium pour la récupération de l'énergie solaire», 9th International Conference on Electrical Engineering and First Workshop on Robotics and Controls CEE2016, 02-04 Octobre 2016, Batna, Algérie.

Fatiha Benbekhti, Abdelhalim Benmansour, «Etude et simulation des cellules solaires à base des couches minces: multicouches et multijonctions», Quatrième Séminaire International sur les énergies Nouvelles et Renouvelables SIENR 2016, 24-25 Octobre 2016, Ghardaïa, Algérie.

Fatiha Benbekhti, Abdelhalim Benmansour, «Double jonction p-i-n Silicium-Germanium Amorphe / Silicium-Germanium», 10^{ème} Conférence sur la Génie Electrique GCE'10, 17-18 Avril 2017, Alger, Algérie.

Etude, modélisation et simulation de cellules photovoltaïques de 3^{ème} génération à base de couches minces et de nanofils sur substrat en Silicium

Résumé

Notre travail de recherche s'inscrit dans le cadre des cellules photovoltaïques dites de « 3^{ème} génération ». Nous nous intéressons à la modélisation et la simulation des structures multicouches à base de silicium à l'aide du Silvaco. Notre contribution est l'intégration des nanofils dans ces structures afin d'optimiser les performances des dispositifs, en particulier le rendement de conversion.

Afin de déterminer les différents paramètres liés à la conversion photovoltaïque, nous avons étudié deux modèles de cellules photovoltaïques à couches minces multijonctions : [la double jonction (a-SiGe:H/uc-Si:H) et la triple jonction (a-Si:H/a-SiGe:H/ μ c-Si:H)] et nous les avons comparés à un troisième modèle où nous avons incorporé des nanofils de silicium dans une structure simple jonction (a-Si:H/NFSi:H/uc-Si:H).

L'incorporation de nanofils de silicium dans la structure simple jonction nous permet d'augmenter le rendement de conversion électrique d'environ 1.5% et de diminuer la taille de ces cellules et par conséquent leur coût.

Mots-clés : Cellules photovoltaïques – Silicium – Couches minces – Nanofils – Optimisation – Rendement de conversion – Simulation et modélisation.