



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

THÈSE

Présentée à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité: Physique Energétique

Par :

M^{me} BENABADJI née BENYELLES Batoul

Sur le thème

Dimensionnement des émetteurs enterrés EWT des cellules solaires industrielles à base de silicium multicristallin

Soutenue publiquement le 12/05/2018 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr BENYOUCEF Boumediène	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr ZERGA Abdellatif	Professeur	Université de Tlemcen	Directeur de thèse
Mr BOUDGHENE STAMBOULI Amine	Professeur	Université d'Oran	Examineur
Mr CHABANE SARI Nasr-Eddine	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
Mr HAMIDAT Abderrahmane	Directeur de recherches	CDER-Alger	Examineur

*Unité de Recherches Matériaux et Energies Renouvelables (URMER)
BP 119, 13000 Tlemcen - Algérie*

Citations

« La seule chose que je sais est que je ne sais rien »

Socrate, philosophe grec (470, 399 av. J.-C)

« Tout obstacle renforce la détermination. Celui qui s'est fixé un but n'en change pas »

Léonard De Vinci, architecte, artiste, philosophe (1452, 1519)

Dédicaces

A mon défunt père Bachir Allah yerrahmou.

A ma mère pour tous les sacrifices et pour ces années d'aide et de soutien.

A la personne, qui sans elle ce travail n'aurait jamais vu le jour : Mon mari Rafki. Ta dévotion, ton aide, ton soutien et tes encouragements m'ont permis de ne jamais dévier de mon objectif.

A mes anges : Nazim et Djazia tout en leur souhaitant de réussir dans leurs examens respectifs Bac et BEM.

A toute ma famille : mon frère Kamel, mes sœurs Nababat Samira et Fayza, mes neveux et nièces.

A ma belle famille ; en particulier mes belles sœurs Chahida, Soubila et Latéfa.

Et enfin, à toutes les personnes que j'aime.

Remerciements

La relation qui unit un doctorant à son directeur de thèse est très particulière. Ce n'est plus un lien maître-disciple ou bien professeur-élève et encore moins supérieur-subordonné. Il consiste à transmettre, aider et motiver sans non plus étouffer. C'est délicat et complexe. Professeur Abdellatif Zerga a merveilleusement joué ce rôle. Je tiens tout d'abord à l'en remercier, pour m'avoir fait confiance malgré les connaissances plutôt légères que j'avais en 2011 sur le photovoltaïque, puis pour m'avoir guidée, encouragée et conseillée, pendant ces années tout en me laissant une grande liberté. Merci pour votre attention et votre disponibilité malgré vos nombreuses charges.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur Boumédiène BENYOUCEF, Professeur à l'Université Abou-Bekr Belkaïd de Tlemcen, de m'avoir honorée par sa présence et d'avoir accepté de présider ce Jury.

Je remercie sincèrement Monsieur Amine Boudghène Stambouli, Professeur à l'Université d'Oran, Monsieur Abderrahmane Hamidat, Directeur de recherches au CDER d'Alger ainsi que Monsieur Nasr-Eddine CHABANE SARI, Professeur à l'Université Abou-Bekr Belkaïd de Tlemcen d'avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie de ce jury.

Mes remerciements vont aussi à Mr Djamel-Eddine BOUABDALLAH, 1er vice-président de la CCIAE (Chambre de commerce et d'industrie Algéro-Espagnole), qui a toujours répondu présent et qui m'a aidée dans les différents déplacements que j'ai effectués que ce soit en 2013 à Strasbourg ou en 2014 à Barcelone.

Je passe une dédicace spéciale à Mr Pau Verrié, Associé fondateur de BIDAIA Internacional et ancien recteur de l'université Fabre Pampeu (Région de Barcelone, Espagne) qui m'a permis d'effectuer mon stage à Barcelone.

Une dédicace particulière au Docteur Antony Sudria, directeur de l'UPC (Universitat Politècnica de Catalunya) de m'avoir reçu à l'unité CITCEA de l'UPC de Barcelone. Sans oublier Docteur Ramon Alcubilla qui m'a éclairée sur les techniques de passivation.

Mes remerciements vont aussi à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail et plus spécialement mes amis de l'Unité de Recherche Matériaux & Energies Renouvelables, en particulier Hanane, Hocine, Hichem et Noredine.

Je tiens aussi à mentionner le plaisir que j'ai eu à travailler au sein de l'URMER, et j'en remercie ici tous les membres.

Liste des acronymes

Acronymes	Signification
a-Si:H	Silicium amorphe hydrogéné
Al ₂ O ₃	Oxyde d'aluminium
ALD	Atomic Layer Deposition
AM0	Air Mass hors atmosphère
AM1.5	Air Mass au niveau de la mer
BSF	Back Surface Field
CVD	Dépôt chimique en phase vapeur (<i>chemical vapor deposition</i>)
CZ	Czochralski
ERFC	fonction d'erreur complémentaire
EWT	Emitter Wrap Through
HF	Acide Fluorhydrique
FZ	Float Zone
HfO ₂	Oxyde d'hafnium
HIT	Heterojunction with Intrinsic Thin layer
IBC	Interdigitated Back Contacts
LPCVD	Low pressure chemical vapor deposition
MBE	Molecular Beam Epitaxy
MOCVD	Metal organic chemical vapor deposition
MWT	Metallisation Wrap Through
NREL	National Renewable Energy Laboratory
mc-Si	Silicium multi cristallin
MG-Si	silicium de grade métallurgique
PE-ALD	Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition
PERL	Passivated Emitter and Rear Locally diffused cell

PVD	Dépôt physique en phase vapeur (<i>physical vapor deposition</i>)
RCC	Rear Contact Cell
RISE-EWT	Rear Interdigitated Single Evaporation Emitter Wrap Through
S ₀ G-Si	silicium de grade solaire
SiN _x :H	silicium hydrogéné
SiO ₂	Oxyde de silicium
SiN _x	nitruire de silicium
SRH	Shockley-Read-Hall
T-ALD	Thermal Atomic Layer Deposition
TiO ₂	Oxyde de titane
ZCE	Zone de charge d'espace

Sommaire

Introduction générale	p1
Bibliographie de l'introduction générale	p4
<u>Chapitre I : La Cellule Solaire Au Silicium</u>	p5
Liste des figures du chapitre I	p8
Liste des tableaux du chapitre I	p8
Introduction	p9
I- Le rayonnement solaire: notions préliminaires	p9
II- La consommation mondiale de l'énergie	p11
III- La jonction PN	p14
III-1 Le silicium : matériau semi-conducteur	p14
III.2 Le dopage du silicium	p17
III.2.1 Le silicium intrinsèque	p17
III.2.2 Le silicium extrinsèque	p18
III.2.2.1 les donneurs	p18
III.2.2.2 les accepteurs	p18
IV- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	p21
IV.1 Historique sur l'effet photovoltaïque	p21
IV.2 Principe de l'effet photovoltaïque	p21
IV.3 La cellule solaire	p22
IV.3.1 Les constituants de base d'une cellule solaire	p22
IV.3.2 Fonctionnement d'une cellule solaire	p23
IV.3.3 Modélisation électrique	p23
IV.3.4 Réponse spectrale	p25
V- Pertes fondamentales et technologiques limitant le rendement	p26
V.1 Pertes fondamentales	p26

	V.1.1 Absorption incomplète des photons	p26
	V.1.2 Excès d'énergie des photons	p26
	V.1.3 Facteur de tension	p27
	V.1.4 Facteur de forme	p27
	V.2 Pertes technologiques	p27
	V.2.1 Pertes optiques	p27
	V.2.1.1 Les réflexions	p27
	V.2.1.2 Le taux d'ombrage	p27
	V.2.1.3 Le rendement d'absorption	p27
	V.2.1.4 Le rendement de collecte	p27
	V.2.2 Pertes par recombinaison	p28
	V.2.2.1 la recombinaison radiative	p28
	V.2.2.2 la recombinaison Auger	p28
	V.2.2.3 la recombinaison assistée par défauts	p29
	V.2.2.4 la recombinaison en surface	p29
	V.2.3 Pertes résistives	p29
	V.2.3.1 la résistance parallèle	p29
	V.2.3.2 la résistance série	p29
VI-	Technologies pour la réduction des pertes	p30
	VI.1 Passivation des faces avant et arrière	p30
	VI.2 Couche antireflet	p31
	VI.3 BSF	p31
	VI.4 Texturation de la surface	p31
	VI.5 Contacts face avant et arrière	p32
VII-	Procédé industriel pour la fabrication de cellules solaires au silicium multi cristallin	p33
VIII-	Les principaux types de cellules solaires à base de silicium multi cristallin	p36
	VIII.1 La cellule standard industrielle	p36

VIII.2 La structure HIT	p37
VIII.3 La cellule PERL	p38
VIII.4 La cellule RCC	p39
Conclusion	p40
Bibliographie du chapitre I	p41
<u>Chapitre II</u> : La structure EWT industrielle	p45
Liste des figures du chapitre II	p48
Liste des tableaux du chapitre II	p48
Introduction	p49
I- La production du silicium multi cristallin	p49
II- La structure EWT industrielle	p58
II.1. Les principaux résultats obtenus dans la littérature	p59
II.2. La technologie	p59
II.3. Réalisation des cellules EWT	p60
II.3.1. La formation des trous	p60
II.3.2. La distribution de trous	p61
II.3.3. Définition de la jonction sur la face arrière	p63
II.4. Les intérêts de la structure EWT	p64
II.5. Les inconvénients de la structure EWT	p65
II.6. Paramètres clés des cellules avec une structure EWT	p66
II.6.1. la recombinaison en surface	p66
II.6.2. La longueur de diffusion	p66
III- La sérigraphie	p67
III.1 Principe général	p67
III.1.1. Les encres	p67
III.1.2. L'écran	p68
III.1.3. L'impression	p68

III.1.4. Le séchage et la cuisson	p68
III.2. Sérigraphie pour le photovoltaïque	p69
III.3. Avantages	p70
III.4. Inconvénients	p70
IV- La passivation de surface	p71
IV.1. Dépôt des couches minces de matériaux	p72
IV.1.1 Dépôt par voie physique (PVD)	p72
IV.1.2 Dépôt par voie chimique (CVD)	p72
IV.2 Les matériaux « low-k » et « high-k »	p74
IV.2.1 Les critères de choix d'un oxyde	p74
IV.2.2 Les oxydes utilisés dans la simulation	p76
IV.2.2.1 le dioxyde de silicium	p76
IV.2.2.2 l'oxyde d'aluminium	p76
IV.2.2.3 l'oxyde d'hafnium	p77
IV.2.2.4 l'oxyde de titane	p77
IV.2.3 Propriétés optiques des oxydes utilisés	p78
Conclusion	p81
Bibliographie du chapitre II	p82
<u>Chapitre III</u> : Les modèles utilisés pour la simulation	p88
Liste des figures du chapitre III	p90
Liste des tableaux du chapitre III	p90
Introduction	p91
I- Les méthodes utilisées pour la simulation sous Atlas/Silvaco	p91
II- Les modèles physiques utilisés pour la simulation sous Atlas/Silvaco	p93
II.1 Les modèles de dérive-diffusion	p93
II.1.1 La diffusion	p93

II.1.2 La dérive	p94
II.2 Modèles de mobilités	p94
II.2.1 Modèle de mobilité dépendant de la concentration en impuretés	p96
II.2.2 Modèle de la vitesse de saturation des porteurs	p96
II.3 La densité effective (Bandgap Narrowing)	p97
II.4 Les modèles de recombinaison utilisés pour la simulation sous Atlas/Silvaco	p98
II.4.1 Recombinaison Shockley Read Hall	p98
II.4.2 Recombinaison Auger	p99
II.4.3 Recombinaison en surface	p99
II.5 Les durées de vie effectives	p100
II.6 Les contacts utilisés pour la simulation sous Atlas/Silvaco	p101
III- Génération optique	p103
III-1. Modélisation du faisceau optique incident	p105
III.2 Spécification des réflexions	p106
III.2.1 Réflexion arrière	p107
III.2.2 Réflexion des parois latérales	p107
III.2.3 Les couches antireflets	p107
Conclusion	p109
Bibliographie du chapitre III	p110
<u>Chapitre IV</u> : Simulation Des Cellules EWT industrielles	p112
Liste des figures du chapitre IV	p114
Liste des tableaux du chapitre IV	p115
Introduction	p116
I- Structure, paramètres et maillage	p117
I.1 Structure simulée	p117
I.2 Paramètres de la structure simulée	p119
I.3 Maillage	p119

II-	Simulation et optimisation	p120
	II.1 Variation de l'épaisseur du substrat	p122
	II.2 Variation du dopage du substrat	p123
	II.3 Variation du dopage de l'émetteur	p124
	II.4 Variation de l'épaisseur de l'émetteur	p124
	II.5 Variation de l'épaisseur du BSF	p125
	II.6 Variation du dopage du BSF	p125
	II.7 Variation de la longueur de diffusion	p126
	II.8 Variation des vitesses de recombinaisons	p127
	II.9 Effet du rapport W_{Al}/W_{BSF}	p128
	II.10 Effet du rapport $W_{Ag}/W_{émetteur}$	p129
III-	Passivation de surface	p130
	III.1 Résultats	p132
	III.1.1 Passivation avec de l'oxyde d'aluminium	p133
	III.1.2 Passivation avec de l'oxyde d'hafnium	p135
	III.1.3 Passivation avec de l'oxyde de silicium	p135
	III.1.4 Passivation avec de l'oxyde titane	p136
	III.2 Discussion	p137
	Conclusion	p140
	Bibliographie du chapitre IV	p142
	Conclusion générale et perspectives	p144
	Annexes :	p146
	Annexe I : Le logiciel Silvaco	p147
	Annexe II : Le programme Silvaco/optimisation des paramètres	p157
	Annexe III : Le programme Silvaco/passivation	p160

Résumé

La croissance de l'industrie photovoltaïque est basée sur la réduction des coûts de fabrication pour rendre l'énergie plus compétitive avec les combustibles fossiles. Pour atteindre cet objectif, nous devons réduire le ratio des coûts de production sur l'efficacité des cellules. L'alternative est de placer tous les contacts sur l'arrière des cellules solaires pour réduire les effets d'ombrage. L'une des technologies les plus récentes proposées est la structure EWT. Cette structure a un émetteur en face avant mais tous les contacts sont en face arrière. L'interconnexion de l'émetteur entre l'avant et l'arrière est réalisée à travers des trous dans le substrat. Ces trous, généralement percés au laser, sont diffusés et permettent ainsi d'assurer la collecte des porteurs depuis la face avant jusqu'à l'arrière. Ce concept augmente également la surface latérale de la jonction. Dans cette thèse, la simulation sous environnement Atlas / Silvaco a été utilisée pour optimiser les paramètres géométriques et physiques les plus importants des cellules solaires EWT au silicium multi-cristallin. La principale difficulté est le grand nombre de paramètres affectant les performances de ce type de structure. Cependant, notre étude se concentre sur le substrat, l'émetteur, le champ de surface arrière (BSF) et les contacts métalliques. Notre code de simulation numérique permet de trouver la conception optimale de la structure EWT. L'efficacité de conversion peut atteindre une valeur de 18,6% en considérant un substrat de silicium multi-cristallin de type p avec une durée de vie des porteurs minoritaires de l'ordre de 10^{-6} s. Une autre partie concerne les effets des diélectriques sur le rendement de conversion des cellules solaires. Différents matériaux, tels que Al_2O_3 , HfO_2 , TiO_2 et SiO_2 , ont été déposés par diverses techniques sur la face avant d'une cellule photovoltaïque EWT (Emitter Wrap Through) au silicium multi-cristallin (mc-Si). L'épaisseur de la couche passivée a été optimisée en utilisant le logiciel Matlab. Les vitesses de recombinaison utilisées dans la simulation ont été tirées de la littérature. A l'aide du logiciel TCAD (2D) Silvaco / Atlas, les meilleurs résultats (pour les paramètres électriques) ont été obtenus avec TiO_2 (indice de réfraction $n = 2.6$ à $\lambda = 620\text{nm}$ pour une épaisseur de 5nm, un rendement de cellule solaire d'environ 20,5% est obtenu..

Mots clés : silicium multi-cristallin ; émetteurs enterrés ; simulation ; passivation ; rendement

Abstract

The growth of the photovoltaic industry is based on the reduction of manufacturing costs to make the energy more competitive with fossil fuels. To achieve this aim, we must reduce the production cost ratio on cell efficiency. One way is to make all contacts on rear side of solar cells to reduce the shadowing effects. One of the most recent proposed technologies is the emitter wrap through. This structure has an emitter on the front but all contacts are on the rear side. The interconnection of the emitter between the front and the rear is accomplished through holes in the substrate. These holes, usually buried with a laser, are diffused and thus allow ensuring the collection of the carriers from the front face until to the rear one. This concept increases also the lateral surface of the junction. In this thesis, the simulation under Atlas/Silvaco environment was used to optimize the most important geometrical and physical parameters of EWT silicon solar cells. The main difficulty was the large number of parameters affecting the performance of this type of structure. However, our study focuses on the substrate, the emitter, the back surface field (BSF) and the metal contacts. Our numerical simulation code allows to monitoring the optimal design of EWT structure. The conversion efficiency can reach a value of 18.6% by considering a p-type multi-crystalline silicon substrate with a minority carrier lifetime in order of 10^{-6} s. Another part concerns the dielectric effects on solar cell efficiency. Different materials, such as Al_2O_3 , HfO_2 , TiO_2 and SiO_2 , were deposited by various techniques on the front side of a p-type EWT (Emitter Wrap Through) multi crystalline silicon (mc-Si) solar cell. The passivated layer thickness was optimized using the software Matlab. The recombination velocities utilized in the simulation were taken from the literature. Using the software TCAD (2D) Silvaco/Atlas, the best results (for electrical parameters) were achieved with TiO_2 (refractive index $n= 2.6$ at $\lambda=620\text{nm}$ for a thickness of 5nm, a solar cell efficiency around 20,5% was obtained.

Key words : multicristalline silicon ; emitter wrap through ; simulation ; passivation ; efficiency

ملخص

يستند نمو الصناعة الضوئية على خفض تكاليف التصنيع لجعل الطاقة أكثر قدرة على المنافسة مع الوقود الأحفوري. لتحقيق هذا الهدف، يجب علينا خفض نسبة تكلفة الإنتاج على كفاءة الخلية. طريقة واحدة لجعل جميع الاتصالات على الجانب الخلفي من الخلايا الشمسية للحد من آثار التظليل. إحدى من أحدث التقنيات المقترحة هو EWT. من خلال هذا الهيكل لديه باعث على الجهة المعرضة للضوء ولكن جميع الاتصالات على الجانب الخلفي. يتم تحقيق الربط بين المرسل بين الأمام والخلف من خلال الثقوب في الركيزة. هذه الثقوب، وعادة ما دفن مع الليزر، وتنتشر، وبالتالي تسمح ضمان جمع الناقلات من الوجه الأمامي حتى إلى الوجه الخلفي. هذا المفهوم يزيد أيضا من السطح الجانبي للتقاطع.

في هذه الرسالة، تم استخدام المحاكاة تحت بيئة أطلس / سيلفاكو لتحسين أهم المعلمات الهندسية والمادية للخلايا الشمسية السليكونية EWT. وكانت الصعوبة الرئيسية هي عدد كبير من المعلمات التي تؤثر على أداء هذا النوع من الهيكل. ومع ذلك، تركزت دراستنا على الركيزة، باعث، حقل السطح الخلفي (BSF) والاتصالات المعدنية. لدينا رمز محاكاة العددية يسمح لرصد التصميم الأمثل للهيكل EWT. كفاءة التحويل يمكن أن تصل إلى قيمة 18.6% مع أقلية عمر الناقل في أجل τ تساوي ثانية 10^{-6}

في هذه الدراسة، تم التحقيق في التأثيرات العازلة على كفاءة الخلايا الشمسية. تم ترسيب مواد مختلفة، مثل TiO_2 ، HfO_2 ، Al_2O_3 و SiO_2 ، بواسطة تقنيات مختلفة على الجانب الأمامي من الخلايا الشمسية متعددة البلورات من نوع p تم تحسين سماكة طبقة التخميل باستخدام برنامج MATLAB. تم أخذ سرعات إعادة التركيب المستخدمة في المحاكاة من الأدب. باستخدام البرنامج TCAD (D2) سيلفاكو / أطلس، تم تحقيق أفضل النتائج (للمعلمات الكهربائية) مع TiO_2 (معامل الانكسار $n = 2.6$ مع $\lambda = 620$ نانومتر) لسمك 5 نانومتر. تم الحصول على كفاءة الخلايا الشمسية حوالي 20.5%

الكلمات المفتاحية: السيليكون متعدد الكريستالات، المرسلات المدفونة، المحاكاة، التخميل، المرود

Feuille de route

La démarche suivie dans notre travail est scindée en quatre chapitres distincts :

Après une introduction générale sur les ressources énergétiques mondiales et la part des énergies renouvelables, le premier chapitre traite d'une façon globale le contexte énergétique mondial en se basant sur des rapports publiés par des Agences gouvernementales américaines et européennes de l'Energie et positionne les cellules solaires dites conventionnelles à base de silicium cristallin à l'échelle mondiale de la production de l'énergie. Après un rappel sur le rayonnement solaire et l'effet photovoltaïque, la cellule solaire conventionnelle dite « standard » est décrite en détail et son principe de fonctionnement est présenté.

Le deuxième chapitre est consacré à la structure innovante Emitter Wrap Through à base de silicium multi cristallin. Après une description de la technologie utilisée pour ce type de cellules, et après avoir rappelé quelques résultats obtenus dans la littérature, les avantages et les inconvénients des structures EWT sont cités. Ensuite, les paramètres clés qui y interviennent sont mis en valeur. Ensuite, nous avons justifié le choix de la technique de métallisation qu'est la sérigraphie et qui est la technique la plus couramment utilisée pour la production de cellules solaires industrielles en raison de son faible coût, sa rapidité et sa facilité de mise en œuvre. Enfin, la passivation de surface avec différentes techniques de dépôts et avec différents diélectriques a été étudiée.

Comme notre travail est basé sur la simulation, nous avons jugé utile de présenter au troisième chapitre les méthodes et modèles physiques utilisés par le simulateur Atlas de Silvaco pour le développement et la « conception » de la structure EWT.

Enfin, dans le dernier et quatrième chapitre, différents paramètres ont été simulés et leurs variations ont permis de montrer leurs effets sur le rendement d'une cellule à structure EWT. La passivation de surface avec différentes techniques de dépôts et avec différents diélectriques a été étudiée. Une discussion étayée sera faite aussi. Enfin, une conclusion générale et des perspectives clôtureront ce modeste travail.

Introduction générale

Depuis fort longtemps, l'histoire de l'énergie est une histoire violente, marquée par des guerres entre les états ou des discordes territoriales au sein d'une même nation. La consommation d'énergie est primordiale pour le développement socio-économique ; mais encore faut-il la maîtriser c'est-à-dire produire de l'énergie mais savoir l'économiser [1].

En ce début du 21^{ème} siècle, les problèmes écologiques constituent un pari tangible pour la société qui, étrangement, ne cesse d'accroître ses besoins énergétiques .

Vu l'avenir incertain du nucléaire dans la transition énergétique, et au moment où les réserves de pétrole et de gaz naturel s'amenuisent, les énergies renouvelables s'avèrent être une ressource inéluctable pour traiter, ne serait-ce qu'une partie de ces problèmes.

Toute réflexion faite, la planète d'aujourd'hui et de demain est confrontée à un problème majeur de société, et c'est au physicien de chercher à mettre un terme à ces problèmes ou du moins les réduire.

Commencer par identifier cette situation nécessite une « réflexion éthique »¹ d'où la nécessité de parler de développement durable [2].

Ce dernier, utilisé bien dès fois, d'une manière abusive, tient son sens originel du « rapport du club de Rome » tenu en 1972 [3] et qui avait pour but de tirer la sonnette d'alarme sur la pollution et la démographie. Depuis, la notion de développement durable a évolué et c'est maintenant une manière de penser et d'agir qui doit –à long terme- mêler le social, l'économie et l'écologie [4].

D'après le journal « Le Monde Planète », la population mondiale continue d'augmenter pour atteindre 9.77 Milliards en 2050 contre 7.55 Milliards actuellement et peut compter 11.8 Milliards en 2100. La technologie utilisée par chacun de nous a un coût écologique et nos besoins énergétiques sont en nette augmentation. La figure ci-dessous montre la croissance des besoins énergétiques.

¹ L'éthique est une interrogation, une inquiétude et un « sursaut » devant la situation où notre planète terre –si fragile et si précieuse- est menacée.

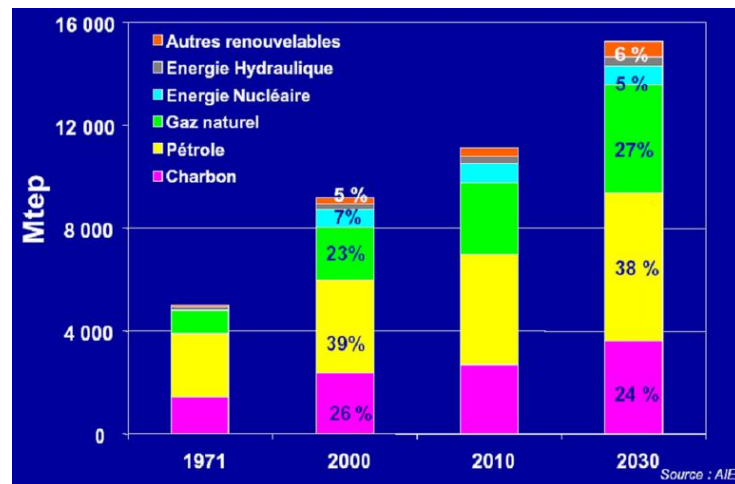


Figure 1 : Evolution de la consommation énergétique mondiale [5]

Au regard de la répartition énergétique mondiale – rapportée à la figure 2-, on comprend que les énergies renouvelables restent dérisoires pour subvenir à nos besoins, mais il est grand temps de porter un réel intérêt aux énergies renouvelables d'un point de vue économique et environnemental.

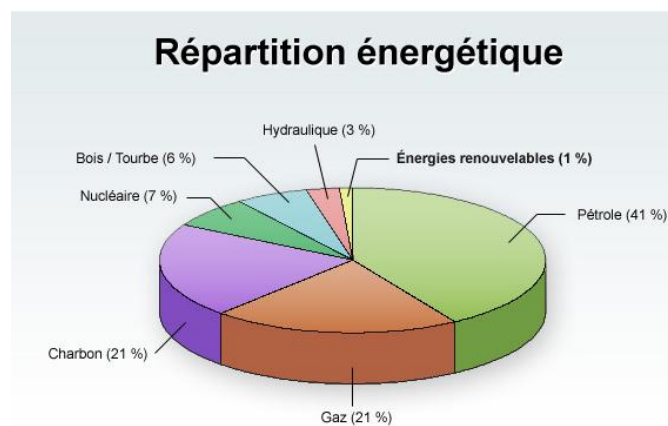


Figure 2 : Répartition énergétique mondiale [6]

Actuellement, l'évolution de l'électricité est caractérisée par une croissance active du marché des énergies renouvelables et une part croissante d'électricité renouvelable. Parmi ces sources d'énergies, on compte l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Cette stratégie pose les jalons d'un futur approvisionnement énergétique renouvelable.

L'une des énergies renouvelable très utilisée dans le monde, non polluante, est le solaire photovoltaïque. Ce dernier reposant sur la transformation directe des rayons lumineux du soleil en électricité [7] possède un potentiel important parmi les différentes énergies

renouvelables. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 Watt/m² [8].

L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir :

- Energie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions
- Frais de maintenance relativement faibles
- Permet de produire l'énergie électrique sans dégrader l'environnement
- Constitue des ressources pratiquement inépuisables.
- Les systèmes exigeant peu d'entretien, sont fiables, non polluants et silencieux [9].

Aujourd'hui, la plupart des cellules solaires commercialisées sont produites en utilisant du silicium monocristallin ou poly cristallin [10], [11]. Ces cellules solaires peuvent atteindre des rendements photovoltaïques de l'ordre de 24.7 %. Toutefois, les inconvénients majeurs sont le coût élevé du matériau et la forte consommation d'énergie au cours de la production.

Par ailleurs, la production photovoltaïque mondiale à base de silicium cristallin suscite un intérêt croissant de la part des industriels. En outre, cette filière reste la plus avancée sur le plan technologique. Actuellement les programmes de recherche et de développement de l'industrie photovoltaïque revêtent une extrême importance aux nouveaux procédés de croissance du silicium cristallin, à la minimisation des étapes technologiques, à l'optimisation des différentes structures photovoltaïques et à la réduction de l'épaisseur des cellules solaires [12].

Bibliographie de l'introduction générale

- [1] J. Damon-Lacoste, *Vers une ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonctions a-Si:H/c-Si. Rôle prépondérant de l'hydrogène.*, Ecole Polytechnique-LPICM: Thèse de Doctorat, 2007.
- [2] J.-J. PIREAUX, *Physique et énergie Travail sur les panneaux photovoltaïques*, Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, Namur, 2006/2007.
- [3] E. Vieille-Blanchard, *Le rapport au Club de Rome : stopper la croissance, mais pourquoi ?*, <http://www.reporterre.net/>, 15 mars 2012.
- [4] *Développement durable*, https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9veloppement_durable.
- [5] C. CABAL et C. GATIGNOL, *la définition et les implications du concept de voiture propre*, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2005.
- [6] M. Tricot, *Quelle énergie choisir ?*, http://www.ei-tricot.fr/developpement_durable.html.
- [7] N. Oleksiy, *Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités*, Thèse de Doctorat, 2005.
- [8] M. Dankassoua, S. Madougou, A. Aboubacar et A. Foulani, *Etude du rayonnement solaire global à Niamey de la période de pré-mousson et de la mousson de l'année 2013 (mai à octobre)*, Revue des Energies Renouvelables Vol. 20 N°1 , 2017.
- [9] *Introduction aux systèmes photovoltaïques (solaires électriques)*, <http://www.rescer.gc.ca>.
- [10] P. Papet, *Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium cristallin*, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon: Thèse de doctorat, 2007.
- [11] C. Puvareka ,N. Kannan, *Fundamentals of Photovoltaic Technology (PV): A Review* Middle-East Journal of Scientific Research 25 (3): 536-542, 2017
- [12] N. SAHOUANE, *Elaboration, Modélisation et Caractérisation des Cellules Solaires de type IIIème Génération dotées de Couches Antireflets à Indice Graduel*, Université Abou Bekr Belkaïd: Thèse de Doctorat, 2016

Chapitre I

La Cellule Solaire Au Silicium

Liste des figures du chapitre I

Liste des tableaux du chapitre I

Introduction

- I- Le rayonnement solaire: notions préliminaires
- II- La consommation mondiale de l'énergie
- III- La jonction PN
 - III-1 Le silicium : matériau semi-conducteur
 - III.2 Le dopage du silicium
 - III.2.1 Le silicium intrinsèque
 - III.2.2 Le silicium extrinsèque
 - III.2.2.1 les donneurs
 - III.2.2.2 les accepteurs
- IV- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque
 - IV.1 Historique sur l'effet photovoltaïque
 - IV.2 Principe de l'effet photovoltaïque
 - IV.3 La cellule solaire
 - IV.3.1 Les constituants de base d'une cellule solaire
 - IV.3.2 Fonctionnement d'une cellule solaire
 - IV.3.3 Modélisation électrique
 - IV.3.4 Réponse spectrale
- V- Pertes fondamentales et technologiques limitant le rendement
 - V.1 Pertes fondamentales
 - V.1.1 Absorption incomplète des photons
 - V.1.2 Excès d'énergie des photons
 - V.1.3 Facteur de tension
 - V.1.4 Facteur de forme
 - V.2 Pertes technologiques

V.2.1 Pertes optiques

V.2.1.1 Les réflexions

V.2.1.2 Le taux d'ombrage

V.2.1.3 Le rendement d'absorption

V.2.1.4 Le rendement de collecte

V.2.2 Pertes par recombinaison

V.2.2.1 la recombinaison radiative

V.2.2.2 la recombinaison Auger

V.2.2.3 la recombinaison assistée par défauts

V.2.2.4 la recombinaison en surface

V.2.3 Pertes résistives

V.2.3.1 la résistance parallèle

V.2.3.2 la résistance série

VI- Technologies pour la réduction des pertes

VI.1 Passivation des faces avant et arrière

VI.2 Couche antireflet

VI.3 BSF

VI.4 Texturation de la surface

VI.5 Contacts face avant et arrière

VII- Procédé industriel pour la fabrication de cellules solaires au silicium multi cristallin

VIII- Les principaux types de cellules solaires à base de silicium multi cristallin

VIII.1 La cellule standard industrielle

VIII.2 La structure HIT

VIII.3 La cellule PERL

VIII.4 La cellule RCC

Conclusion

Bibliographie du chapitre I

Liste des figures du chapitre I

- Figure I-1 : Diagramme montrant la relation entre zénith, nadir et les 2 types d'horizons
- Figure I-2 : L'irradiance spectrale en fonction de la longueur d'onde : Représentation graphique des spectres AM0, AM1 et AM1.5
- Figure I-3 : Les semi conducteurs dans le tableau périodique de Mendeleïev
- Figure I-4 : Silicium dopé au Phosphore a : $T=0K$ b : $T\neq 0K$
- Figure I-5 : Silicium dopé au Bore a : $T=0K$ b : $T\neq 0K$
- Figure I-6 : Semi conducteur à a : gap direct b : gap indirect
- Figure I-7 : Diagramme de bande, densité d'états, fonction de Fermi et concentrations des porteurs pour le matériau intrinsèque (en haut), le matériau de type n (au milieu), et (en bas) matériau de type p
- Figure I-8 : L'effet photovoltaïque
- Figure I-9 : La jonction PN au niveau atomique, Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule solaire
- Figure I-10 : Schéma électrique équivalent
- Figure I-11 : Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire sous éclairement et sous obscurité (à gauche) et représentation conventionnelle de la courbe $I=f(V)$ (à droite)
- Figure I-12 : Les mécanismes de recombinaison au sein du silicium a) recombinaison radiative, b) recombinaison Auger, c) et d) recombinaison SRH
- Figure I-13 : Influence de a) la résistance parallèle b) la résistance série
- Fig I-14 : Répartition des pertes liées aux limites technologiques et leur influence sur le rendement de la cellule
- Figure I-15 : Représentation schématique de réflexion de la lumière sur une pyramide (à gauche) et de microscopie optique de la surface de silicium texturée (à droite)
- Figure I-16: Processus standard de fabrication d'un module photovoltaïque
- Figure I-17 : La structure d'une cellule solaire industrielle
- Figure I-18 : La structure HIT
- Figure I-19 : La structure PERL
- Figure I-20: La structure RCC

Liste des tableaux du chapitre I

- Tableau I-1 : Le potentiel solaire algérien
- Tableau I-2 : Production énergétique mondiale commercialisée selon la source d'énergie
- Tableau I-3 : Quelques exemples de semi conducteurs
- Tableau I-4 : Différences entre un métal, un semi conducteur et un isolant

Introduction

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du photovoltaïque. Nous aborderons ainsi, en premier lieu quelques notions sur le soleil : source « inépuisable » d'énergie, puis nous exposerons quelques rudiments sur le silicium et son application dans le domaine photovoltaïque. Ensuite, nous décrirons le fonctionnement des cellules solaires et leurs caractéristiques principales. Pour finir, nous introduirons la notion de la structure EWT « Emitter Wrap Through » qui fait l'objet de ce travail.

Les pages suivantes rassemblent un rappel des aspects fondamentaux de matériaux semi conducteurs et les mécanismes physiques qui régissent les dispositifs photovoltaïques. Ces mécanismes physiques sont utilisés pour expliquer le fonctionnement d'une jonction pn qui est la base de la plupart des cellules solaires ainsi que la plus grande majorité des dispositifs électroniques [1]. Bien que les matériaux semi-conducteurs ne se limitent pas uniquement au silicium, mais son abondance dans la croûte terrestre (26 en masse après l'oxygène [2]) a conduit à sa prédominance sur le marché du photovoltaïque [3].

I- Le rayonnement solaire: notions préliminaires

On ne peut parler de cellule solaire et d'effet photovoltaïque sans parler d'abord de la source d'énergie « inépuisable » utilisée qu'est le SOLEIL. Ce dernier apparaît comme un corps noir à la température $T=5800\text{K}$ [4] ; ce qui conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 520nm pour une puissance de 60MW/m^2 . Si on tient compte de la distance entre la terre et le soleil qui est de 150.10^6km , alors l'éclairement moyen annuel est de 1367W/m^2 hors atmosphère [5]. Pour une comparaison efficace des performances des cellules solaires fabriquées par les différents laboratoires, il a été établi la notion d'Air Mass (AM) qui représente la puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith :

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad \text{EqI-1}$$

Du lieu d'observation, si le soleil est au zénith (point sur la verticale au dessus de notre tête), alors $AM=1$ ($\theta=0^\circ$) et on note $AM1$.

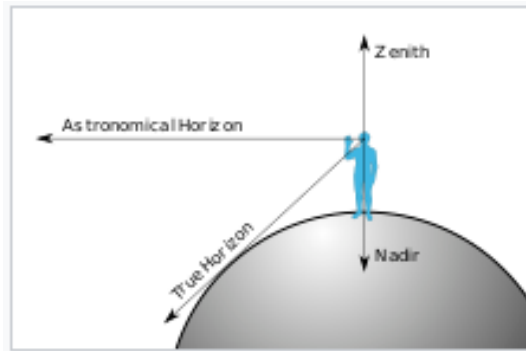


Figure I-1 : Diagramme montrant la relation entre zénith, nadir et les 2 types d'horizons [6]

AM0 est surtout utilisé pour prévoir le comportement des cellules solaires dans les applications spatiales (hors atmosphère).

AM1.5G (G qui représente « global ») est le plus usité et le plus étudié car il prend en compte les radiations diffuses et directes. AM1.5G correspond à une irradiance de 970W/m^2 ajustée à 1KW/m^2 .

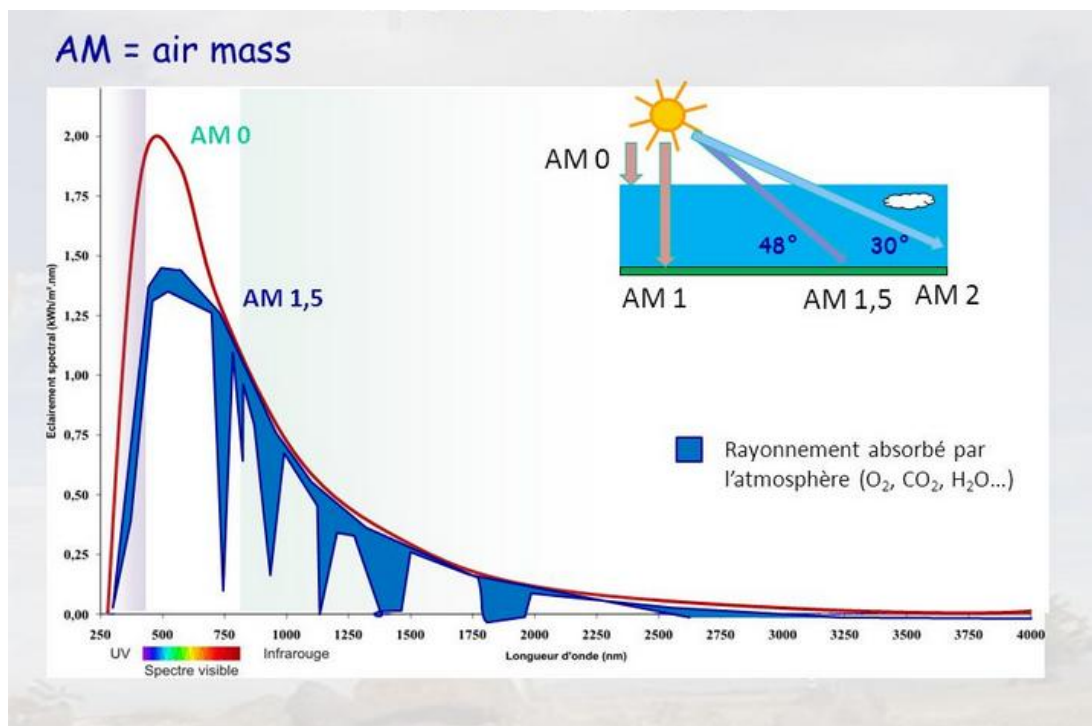


Figure I-2 : L'irradiance spectrale en fonction de la longueur d'onde : Représentation graphique des spectres AM0, AM1 et AM1.5 [7]

De la figure ci-dessus, ressort que la majeure partie du spectre solaire à la surface de la terre a trait au domaine du visible et du proche infrarouge. A souligner que les conditions climatiques et l'altitude du lieu n'interviennent pas dans les irradiances définies par les nombres AM. Ainsi, la terre présente de grandes disproportions dans la distribution de la puissance solaire.

D'après le « Weather Bureau »¹ des Etats Unis, il n'existerait que trois régions au monde qui jouiraient d'un ensoleillement annuel moyen supérieur à 4 000 h soit plus de 11 h par jour : le rapport fait état que le Sahara de l'Afrique du nord, le littoral désertique du nord du Chili mais aussi quelques déserts comme celui de Californie ou encore de l'Arizona détiendraient le record mondial de « la région la plus ensoleillée sur la terre ».

L'ensoleillement annuel moyen peut atteindre 7000Wh/m²/jour pour le nord de l'Australie, autour de 3000Wh/m²/jour pour l'Espagne et moins de 1000Wh/m²/jour pour le sud de la Suède. L'Algérie quant à elle est soumise à une durée moyenne d'ensoleillement comprise entre 2650 et 3500h/an [8]. Au niveau national, la répartition du potentiel solaire par région est représentée par le tableau suivant :

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m²/an)	1700	1900	2650

Tableau I-1 : Le potentiel solaire algérien [8]

II- La consommation mondiale de l'énergie

Depuis la révolution industrielle, la consommation mondiale de l'énergie est en constante augmentation. En effet selon le rapport annuel publié par l'Agence gouvernementale américaine de l'énergie (EIA: Agence Internationale de l'Energie) en juillet 2013, sur les perspectives énergétiques à l'échelle mondiale, la consommation énergétique mondiale devrait augmenter de 56% d'ici 2040, entraînant ainsi une hausse de 46% des émissions de CO₂ avec 80% assurée par les énergies fossiles non renouvelables [9].

D'après le « British Petroleum »², la production mondiale d'énergie commercialisée en 2016 est en progression de 18% depuis 2006 selon la répartition suivante [10] :

¹ Le *National Weather Service* (NWS ; « Service météorologique national ») est le service météorologique des États-Unis. C'est un des six services scientifiques qui composent le *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), l'agence gouvernementale chargée de la recherche et la surveillance de l'atmosphère et des océans sur tout le territoire américain. Le NWS est plus spécifiquement chargé de la recherche sur les phénomènes atmosphériques, la prévision du temps, les études climatologiques et hydrologiques. Il émet les alertes météorologiques et hydrologiques pour avertir la population des dangers imminents et fait des études sur le changement du climat.

² La société «**British Petroleum**» est une compagnie anglaise de recherche, d'extraction, de raffinage et de vente de pétrole fondée en 1909. Elle est la 3^{ème} compagnie pétrolière mondiale. Depuis le début des années 2000 et jusqu'à 2010, l'entreprise a connu plusieurs accidents industriels qui ont fait que le géant pétrolier songe à investir dans le secteur du solaire. En 2001, il abandonne même l'appellation « British Petroleum » pour « Beyond Petroleum » qui veut dire « au-delà du pétrole » en s'engageant dans l'éolien, les biocarburants et le solaire. Mais depuis 2010, face au durcissement du marché solaire, et jugeant les niveaux de rentabilité atteints incorrects, BP se retire définitivement de cette diversification.

- 33% de pétrole
- 27.5% de charbon
- 24.2% de gaz naturel
- 4.5% de nucléaire
- 10.7% d'énergies renouvelables dont :
 - L'hydroélectricité 6.9%
 - L'éolien 1.6%
 - La biomasse et la géothermie 1%
 - Le solaire 0.6%

Ainsi, l'augmentation de la consommation mondiale en énergie a atteint un taux élevé du fait du développement de plusieurs pays, autrefois considérés comme des pays à consommation énergétique modérée, tels que la chine, l'inde et bien d'autres pays émergents.

D'après BFM-Business, et selon l'Agence Internationale de l'Energie, la demande mondiale en énergie augmentera de 37% d'ici 2040.

Face à la raréfaction progressive des ressources mondiales en énergie traditionnelle et face aux multiples crises d'énergie que connaît le monde, la communauté internationale est obligée de changer ses habitudes en matière de consommation énergétique et de son côté, la science s'est orientée naturellement aux ressources renouvelables et notamment vers la plus ancienne : Le soleil [9].

Dans ce contexte, il apparaît urgent de développer des moyens de production d'électricité respectueux de l'environnement en s'appuyant sur des ressources durables et exploitables sur la quasi-totalité de notre planète telles que le vent, le solaire ou encore la géothermie [11].

Le solaire photovoltaïque se développe partout dans le monde mais il y a un seul trio en tête : la Chine, l'Allemagne et le Japon [12]. La Chine a fait du solaire (au-delà du charbon) sa priorité en matière énergétique, ce qui l'a conduit à subventionner cette filière et dominer l'offre mondiale. Quant à l'Allemagne, sa volonté de sortir du nucléaire, a fait que ce

pays soit le premier pays solaire au monde. Selon l'institut allemand Fraunhofer¹, la capacité totale installée dans le monde a atteint 242 GW à la fin 2015. Elle était de 134 GW en 2013 et de 178 GW en 2014, ce qui confirme une croissance soutenue du photovoltaïque (elle a été en moyenne annuelle de 42 % entre 2000 et 2015). Fin 2015, l'Europe reste la zone mondiale la plus équipée en solaire photovoltaïque avec une capacité installée représentant 40 % du total mondial. L'Allemagne compte pour 16 % et est désormais devancée par la Chine (21 %). Le Japon vient en 3^e position (14 %), devant l'Amérique du Nord (13 %). Suivent l'Italie, le Royaume-Uni et la France, suivies de près par l'Espagne et l'Inde [13].

Actuellement la filière photovoltaïque assure 2.6% de la production mondiale d'électricité et 5.2% pour l'Europe [14]. Mais dans l'hypothèse d'une croissance annuelle progressive, l'industrie photovoltaïque pourrait contribuer mieux dans l'avenir aux besoins mondiaux en électricité. Cependant des progrès technologiques récents, ainsi que l'augmentation du coût du pétrole et du gaz enregistrée récemment rendent de plus en plus attractive la filière solaire photovoltaïque [10], avec l'espoir de disposer, dans les prochaines années, d'une énergie électrique photovoltaïque à un coût équivalent à celui du réseau électrique, au moins dans les régions très ensoleillées [9], [15].

Énergie	Production en 2006	Production en 2016	Variation 2016/2006	Production 2016 en Mtep	Part en 2016
Pétrole	82,52 Mbbbl/j ²	92,15 Mbbbl/j	+12 %	4 382	33,0 %
Charbon	6 436 Mt	7 460 Mt	+16 %	3 656	27,5 %
Gaz naturel	2 877 Gm ³	3 552 Gm ³	+23 %	3 213	24,2 %
Hydraulique	3 038 TWh ³	4 023 TWh	+32 %	910	6,9 %
Nucléaire	2 806 TWh	2 617 TWh	-7 %	592	4,5 %
Éolien	133 TWh	959 TWh	+621 %	217	1,6 %

¹ L'Institut Fraunhofer pour l'énergie solaire ISE est un organisme allemand spécialisé dans la recherche en sciences appliquées. C'est le plus grand centre de recherche solaire en Europe. Son financement est assuré en partie par l'État (le gouvernement fédéral), mais les deux tiers du budget proviennent de contrats de recherches passés avec des industriels. L'Institut est chargé de promouvoir des systèmes énergétiques durables, compétitifs, sûrs, basés sur les énergies renouvelables. Respectueux de l'environnement, l'Institut développe des matériaux, des composants, des systèmes et des procédés dans des domaines tels que le bâtiment, les énergies renouvelables, le solaire et la technologie de l'hydrogène...

Géothermie, Biomasse	273 TWh	562 TWh	+106 %	127	1,0 %
Biocarburants	522 kbblep/j	1 539 kbblep/j	+195 %	82	0,6 %
Solaire photovoltaïque	5,8 TWh	333 TWh	× 56	75	0,6 %
Total énergie primaire	11 267 Mtep ¹		+18 %	13 276	100 %

Tableau I-2 : Production énergétique mondiale commercialisée selon la source d'énergie [10]

Dans ce sens, l'EPIA⁵ a estimé un coût plutôt optimiste du Watt-crête⁴ pour l'année 2015, aux environs de 2.35€. Une projection réalisée par la même association prévoit que l'électricité solaire pourrait occuper une place non négligeable vers 2030 [16].

III- La jonction PN

III-1 Le silicium : matériau semi-conducteur

Les atomes d'un semi-conducteur proviennent soit du groupe IV de la classification périodique (voir figure 4) ou d'une combinaison du groupe III et du groupe V (appelés semi conducteurs III-V) ou d'une combinaison du groupe II et du groupe VI (appelés semi-conducteurs II-VI) [17] (voit tableau I-3).

¹ **Le Mtep** qui signifie Million de tonnes équivalent pétrole ; et 1tep représente la quantité d'énergie contenue dans 1 tonne de pétrole brut. Il ne fait pas partie du système international. A titre d'exemple, l'Agence Internationale de l'Energie retient les équivalences suivantes : 1bep= 0.146tep= 161m³ de gaz et 1000m³ de gaz=6.2bep

² **bb** qui signifie « blue barrel » ou baril en abrégé. La production de pétrole et ses dérivés se mesure en barils par jour. 1baril vaut 159litres.

³ **Le Téra watt heure (TWh)** vaut 10¹²watt heures et le watt heure est l'énergie consommée par un dispositif d'une puissance de 1Watt fonctionnant pendant 1heure. Le Téra watt heure fait partie du système international.

⁴ **Le watt-crête Wc** ou Wp (de l'anglais Watt-peak) est l'unité de mesure de puissance d'un panneau solaire. Il correspond à la délivrance d'une puissance électrique de 1Watt, sous deux conditions : un ensoleillement de 1000 W/m² et une température de 25 °C. Il sert à comparer le rendement des matériaux photovoltaïques et à indiquer la taille d'un équipement photovoltaïque.

⁵ **L'EPIA** (l'Association Européenne de l'Industrie Photovoltaïque), actuellement nommée Solar Power Europe est une association qui veille à ce que l'énergie solaire devienne le premier contributeur au système énergétique en Europe.

Fig I-3 : Les semi conducteurs dans le tableau périodique de Mendeleïev¹ [46]

Colonne	Semi conducteur
IV	Si, Ge
III – V Binaire Ternaire Quaternaire	GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb $Al_xGa_{1-x}As$, $GaAs_yP_{1-y}$ $Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$
II – IV Binaire ternaire	CdS, HgTe, CdTe, ZnTe, ZnS $Cd_xHg_{1-x}Te$

Tableau I-3 : Quelques exemples de semi conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique (l'inverse de la résistivité électrique) d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux (conducteurs) et celle des isolants.

¹ **Dimitri Ivanovitch Mendeleïev** est un chimiste russe, né en 1834 à Tobolska (Sibérie) et décédé en 1907 à St-Petersbourg (Russie). Mendeleïev a rassemblé tous les éléments chimiques connus de l'époque et a donné pour chacun leur masse atomique et quelques propriétés. Ensuite, il a décidé de les classer par masse atomique croissante, mais en les rassemblant par groupes d'éléments ayant des propriétés communes. Cela a donné un tableau de 5 colonnes de dix-huit éléments. Mais le génie de Mendeleïev réside dans le fait qu'il a aussi laissé des cases libres dans son tableau pour y placer des éléments qui n'étaient pas encore découverts à l'époque. De nos jours, le tableau de Mendeleïev s'appelle la « classification périodique des éléments » et c'est un peu comme « l'alphabet » des scientifiques.

Conducteur		Semi-conducteur	Isolant
Résistivité ρ inférieure à $10^{-6} \Omega m$		Résistivité intermédiaire $10^{-6} < \rho < 10^{10}$	Résistivité ρ supérieure à $10^{10} \Omega m$
Bande de valence et bande de conduction qui se chevauchent	Bande de conduction non-vide	Bande de conduction vide	Bande de conduction vide
Bande de Conduction	Grande bande interdite	Petite bande interdite	Grande bande interdite
Bande de valence	Bande de valence pleine	Bande de valence pleine	Bande de valence pleine

Tableau I-4 : Différences entre un métal, un semi conducteur et un isolant [18],

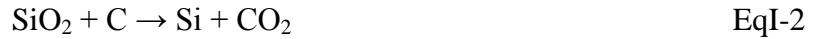
Le modèle classique a été remplacé par le modèle quantique des bandes d'énergie. Dans l'atome isolé, les électrons occupent des niveaux d'énergie discrets. Dans un cristal, par suite des interactions entre les atomes, ces niveaux discrets s'élargissent et les électrons occupent des bandes d'énergie permises séparées par des bandes interdites. La répartition des électrons dans les niveaux obéit aux lois de la thermodynamique statistique. Au zéro absolu, seuls sont peuplés les niveaux de plus basse énergie.

Dans les isolants, les bandes d'énergie les plus faibles sont entièrement pleines. La hauteur de la bande interdite est grande ($\approx 5eV$). Il n'y a pas de niveaux d'énergie accessibles et donc pas de conduction.

Dans les conducteurs, la dernière bande occupée est partiellement remplie: il existe beaucoup de niveaux disponibles et la conduction est grande.

Pour les semi-conducteurs, le taux de remplissage de la dernière bande occupée est soit très faible soit très important. La hauteur de la bande interdite est faible ($\approx 1eV$). La conduction est faible et varie beaucoup avec la température.

Le silicium est introuvable à l'état pur dans la nature. Il est obtenu à partir de la silice, appelé dioxyde de silicium dont la formule chimique est SiO_2 . Les gisements fournissent des sables fins blancs de très grande pureté (97 à 99 % de silice). On l'extrait d'abord de la silice. L'extraction se passe dans un four à arc à plus de 3000 °C car la silice doit être fondue. Ensuite le silicium est extrait grâce à la réaction chimique [19]:



C'est donc une réaction de carboréduction (appelée encore réduction carbothermique), c'est-à-dire que l'on a introduit du carbone dans la silice pour isoler le silicium.

Après cette opération, le silicium est obtenu sous forme liquide. Sa pureté est de 98 %, on parle de silicium métallurgique. Il faut le purifier afin d'obtenir un matériau adéquat pour les applications photovoltaïques. Il s'agit, en partant du silicium métallurgique, de faire une purification chimique. De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium. Au final, le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium purifiés à 99.99 % :

Une fois l'étape de purification terminée, vient l'étape de cristallisation du silicium liquide. Le produit issu de cette étape est un lingot de silicium à l'état solide. Il existe deux grandes méthodes de cristallisation. La première permet d'obtenir du silicium poly cristallin (composé de plusieurs cristaux), tandis que la deuxième permet d'obtenir du silicium monocristallin (composé d'un seul cristal).

III-2 Le dopage du silicium

III-2-1 Le silicium intrinsèque

Le silicium intrinsèque ne présente pas d'impuretés dopantes. Mais en pratique, un tel matériau est impossible à obtenir. Dans le silicium intrinsèque, il existe autant de trous que d'électrons libres susceptibles de participer à la conduction mais leurs densités n_i est très faible à température ambiante. La densité n_i est exprimée en fonction des densités d'états effectives de la bande de conduction N_c , de la bande de valence N_v et de l'énergie de bande interdite E_g ou gap ($E_g=1.12$ eV à 300K) [20], [21].

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right) \quad \text{EqI-3}$$

Telles que :

$$N_c = 2 * \left(\frac{2\pi m_{de} kT}{h^2}\right)^{3/2} = 5.4 * 10^{15} * T^{3/2} \text{cm}^{-3} \quad \text{EqI-4}$$

$$N_v = 2 * \left(\frac{2\pi m_{dh} kT}{h^2}\right)^{3/2} = 3.5 * 10^{15} * T^{3/2} \text{cm}^{-3} \quad \text{EqI-5}$$

Où h est la constante de Planck

m_{de} et m_{dh} sont les masses effectives d'un électron et d'un trou

tels que $m_{de} = 1.08 m_0$ et $m_{dh} = 0.81 m_0$ et $m_0 = 9,1.10^{-31}$ Kg (masse de l'électron) [22], [21]

III-2-2 Le silicium extrinsèque

Lorsque le silicium contient des impuretés dopantes, il est qualifié d'extrinsèque. Il existe deux types d'impuretés dopantes :

III-2-2.1 les donneurs : ils sont situés dans la colonne V du tableau périodique de Mendeleïev et sont le Phosphore et l'Arsenic. Ils possèdent un électron ($1e^-$) de valence de plus que les atomes de silicium et peuvent donc fournir $1e^-$ libre, pour participer à la conduction. Les donneurs ayant libéré un électron sont donc chargés positivement. Les électrons étant chargés négativement, ce dopage est appelé dopage de type n. La figure I-4 donne un aperçu de ce qui arrive au silicium dans lequel on introduit des atomes de Phosphore.

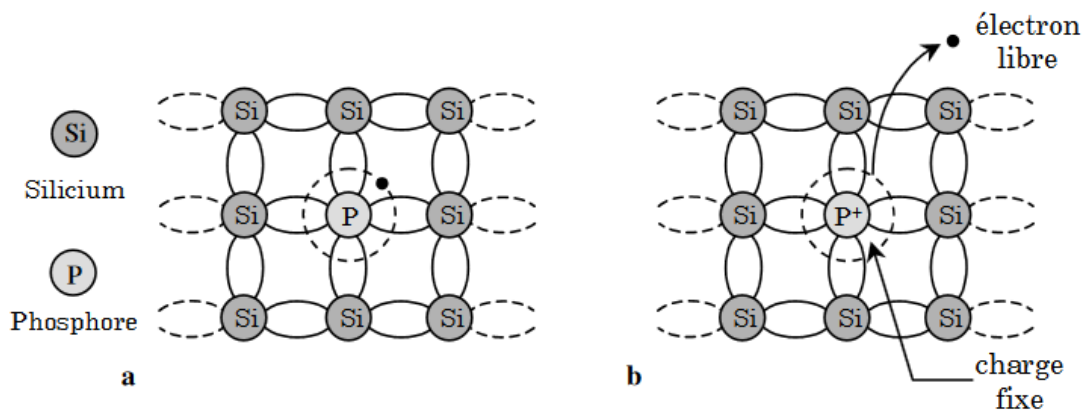


Figure I-4 : Silicium dopé au Phosphore a : $T=0K$ b : $T \neq 0K$ [20]

III-2-2.2 les accepteurs : ils sont situés dans la colonne III du tableau périodique de Mendeleïev et sont le Bore et le Gallium ou encore l'Indium. Ils possèdent un électron ($1e^-$) de valence de moins que les atomes de silicium et peuvent donc accepter $1e^-$ de la bande de valence, et laisser un trou qui participe à la conduction. Les accepteurs ayant cédé un trou sont donc chargés négativement. Les trous étant chargés positivement, ce dopage est appelé dopage de type p. La figure I-5 donne un aperçu de ce qui arrive au silicium dans lequel on introduit des atomes de Bore [21].

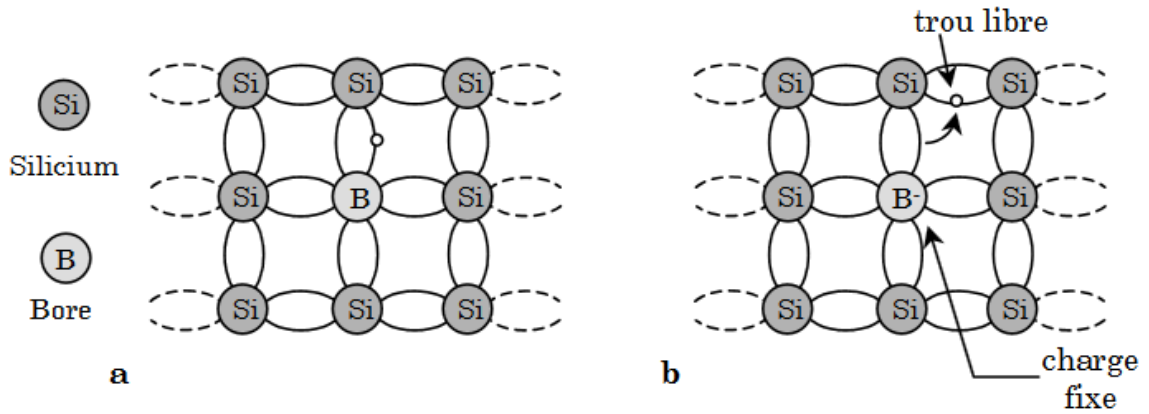


Figure I-5 : Silicium dopé au Bore a : $T=0K$ b : $T \neq 0K$ [20]

Le dopage peut modifier les propriétés électriques d'un matériau. La figure I-7 illustre un diagramme de bande pour montrer comment un semi-conducteur peut avoir plus de conduction d'électrons ou de trous.

Il y a deux types de semi conducteurs : ceux à gap direct et ceux à gap indirect [19]. La nature du gap joue un rôle primordial dans l'interaction du semi conducteur avec le rayonnement lumineux et par suite dans le fonctionnement des dispositifs optoélectroniques.

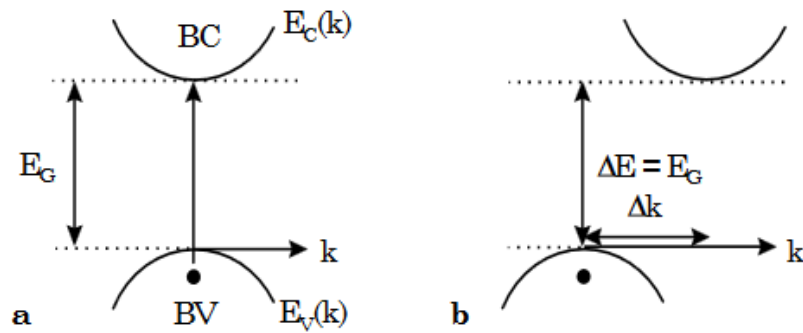


Figure I-6 : Semi conducteur à a : gap direct b : gap indirect [20], [21]

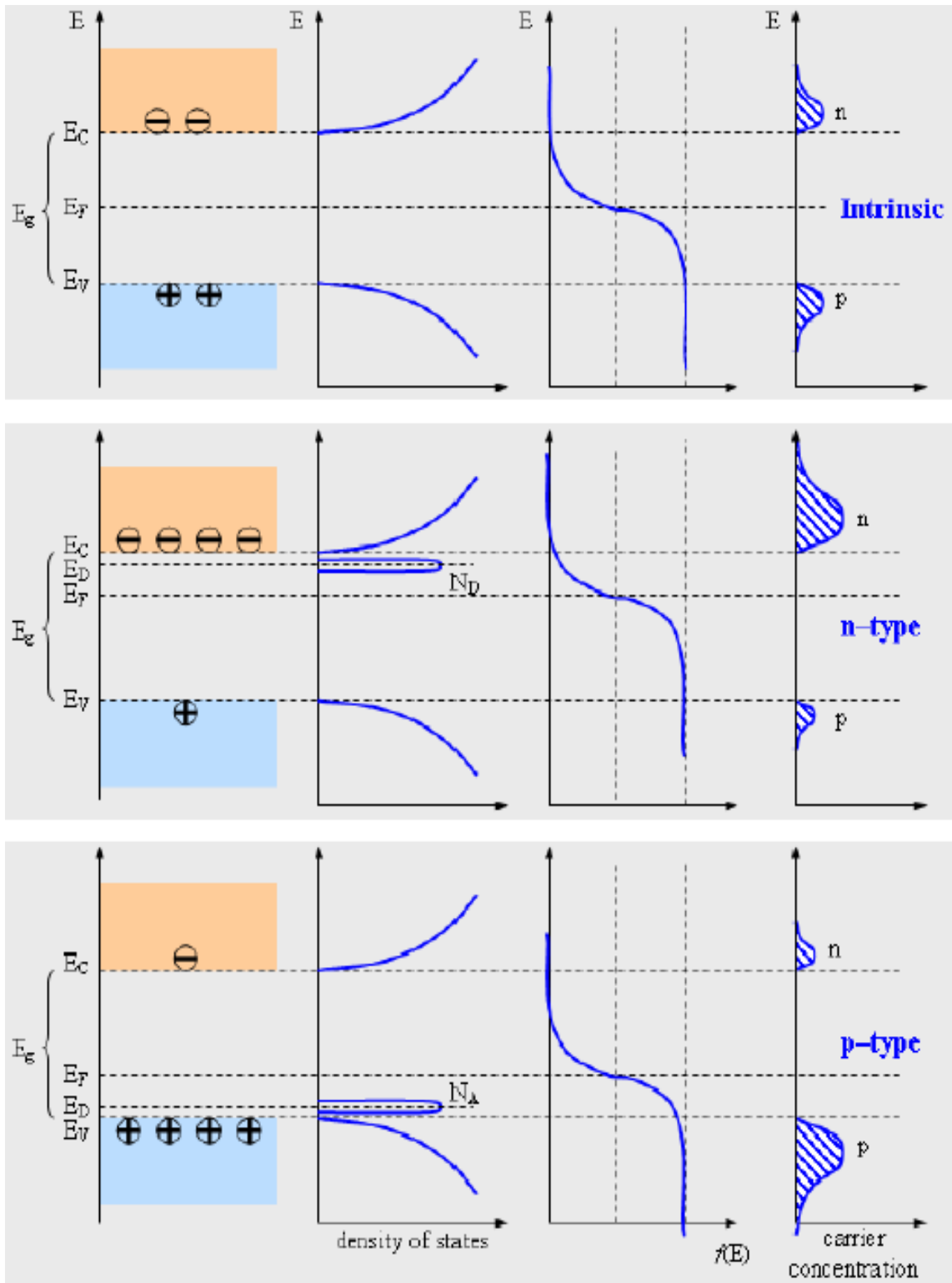


Figure I-7 : Diagramme de bande, densité d'états, fonction de Fermi et concentrations des porteurs pour le matériau intrinsèque (en haut), le matériau de type n (au milieu), et (en bas) le matériau de type p [23], [24].

IV- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

IV-1 Historique sur l'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par E.Becquerel¹ qui mit en évidence la propriété qu'ont certains matériaux de convertir directement la lumière en courant électrique. Il découvre l'effet photovoltaïque qui correspond à l'apparition d'une tension aux bornes d'un matériau semi-conducteur exposé à la lumière [5].

En 1912, Albert Einstein² établit les bases théoriques du photovoltaïque. Il postula que la lumière entrant dans ce type de matériaux était à l'origine de collisions entre les photons et les atomes, provoquant ainsi l'expulsion des électrons de leurs orbites et créant ainsi un courant électrique.

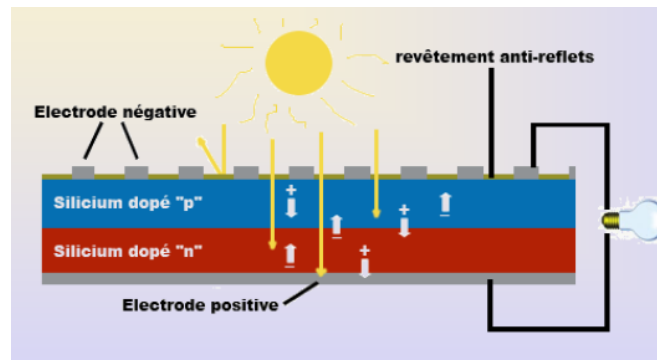


Fig I-8 : L'effet photovoltaïque [25]

Mais ce n'est qu'en 1954, que des chercheurs américains du laboratoire Bell ont mis au point la première cellule photovoltaïque en semi conducteur avec un rendement de 6% [26].

IV-2 Principe de l'effet photovoltaïque

¹**Alexandre Edmond .Becquerel** est un scientifique français qui découvre l'effet photovoltaïque. Mais cette découverte n'était pas efficace et ne pouvait être utilisée que pour mesurer la lumière. Jusqu'au jour où Russell Ohm a inventé la cellule solaire utilisée dans les panneaux solaires pour collecter l'énergie. Il a étonné le monde en permettant à l'électricité d'être produite.

²**Albert Einstein** est un physicien américain d'origine allemande. Par sa théorie fondamentale de la relativité, il a bouleversé la pensée scientifique et philosophique en changeant la conception humaine du temps, de l'espace et de l'univers. Ses travaux les plus célèbres restent sur la relativité restreinte et la relativité générale. En établissant le principe d'équivalence entre masse et énergie, en prouvant l'existence du photon, en démontrant que les caractéristiques du temps et de l'espace n'étaient pas absolues, mais "relatives" à l'observateur, il a redonné une nécessaire impulsion à la physique qui traversait une grave crise.

L'effet photovoltaïque repose sur trois principes dont l'action quasi simultanée engendre la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu utilisable [27], [19] à savoir :

- L'absorption de photons dont l'énergie est supérieure au gap
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres qui correspond à la création de paires électrons/trous dans le semi conducteur
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur

Un dispositif photovoltaïque doit donc contenir [5],[29]:

- Un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire et possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie
- Une structure de collecte (de très faible résistance électrique) : électrodes de collecte ou grilles placées en face avant et arrière.

IV-3 La cellule solaire

IV-3-1 Les constituants de base d'une cellule solaire

Tout en tenant compte d'un certain nombre de contraintes, la conception des cellules solaires nécessite de définir ses paramètres afin de maximiser son efficacité. Ces contraintes sont définies par l'environnement de travail dans lequel les cellules solaires sont produites. Par exemple, dans un environnement commercial où l'objectif est de produire une cellule solaire à prix concurrentiel, le coût de fabrication doit être pris en compte. Par contre, dans un environnement de recherche (au laboratoire), dont l'objectif est de produire une cellule solaire très performante, l'efficacité plutôt que le coût, est la principale considération.

Les caractéristiques de base des composants d'une cellule photovoltaïque sont les mêmes, bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules solaires.

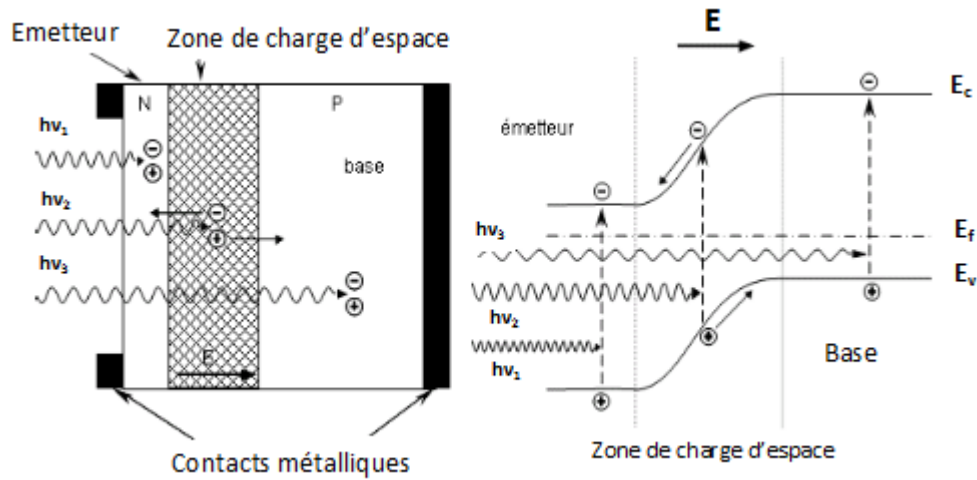


Fig I-9 : La jonction PN au niveau atomique [5],[29]
Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule solaire

Une cellule solaire se compose d'une diode avec une jonction n^+p peu profonde (à environ $0.3\mu\text{m}$ de la surface) pour une épaisseur moyenne allant de 200 à $250\mu\text{m}$.

La partie gauche du semi-conducteur dopée n^+ est appelée émetteur et la partie située à droite de la zone de charge d'espace (ZCE) [19] est appelée base.

Afin de réduire les pertes par réflexion, une couche antireflet est déposée sur la face avant de la cellule [15].

Enfin, le courant électrique est collecté au moyen de contacts en face avant et arrière. Ces contacts n'occupent qu'une faible partie de la surface éclairée. Par contre, ceux de la surface arrière recouvrent toute la surface [5].

IV-3-2 Fonctionnement d'une cellule solaire

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la ZCE. Selon les régions, les photo porteurs auront un comportement différent :

- Dans la zone n ou p , les porteurs minoritaires qui atteignent la ZCE sont renvoyés par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires ; on aura un photo courant de diffusion.
- Dans la ZCE, les paires électron/trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n et les trous vers la région p ; on aura un courant de génération-recombinaison [5], [15].

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photo courant résultant I_{ph} : c'est un courant de porteurs minoritaires, proportionnel à l'intensité lumineuse.

IV-3-3 Modélisation électrique

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé par le schéma électrique équivalent ci-dessous comprenant une source de courant et deux diodes en parallèle [28].

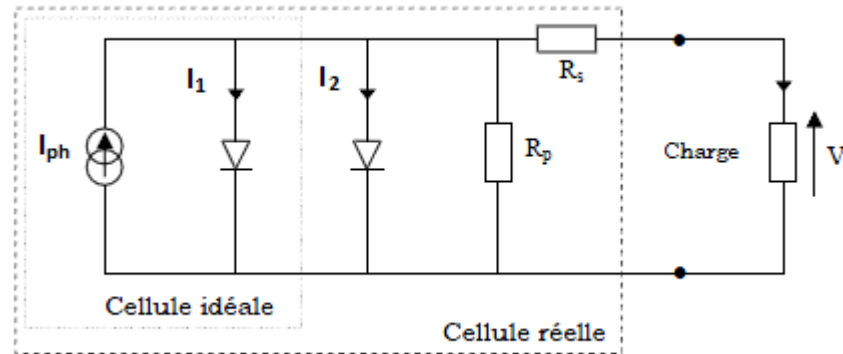


Fig I-10 : Schéma électrique équivalent [5]

- La source de courant I_{ph} modélise le courant photo généré, I_1 et I_2 représentent respectivement le courant de diffusion dans la base et l'émetteur et le courant de génération-recombinaison dans la ZCE de la jonction pn [5], [28].
- La résistance série R_s modélise les pertes résistives dues à la résistivité des différentes couches de la cellule : émetteur, base et contacts métalliques (en particulier leur interface avec le semi conducteur). Ce terme doit être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semi conducteur et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage élevé entraîne une augmentation des recombinaisons des porteurs [5], [26].
- La résistance parallèle R_p modélise les courants de fuite qui court-circuitent la jonction, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur doit être la plus élevée possible [5], [8].

Le courant délivré par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs}(V) \quad \text{EqI-6}$$

Où I_{ph} : densité de courant photogénéré

I_{obs} : densité de courant d'obscurité

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation s'écrit :

$$I(V) = I_{ph} - I_s(\exp(qV/kt) - 1) \quad \text{EqI-7}$$

Avec I_s : courant de saturation de la diode

q : charge élémentaire

k : constante de Boltzmann

T : température

Sous éclairement, la caractéristique d'une cellule photovoltaïque idéale est donc la superposition d'un générateur de courant d'intensité I_{ph} et de la caractéristique de cette diode sous-obscurité [19]. Par convention, on inverse l'axe des courants, comme illustré sur la figure I-11.

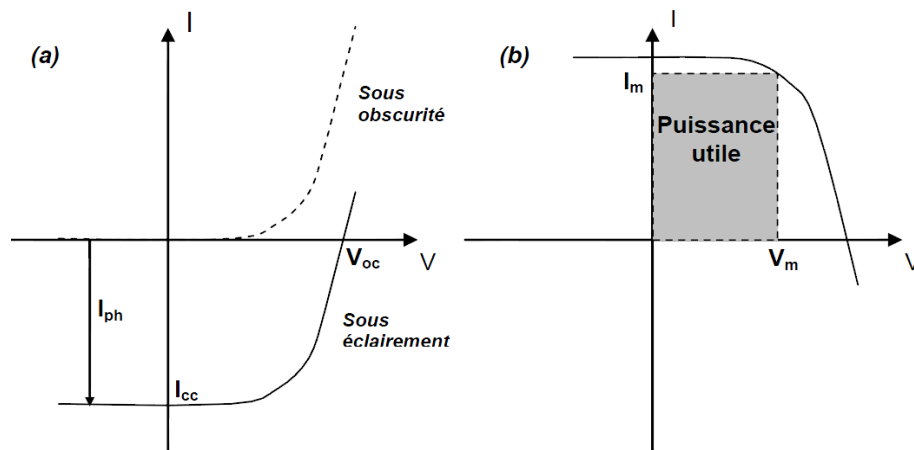


Fig I-11 : Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire sous éclairement et sous obscurité (à gauche) et représentation conventionnelle de la courbe $I=f(V)$ (à droite) [15]

A partir de la caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque, on déduit les caractéristiques propres de la cellule à savoir :

I_{cc} : courant de court circuit (obtenu pour $V=0$)

V_{co} : tension en circuit ouvert (obtenue pour $I=0$)

I_m : courant à la puissance maximale de fonctionnement

V_m : tension à la puissance maximale de fonctionnement

FF : facteur de forme ou facteur de remplissage

η : rendement de conversion

$$\eta = \frac{\text{puissance électrique maximale fournie}}{\text{puissance solaire incidente}} \quad \text{EqI-8}$$

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i S} \quad \text{EqI-9}$$

Avec P_i : puissance d'éclairement reçue par unité de surface

et S : surface de la cellule photovoltaïque

IV-3-4 Réponse spectrale

La réponse spectrale- grandeur macroscopique, exprimée en A/W- est une mesure du courant généré par unité de puissance en fonction de la longueur d'onde. L'énergie d'un photon et le gap d'un matériau étant connus, on peut déduire le nombre de paires électron/trou créées par le photon incident : c'est le rendement quantique externe noté EQE (External Quantum Efficiency).

Si on tient compte de la réflexion de la lumière, on parle alors de rendement quantique interne noté IQE (Internal Quantum Efficiency) [30].

La relation entre les deux rendements quantiques est :

$$IQE = \frac{EQE}{1 - R} \quad \text{EqI-10}$$

V- *Pertes fondamentales et technologiques limitant le rendement*

Les premières études permettant d'évaluer les limites théoriques d'une cellule solaire ont été initiées par Shockley et Queissler en 1961 [47] avec une approche thermodynamique de la cellule. Cette approche permet de calculer le rendement maximum d'une cellule solaire basée sur une jonction p/n en fonction de l'énergie de gap du matériau utilisé. L'efficacité maximale théorique pour un matériau avec un E_g de 1.15eV illuminée avec un spectre AM1.5 est donc de 33.2% [48]. Une approche plus rigoureuse tenant compte de tous les phénomènes limitant permet de calculer un rendement maximal théorique de 29% pour une épaisseur optimale de substrat de 80 μ m [49].

Qu'ils soient théoriques ou technologiques, différents facteurs limitent le rendement d'une cellule solaire. Nous allons les passer en revue et verrons sur quels paramètres électriques ils influent [5], [29].

V.1 Pertes fondamentales

L'utilisation du silicium engendre des pertes fondamentales inévitables. Ces pertes limitent le rendement théorique de la cellule solaire au silicium à 29.8% [5].

V.1.1 Absorption incomplète des photons : Les photons dont l'énergie est inférieure à l'énergie de la bande interdite (soit 1.12eV) ne peuvent pas être absorbés par le silicium. Ils ne contribuent pas à la création de paires électron/trou. Ce qui entraîne une perte d'environ 27% sur le rendement [19].

V.1.2 Excès d'énergie des photons : Les photons dont l'énergie est supérieure à celle de la bande interdite perdent l'énergie en excès par thermalisation, et par suite ne participent donc pas à la création de paires électron/trou. Cette perte représente environ 28% de perte sur le rendement sous AM1.5 [5].

Ces deux premières limitations influent sur le courant de court circuit I_{cc} et la tension en circuit ouvert V_{co} .

V.1.3 Facteur de tension : La tension en circuit ouvert V_{co} ne peut dépasser la valeur de E_g/q . A cela s'ajoutent les recombinaisons Auger, qui limitent le V_{co} à 0.65V pour une cellule solaire de 300 μ m d'épaisseur et à 0.72V pour une cellule solaire de 20 μ m d'épaisseur [14].

V.1.4 Facteur de forme : Dans le cas idéal (si la courbe I(V) était carrée), le facteur de forme serait égal à 1. Cependant, la forme exponentielle de la caractéristique I(V), due à la statistique de Boltzmann limite le facteur de forme à 0.89 [5].

V.2 Pertes technologiques

Indépendamment des pertes évoquées ci-dessus, d'autres limitations réduisent encore le rendement. Elles sont de trois formes : optiques, résistives et par recombinaison [5], [28].

V.2.1 Pertes optiques : elles sont dues à la non absorption d'un photon dans le silicium:

V.2.1.1 Les réflexions : L'indice de réfraction du silicium ($n=4$ à 650nm) étant supérieur (mais ce qui est important c'est de voir que les deux indices sont différents) à celui de l'air ($n=1.5$ à 650nm), des réflexions vont se produire (à leur interface) et qui vont limiter le rendement de la cellule. Le coefficient de réflexion R peut

être optimisé par la mise en place de couches anti reflet ainsi que des traitements de surface appropriés pour des réflexions multiples [15].

V.2.1.2 Le taux d'ombrage : Pour collecter les porteurs, des contacts métalliques placés sur la face avant forment une surface opaque qui empêche les photons de pénétrer dans la cellule. Les dimensions des métallisations sont alors un compromis entre les pertes optiques dues à la couverture partielle de l'émetteur (taux d'ombrage) et les pertes de facteur de forme provoquées par la résistance série, liées à la taille des métallisations [5].

V.2.1.3 Le rendement d'absorption : Une partie des photons ayant l'énergie nécessaire, traverse l'épaisseur de la cellule sans être absorbée. Ce terme peut être minimisé en utilisant une couche réfléchissante sur la face arrière de la cellule (réflecteur arrière) [19].

V.2.1.4 Le rendement de collecte : c'est le rapport entre le nombre de porteurs effectivement collectés et le nombre total de porteurs photo générés [9]. Certains porteurs se recombinent dans le volume ou à la surface avant leur collecte. Ces recombinaisons peuvent être réduites en mettant en œuvre différents traitements qui seront abordés plus loin dans cette thèse.

Les pertes optiques ont un effet sur le courant de court-circuit. Si on cherche à réduire l'ombrage, on sera confronté à des problèmes de résistances série (la collecte des porteurs se fera sur une surface plus petite).

V.2.2 Pertes par recombinaison : L'effet photovoltaïque génère des porteurs qui parfois se recombinent localement au lieu d'être séparés par le champ électrique de la jonction (alors qu'ils doivent diffuser jusqu'à la ZCE de la jonction PN pour pouvoir être collectés). Ceci arrive particulièrement aux porteurs générés en profondeur (en volume) ou en surface du wafer où les défauts sont plus denses et la présence d'impuretés plus importante, ce qui crée des centres de recombinaison. Des porteurs séparés par le champ électrique peuvent également être recombinés durant leur parcours vers une métallisation [29].

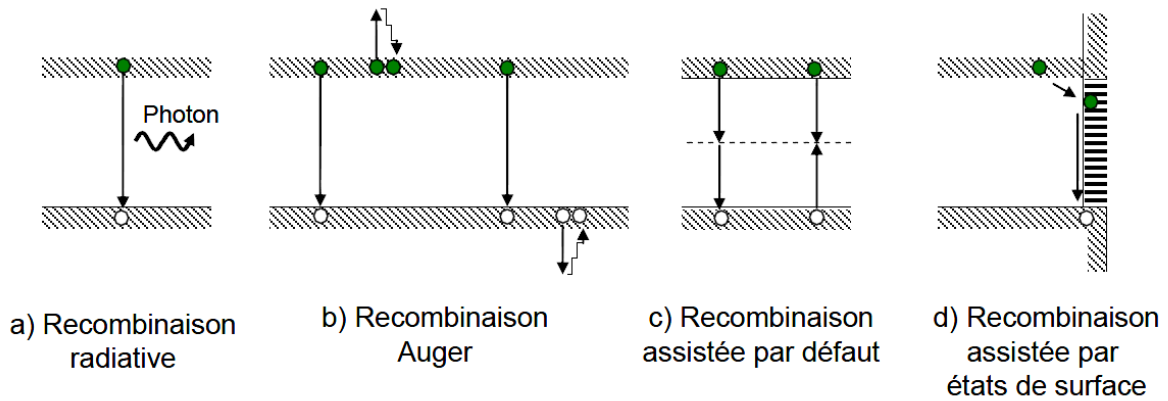


Fig I-12 : Les mécanismes de recombinaison au sein du silicium [29]

a) recombinaison radiative, b) recombinaison Auger, c) et d) recombinaison SRH

Les principaux mécanismes responsables de la recombinaison en surface et en volume, représentés sur la Figure I.12 sont les suivants :

V.2.2.1 la recombinaison radiative, qui correspond à la recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence avec émission d'un photon. Cependant, ce mécanisme est peu probable dans le cas d'un semi conducteur à gap indirect, comme c'est le cas du silicium, et peut être par conséquent négligé par rapport aux autres types de recombinaisons pour une cellule photovoltaïque en silicium [21].

V.2.2.2 la recombinaison Auger, lors de laquelle l'énergie excédentaire produite par la recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence est transférée à un autre électron ou trou, comme le montre le schéma b) de la Figure I.12. La particule ainsi activée émet ensuite cette énergie sous forme de phonons dans la matrice de silicium. Ce type de recombinaison est d'autant plus probable que le dopage du silicium est élevé [12].

V.2.2.3 la recombinaison assistée par défauts dans le matériau, encore appelée recombinaison Shockley Read Hall (SRH), est liée à la présence de niveaux « pièges » dans la bande interdite induits par des défauts cristallins, tels que des dislocations ou des impuretés dans la matrice de silicium. Les électrons passent d'abord de la bande de conduction au niveau d'énergie associé au défaut, pour finalement atteindre la bande de valence [1].

V.2.2.4 la recombinaison en surface (et aux joints de grains dans le cas du silicium multi cristallin), due à la présence d'une grande densité de défauts, notamment des liaisons pendantes, et donc de niveaux pièges dans la bande interdite. Le mécanisme de recombinaison est de type SRH [30].

Les recombinaisons réduisent la tension de circuit ouvert V_{co} et le facteur de forme FF. Le courant de court circuit I_{cc} peut lui aussi être affecté dans le cas où les porteurs minoritaires se recombinent avant d'atteindre la ZCE [9], [29], [31].

V.2.3 Pertes résistives : Les pertes résistives affectent également le rendement en limitant le facteur de forme FF. Elles peuvent être dues à :

V.2.3.1 la résistance parallèle R_p , causée en général par des fuites sur les bords de la cellule ou par la présence de courts-circuits au niveau de l'émetteur. Sa valeur doit donc être maximisée [5].

V.2.3.2 la résistance série R_s , dont les différentes composantes sont détaillées dans le modèle électrique. Sa valeur doit être la plus faible possible [5].

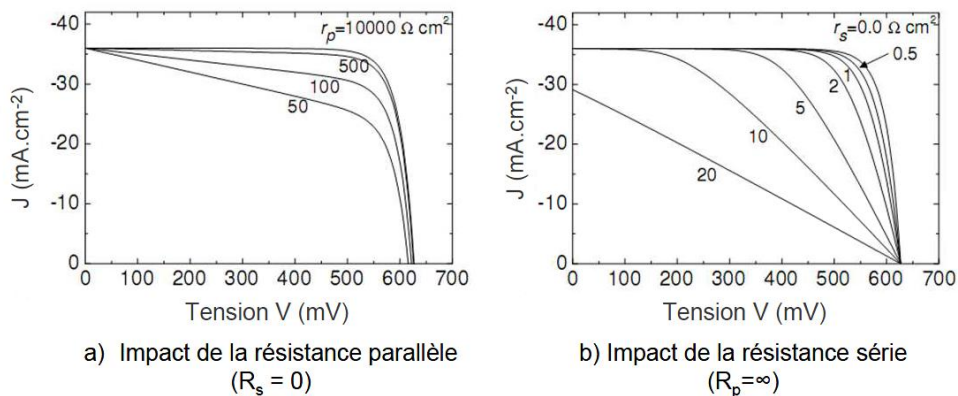


Fig I-13 : Influence de a) la résistance parallèle b) la résistance série

La Figure I.13 montre l'impact des résistances série et parallèle sur la caractéristique $I(V)$, par la modification en particulier du facteur de forme FF. L'effet de R_s est très visible aux fortes tensions. Des valeurs relativement élevées de R_s peuvent aller jusqu'à provoquer une chute du courant de court-circuit. La résistance parallèle R_p influence l'allure de la courbe $I(V)$ aux faibles tensions, et peut conduire à une baisse de la tension de circuit ouvert V_{co} [32].

Toutes ces limites technologiques empêchent donc d'atteindre le rendement théorique de 29% (Figure I-14). Certaines structure dites « à haut rendement » ont permis de diminuer les pertes et de réduire l'écart entre les rendements réel et théorique de la cellule. Dans les paragraphes suivants, nous allons détailler les axes de recherche les plus prometteurs pour améliorer l'efficacité de la cellule, ainsi que les architectures de cellules associées.

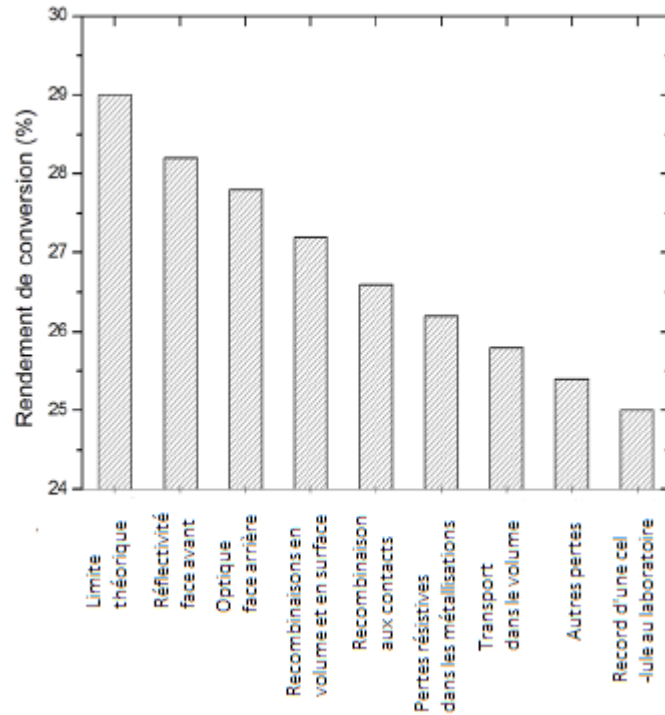


Fig I-14 : Répartition des pertes liées aux limites technologiques et leur influence sur le rendement de la cellule [50]

VI- Technologies pour la réduction des pertes

VI.1 Passivation des faces avant et arrière : La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitrure de silicium hydrogéné ($\text{SiN}_x\text{:H}$) [28]. Nous aborderons la passivation de la surface de silicium avec plus de précision dans le Chapitre II.

VI.2 Couche antireflet : une couche antireflet (CAR) est utilisée pour minimiser la réflexion de la lumière. L'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces (voir insertion sur la figure I-8) [15] est à la base du principe d'action des couches antireflet est basé sur. Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{(2N + 1) \cdot \lambda}{4 \cdot n_{CAR}} \quad \text{avec } N = 0,1,2,3 \dots \quad \text{EqI-10}$$

on obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semi-conducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents) [28].

Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque : TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 , SiN_x , etc.

VI.3 BSF : Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction p^+p) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation [29]. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée. Le BSF fait encore l'objet de nombreuses recherches car l'épaisseur des plaques est constamment réduite afin de réaliser une économie de matière première et le silicium multi cristallin présente désormais des longueurs de diffusion des porteurs minoritaires élevées (environ 200 μm pour le Polix) [33].

VI.4 Texturation de la surface : La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule [5], [29]. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique [36]. L'insertion sur la figure I-14 présente le principe de réflexions multiples propre à la texturation. Le relief de la surface entraîne une baisse de la réflexion en face avant : un rayon arrivant à incidence normale (par rapport au plan de la cellule) sur une pyramide sera réfléchi sur la face d'une pyramide adjacente, cette double réflexion sur les pyramides diminue le coefficient de réflexion totale, qui ne vaut plus R mais R^2 .

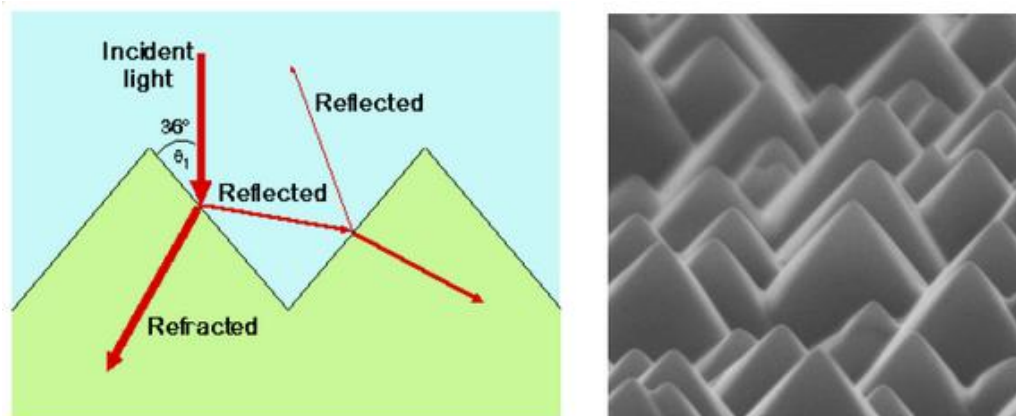


Fig I-15 : Représentation schématisée de réflexion de la lumière sur une pyramide (à gauche) et de microscopie optique de la surface de silicium texturée (à droite) [34].

D'autre part, un rayon d'incidence normale sera transmis dans la cellule avec un angle de réfraction θ différent de 0° . Le trajet de ce rayon au sein du silicium sera donc augmenté d'un facteur $1/\sin\theta$ par rapport au cas d'une surface plane et perpendiculaire à l'éclairement, ce qui aura pour effet d'augmenter la part de photons absorbés par le matériau. Pour finir, la texturation de la surface entraîne un piégeage plus important de la lumière pénétrant dans la cellule. Sur la face arrière de la cellule, il existe un angle d'incidence critique θ_c à partir duquel le rayon est totalement réfléchi et prolonge son trajet au sein du semi-conducteur, augmentant là aussi l'absorption des photons [15]. En appliquant la loi de Descartes, on trouve que cet angle vaut 17° dans le cas du silicium dans l'air. Ce phénomène est particulièrement important dans le cas des cellules de faible épaisseur, et peut être renforcé par une texturation de la face arrière et/ou une couche antireflet sur cette même face [5].

Différents procédés sont utilisés pour texturer la surface du silicium : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturation mécanique [5].

VI.5 Contacts face avant et arrière : Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique $I=f(V)$ du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement [5], [15].

Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts . Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multi cristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie [35], [36]. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées [37].

VII- *Procédé industriel pour la fabrication de cellules solaires au silicium multi cristallin :*

La grande majorité des modules photovoltaïques est constituée de cellules solaires, formées à partir de plaques de silicium de grande pureté chimique. La préparation de ce matériau à partir de la silice naturelle s'effectue à travers quatre étapes majeures :

- Etape 1 : C'est l'étape la plus consommatrice en énergie. Le silicium solaire est obtenu après deux sous étapes :
 - ✓ Transformation du quartz en silicium métallurgique [21]
 - ✓ Transformation du silicium métallurgique en silicium solaire (S₀G-Si) [36]

Etape 1 (raffinage du Silicium)	Points clés	Consommation énergétique
Procédé chimique (Siemens)	Il permet d'obtenir un matériau d'une plus grande pureté	Faible rendement, consommation énergétique d'environ 150KWh/kg de matériau initial
Procédé métallurgique (Elkem)	Il a été développé pour diminuer les coûts de production avec une qualité moindre que pour celle de l'industrie électronique, tout en garantissant une qualité suffisante pour les applications solaires. L'économie d'énergie s'effectue sur la méthode de traitement des impuretés différente et beaucoup moins énergivore que celle du procédé chimique	80% d'économie d'énergie par rapport au procédé Siemens : consommation d'énergie d'environ 25-30KWh/kg de matériau initial

- Etape 2 : Cristallisation du silicium et mise en forme des plaques

Etape 2 (cristallisation)	Points clés :	Consommation énergétique
	Le coût énergétique dépend du niveau de rendement recherché	
Transformation du silicium en cellules mono cristallines	Plus coûteux : silicium mono cristallin (sc-Si) ; lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches (wafers). Les cellules sont en général d'un bleu uniforme. Rendement de 15% environ.	28% du total des dépenses énergétiques du système
Transformation du silicium en cellules multi cristallines	Moins coûteux : silicium multi cristallin (mc-Si) ; pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule solaire est d'aspect	

	bleuté, mais pas uniforme. Rendement de 12% environ.	
--	---	--

- Etape3 : Traitement du silicium cristallisé pour l'obtention d'une cellule photovoltaïque [29]
- Etape 4 : Assemblage des cellules photovoltaïques en modules photovoltaïques [41]
- Etape 5 : Regroupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque intégré comprenant des composants électroniques et électriques (câbles, onduleurs, batteries...) [41]

Etape 3 à 5 : de la fabrication des cellules à la réalisation d'un système photovoltaïque	Points clés	Consommation énergétique
Fabrication des cellules	Chaque fabricant a ses propres variantes selon le matériel disponible	15% du total des dépenses énergétiques du système
Assemblage des modules	Raccordement des cellules, encapsulation, encadrement et connexion des boîtes de jonction	
Réalisation d'un système photovoltaïque	Connexion des modules à un système intégré	6-7% du total des dépenses énergétiques du système

La figure suivante déroule les quatre étapes (citées ci-dessus) de fabrication d'un module photovoltaïque par un processus standard (le plus établi, étant entendu que chaque industriel développe ses propres variantes pour chacune des étapes selon les équipements de production dont il dispose).

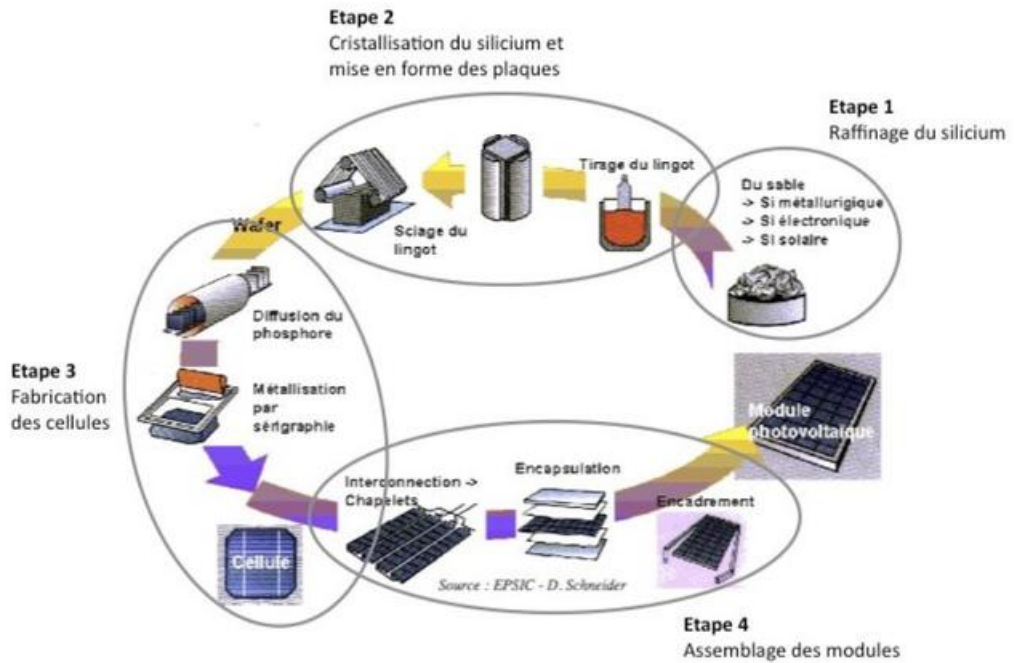

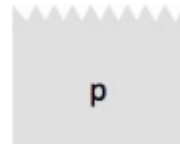
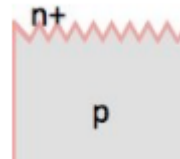
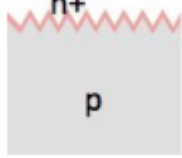
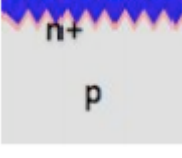
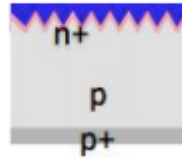
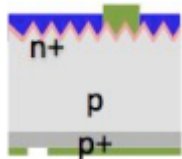


Fig I-16: Processus standard de fabrication d'un module photovoltaïque
(source: EPSIC - D.Schneider)

L'étape 3 (procédé de fabrication des cellules solaires) est brièvement décrite par la figure ci-après:

Etapes	Techniques d'élaboration	Rôle
Décapage 	Les plaques dopées p à partir du bore lors de la cristallisation sont décapées dans un bain chimique ✓ Bain acide à base d'acide fluorhydrique HF, d'acide acétique CH ₃ COOH et d'acide nitrique HNO ₃	Eliminer les défauts superficiels créés par le sciage
Texturation 	La texturation de la surface en petites pyramides. On parle aussi de confinement optique ✓ Gravure sélective par un bain alcalin de soude NaOH ou de potasse KOH avec des additifs organiques	Réduire la réflexion en améliorant la collecte des photons
Dopage 	La zone dopée n est formée par diffusion de phosphore : couche n ⁺ en surface (0.3-0.5µm) et n à la surface ✓ Diffusion thermique de phosphore P à partir de trichlorure de phosphore POCl ₃ dans un four à passage (800°C < T < 900°C), suivi	Réalisation de la jonction pn du dispositif

	d'un recuit	
<p>Bords de plaque</p> 	<p>La couche est retirée des bords de la plaque</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Gravure plasma avec un mélange gazeux tétrafluorométhane CF_4 et oxygène O_2 soumis à un champ de radiofréquences 	<p>Séparer l'émetteur de la face arrière</p>
<p>CAR</p> 	<p>Une couche antireflet à base d'oxydes ou de nitrure de silicium ou d'oxydes métalliques est déposée en face avant.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Dépôt chimique en phase gazeuse via un plasma (PECVD par exemple) d'une couche de Si_3N_4 et d'ammoniac NH_3 	<p>Passiver la surface en limitant les recombinaisons des porteurs</p>
<p>BSF</p> 	<p>La face arrière est dopée p^+ par diffusion d'aluminium</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Diffusion thermique d'aluminium Al à $850^\circ C$ à partir d'une pâte d'aluminium déposée sur toute la face arrière 	<p>Joue le rôle de conducteur ohmique avec l'électrode arrière</p>
<p>Métallisation</p> 	<p>Les contacts électriques sont des métaux déposés sur la face avant (électrode-) et en face arrière (électrode+)</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Sérigraphie d'argent en face avant et d'aluminium en face arrière par frittage de pâtes métalliques 	<p>Servent à collecter le courant de porteurs photo générés</p>
<p>Test et tri</p>	<p>Les cellules sont mesurées électriquement puis triées selon leurs caractéristiques afin d'optimiser leur association ultérieure</p>	

VIII- Les principaux types de cellules solaires à base de silicium multi cristallin :

VIII-1 La cellule standard industrielle :

Les cellules standard de type industriel sont principalement produites à partir de silicium multi cristallin. Elles présentent en moyenne des rendements de conversion de l'ordre de 15%. La différence des rendements entre les cellules photovoltaïques industrielles et la cellule PERL (élaborée en laboratoire et qui détient le record de rendement) s'explique par un compromis entre le coût de production et le rendement. En effet, certains matériaux et techniques (lithographie, silicium FZ, double couche antireflet, texturation en pyramides inversées) utilisés pour la cellule photovoltaïque record ne peuvent pas être adaptés pour l'industrie car ils sont trop chers. La plupart des cellules photovoltaïques en silicium massif industrialisées ont la structure présentée sur la figure I-17. La structure de la cellule photovoltaïque industrielle est simplifiée afin de réduire son coût. Par exemple, la texturation

de la face avant est réalisée sous forme de « pyramides aléatoires » ou texturation acide et on dépose ensuite une simple couche antireflet. De même, le champ électrique face arrière (BSF) est obtenu par un alliage eutectique AL-Si formé par recuit d'une couche en Aluminium déposée par sérigraphie. Un dépôt de nitrure de silicium (SiN) est généralement utilisé comme couche antireflet car en plus de ses qualités optiques il permet d'améliorer la passivation de la cellule. Le dépôt SiN entraîne une hydrogénation du substrat qui dans le cas du silicium multi cristallin améliore la longueur de diffusion des porteurs minoritaires.

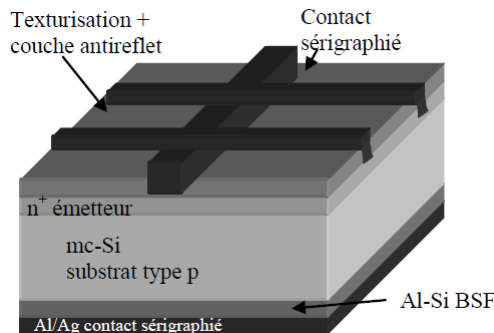


Fig I-17 : La structure d'une cellule solaire industrielle [5]

VIII-2 La structure HIT

Les cellules à hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin (a-Si :H/Si) ou encore dite HIT pour Heterojonction with Intrinsic Thin layer, sont basées sur l'architecture standard. Elles comportent une ou deux hétérojonctions a-Si :H/Si. L'hétérojonction en face avant constitue l'émetteur alors que la seconde, en face arrière, joue le rôle de champ de répulsion ou BSF. La zone intrinsèque permet d'améliorer l'état de surface au niveau de la jonction et une couche d'oxyde conducteur transparent (TCO) est déposée pour assurer un contact entre la couche amorphe et le métal. L'hétérojonction est technologiquement obtenue par dépôt d'une couche de quelques nanomètres de silicium amorphe hydrogéné, dopé ou non, a-Si :H.

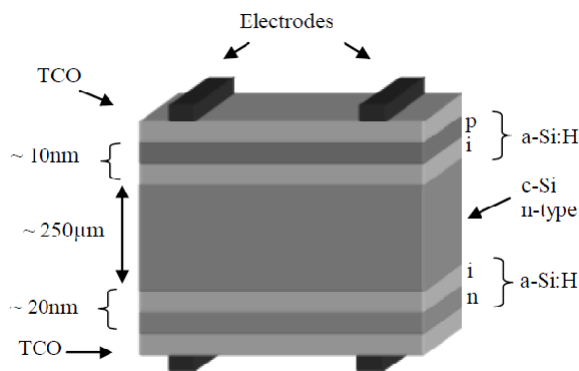


Fig I-18 : La structure HIT [28]

Les propriétés du silicium amorphe hydrogéné sont intéressantes pour l'application photovoltaïque pour différentes raisons :

- ✓ un gap plus élevé que le silicium cristallin, autour de 1.8 eV, mieux adapté aux radiations solaires.
- ✓ un procédé d'élaboration à basse température ($T < 250^{\circ}\text{C}$) qui permet de réduire le budget thermique de fabrication et d'intégrer des substrats en verre dans le procédé.
- ✓ une meilleure stabilité en température menant à un rendement annuel plus important.
- ✓ une tension de circuit ouvert plus élevée due à la présence de l'hétérojonction.
- ✓ une excellente passivation de surface.

VIII-3 La cellule PERL

Cette cellule à haut rendement, figure I-18, a été élaborée par l'université de New South Wales avec des procédés de la micro électronique [12]. Elle a été réalisée sur un substrat de silicium cristallin Float Zone de type P. La face avant (face éclairée) de la cellule est texturée en « pyramides inversées » et une jonction pn peu profonde est réalisée sur toute la surface avant pour assurer la séparation des porteurs de charge. L'émetteur ainsi réalisé est peu dopé afin de limiter les recombinaisons en surface. Le contact ohmique sur l'émetteur est déposé sous forme de grille. La géométrie de cette grille doit assurer une faible résistance série tout en limitant l'ombrage de la cellule. Pour l'obtention d'un contact ohmique, la région sous le contact avant est sur dopée n^+ (émetteur sélectif). Une fine couche d'oxyde thermique (de haute qualité) se forme alors sur l'émetteur réduisant ainsi la recombinaison sur la face avant de la cellule. Pour réduire les pertes par réflexion, une double couche anti-réfléchissante est déposée sur l'oxyde. De même que la face avant, la face arrière de la cellule est passivée par de l'oxyde thermique avec des trous pour prendre le contact. Pour assurer un bon contact arrière, la région du contact est dopée p^+ . Néanmoins, le contact entre le métal et le silicium n'est pas continu afin de limiter la recombinaison sur le contact et dans la région fortement dopée p^+ . Par contre, la métallisation de la face arrière est continue : elle couvre les zones de contact et l'oxyde de passivation sert ainsi de réflecteur arrière.

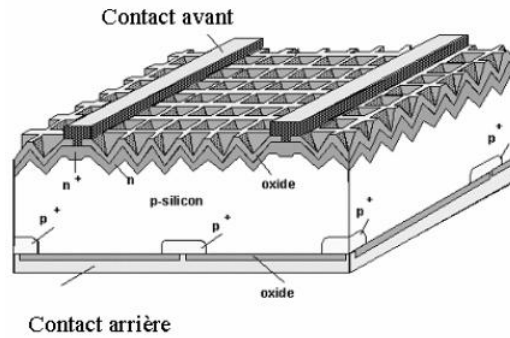


Fig I-19 : La structure PERL [5], [38]

VIII-4 La cellule RCC

La cellule à contact arrière IBC (interdigitated back contact) ou RCC (Rear Contact Cell) représente une option prometteuse pour compléter le champ d'application des cellules photovoltaïques (figure I-19).

Dans cette structure, les contacts sont présents sur la face opposée au rayonnement et sont réalisés à l'aide de 2 grilles inter digitées (collecte des trous et des électrons). Cette structure n'est donc pas soumise au phénomène d'ombrage en face avant par des contacts et la géométrie des contacts peut être plus librement optimisée afin de diminuer la résistance série.

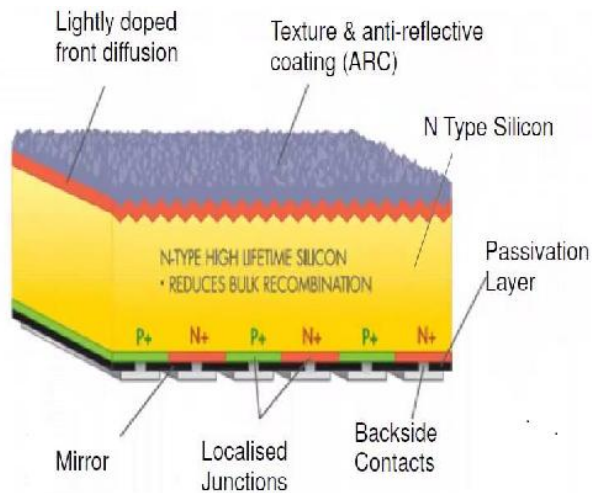


Fig I-20: La structure RCC [39]

Il existe trois types de cellules à contacts arrière inter digités : les « back junction », les « MWT » [43] et les « EWT » [44].

- Les cellules back junction sont les cellules à jonction arrière. Dans cette structure, les porteurs minoritaires générés en forte densité dans les premiers micromètres de la cellule doivent traverser une distance équivalente à l'épaisseur du substrat pour atteindre les contacts. Ce concept nécessite une bonne qualité de passivation de la surface avant, et le ratio longueur de diffusion des porteurs minoritaires sur épaisseur de substrat doit être élevé. Ce concept est principalement utilisé pour des approches couche mince et haut rendement. Le silicium multi cristallin étant trop limité par sa faible durée de vie pour ce type de structure ; deux structures alternatives ont été développées :
 - ✓ La structure MWT (Metallisation Wrap Through) est un concept très proche des cellules conventionnelles. L'émetteur est situé sur la face avant mais une partie de ses contacts sont placés en face arrière. En général, le busbar est déplacé en face arrière, et des trous dans le substrat permettent de faire le contact entre une fine grille en face avant et les lignes de collections plus épaisses en face arrière.
 - ✓ Nous verrons dans le chapitre suivant, que la totalité des contacts peuvent être mises en face arrière avec la structure EWT (Emitter Wrap Through) [45]. Dans ce cas,
 - ✓ Cette structure a la même apparence que les cellules à jonction arrière mais elle fonctionne avec du silicium multi cristallin de faible qualité électronique.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à une description générale des cellules solaires au silicium multi cristallin. Après un rappel sur quelques notions sur le rayonnement solaire et son application dans le domaine photovoltaïque, les éléments de base nécessaires à la compréhension du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque ainsi que leurs caractéristiques principales ont été énoncés. Puis, après avoir exposé les pertes limitant le rendement d'une cellule, nous avons présenté la technologie des cellules solaires au silicium multi cristallin et avons montré les avantages de la technologie des cellules à contacts arrières.

Ce chapitre s'achève par une brève présentation de la structure EWT (Emitter Wrap Through), qui suscite un intérêt grandissant de la communauté scientifique et de l'industrie photovoltaïque.

L'étude de cette structure sera détaillée dans le chapitre suivant et constitue le cœur de ce travail.

Bibliographie du chapitre I

- [1] C. Roger, *Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques*, Thèse de Doctorat, 2014.
- [2] N. Coltice, *La matière dans l'univers*, Université Lyon1, 2014.
- [3] R. Couderc, *Étude du comportement thermique et électrique des cellules photovoltaïques en silicium cristallin sous concentration*, Thèse de Doctorat, Juin 2015.
- [4] B. Sportisse, *1- Pollution atmosphérique Des processus à la modélisation*, Springer, 2008.
- [5] N. Oleksiy, *Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités*, Thèse de Doctorat, 2005.
- [6] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Zénith_\(astronomie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Zénith_(astronomie)).
- [7] PV (compétence électrique) – *Chap. 2 : Le gisement solaire* ; Version Janvier 2011
- [8] K. Menouar, *Etude et réalisation d'une cellule solaire multicouches du type Si-SiO₂-SnO₂-ZnO*, Université de Tizi-Ouzou et l'IM2NP Marseille, 2011.
- [9] H. Ghembaza, *Optimisation du profil de distribution du phosphore dans les émetteurs dopés "Lydop" des cellules solaires conventionnelles à base de silicium cristallin*, Thèse de Doctorat, 2016.
- [10] https://fr.wikipedia.org/wiki/Ressources_et_consommation_énergétiques_mondiales, *Ressources et consommation énergétiques mondiales*, 2017.
- [11] J. Vernier, *Les énergies renouvelables*, Que sais-je?, 2012.
- [12] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, «*Photovoltaics Report*,» Freiburg, ISE with support of PSE AG, 2017.
- [13] S. P. Europe, «*Global Market Outlook (2017-2021)*,» 2017.
- [14] A. Zerga, «*Caractérisation, Modélisation et Simulation Numérique des Cellules Photovoltaïques à base de Silicium Polycristallin en Couche Mince Déposée par "RT-CVD*,» Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, Thèse de Doctorat, 2005.
- [15] N. SAHOUANE, *Elaboration, Modélisation et Caractérisation des Cellules Solaires de type IIIème Génération dotées de Couches Antireflets à Indice Graduel*, Université Abou Bekr Belkaïd: Thèse de Doctorat, 2016.

- [16] EPIA (European Photovoltaic Industry Association), *Global market outlook for photovoltaics*, 2013-2017.
- [17] H. Moulin, *Etude Et Caracterisation De Materiaux Semi-Conducteurs En Vue De Leurs Applications A La Detection De Rayonnements Ionisants*, Université Joseph Fourier GrenobleI, 1989.
- [18] C.A. PACHON, *La construction des portes logiques Chapitre 05 SUPINFO International University*, SUPINFO International University.
- [19] A. Ricaud, *Les convertisseurs photovoltaïques: Gisement solaire, cellules, modules et champ de modules*, European Master in Renewable Energy, 2011.
- [20] P. A.Chovet, *Physique des semi-conducteurs*, Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille: Département Micro-électronique et Télécommunications, 2004/2005.
- [21] F. Lévy, *Physique et Technologie des Semiconducteurs*, Presses Polytechnique et Universitaires Romandes, 1995.
- [22] J. Veirman, *Effets de la compensation du dopage sur les propriétés électriques du silicium et sur les performances photovoltaïques des cellules à base de silicium solaire purifié par voie métallurgique*, INSA de Lyon: Thèse de Doctorat, 2011.
- [23] M. H. Sanders, *Modeling Of Operating Temperature Performance Of Triple Junction Solar Cells Using Silvaco's Atlas*, NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL: MONTEREY, CALIFORNIA, 2007.
- [24] J. Baldomero Garcia, *Indium Gallium Nitride Multijunction Solar Cell Simulation Using Silvaco Atlas*, Naval Postgraduate School, Juin 2007.
- [25] Génie thermique et Energie, «*Le panneau solaire photovoltaïque – la cellule photovoltaïque*» <https://jlyh.wordpress.com/tag/electricite/>.
- [26] M. Mansoura, «*Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs)*,» Thèse de Magister, Université Mohamed Khider-Biskra, 2012.
- [27] H. Benson, «*Physique III: Ondes, optique, et physique moderne*,» de Boeck supérieur, Vol3, 2016
- [28] G. Poulain, *Procédés laser pour la réalisation de cellules photovoltaïques en silicium à haut rendement*, Thèse de Doctorat: INSA de Lyon, 2014.
- [29] P. PAPET, *Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium cristallin*, Thèse de doctorat,

2007.

- [30] J. Damon-Lacoste, *Vers une ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonctions a-Si:H/c-Si. Rôle prépondérant de l'hydrogène.*, LPICM – Laboratoire de Physique des Interfaces et Couches Minces: Thèse de Doctorat, 2007.
- [31] N. Benloucif, «*Modélisation et simulation de la cellule solaire de structure pin à base de silicium polycristallin,*» International Journal of Innovation and Applied Studies, vol. N°4, pp. 195-202, 2013
- [32] P. B. Lechêne, *Conception, caractérisation et durée de vie de cellules photovoltaïques organiques tandems à base de PCDTBT*, Université de Grenoble, 2013
- [33] A. Bouyelfane et A. Zerga, *Effet de la résistance carrée de l'émetteur diffusé POCl₃ et de la largeur des doigts sérigraphiés d'une cellule solaire conventionnelle au mc-Si*, Journal of Scientific Research, Vol. 1, N°0, 2010.
- [34] G. Nouet, P.Lay et JL Chermant «*Le silicium polycristallin Polix : élaboration, propriétés et performances*» , Revue de Physique Appliquée, 22 (7),1987, pp. pp.535-547
- [35] Olivier Tosoni, *Conception, élaboration et intégration d'électrodes transparentes optimisées pour l'extraction des charges dans des dispositifs photovoltaïques*. Université de Grenoble, thèse de Doctorat, 2013
- [36] F. JAY, «*Nouveaux substrats de silicium cristallin destinés aux cellules photovoltaïques à haut rendement –Cas du silicium mono-like et du dopage aux donneurs thermiques liés à l'oxygène pour les cellules à hétérojonction de silicium,*» Université Grenoble Alpes, Thèse de Doctorat, 2016.
- [37] T. Dzhafarov, «*Silicon Solar Cells with Nanoporous Silicon Layer,*» Solar Cells- Resaerch and Application perspectives, Department of Solar and Hydrogen Cells, Institute of Physics, Azerbaijan National Academy of Sciences, Azerbaijan, book edited by Arturo Morales-Acevedo, 2013
- [38] C. Boulord, *Développement de techniques demétallisation innovantes pour cellules photovoltaïques à haut rendement*, INSA de Lyon: Thèse de Doctorat, 2011.
- [39] B. RIVIERE, *Optimisation du procédé de sérigraphie pour la réalisation de capteurs de gaz en couche épaisse. Etude de la compatibilité avec la technologie microélectronique*, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE SAINT-ETIENNE: Thèse de Doctorat, 2004.
- [40] *Top Solar "Module" Manufacturers Worldwide*, http://solarcellcentral.com/companies_page.html, 2012.

- [41] Cécile Miquel, *Systèmes Photovoltaïques: fabrication et impact environnemental*, Hespul- Energies Renouvelables et efficacité énergétique, 2009.
- [42] William R Taube, A Kumar , *Simulation and Optimization of N-Type PERL Silicon Solar Cell Structure*, Journal of Nano- and Electronic Physics, 2011.
- [43] E. Lohmüller, B. Thaidigsmann, M. Pospischil, U. Jäger, S. Mack, J. Specht, J. Nekarda, M. Retzlaff, A. Krieg, F. Clement, A. Wolf, D. Biro, R. Preu; *20 % Efficient Passivated Large-Area Metal Wrap Through Solar Cells on Boron-Doped Cz-Silicon*; IEEE Electron Device Letters, VOL. 32, NO. 12, p. 1719-1721 December 2011
- [44] S.W. Glunz, R. Preu, D. Biro, *Chapter 1.16: Crystalline Silicon Solar Cells –State-of-the-Art and Future Developments*, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Heidenhofstr. 2, Freiburg, Germany, Final version published as chapter 1.16 in "Comprehensive Renewable Energy", Vol. 1
- [45] Wolfgang Jooß, *Multicrystalline and Back Contact Buried Contact Silicon Solar Cells*, Universität Konstanz, Thèse de Doctorat 2002
- [46] Christiana Honsberg and Stuart Bowden, *PV education , PN Junction Semiconductor materials*, <http://www.pveducation.org/pvcdrom/semiconductor-materials>
- [47] W.Shockley et H J.Queisser , *Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells*. Journal of Applied Physics, Volume 32, numéro 3, pages 510-519, 1961
- [48] T.Tiedje et al. *Limiting Efficiency of Silicon Solar Cells*. IEEE Transaction on Electron Devices, Volume 31, numéro 5, pages 711-716, 1984
- [49] M.J.Kerr et al. *Lifetime and efficiency limits of crystalline silicon solar cells*. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pages 438-441, 2002
- [50] Sylvain De Vecchi, *Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium et contacts interdigités en face arrière*, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2013, thèse de Doctorat

Chapitre II

La structure EWT (Emitter Wrap Through)

Liste des figures du chapitre II

Liste des tableaux du chapitre II

Introduction

V- La production du silicium multi cristallin

VI- La structure EWT industrielle

II.1. Les principaux résultats obtenus dans la littérature

II.1.1. Advent solar, Inc

II.1.1.1. Présentation de l'entreprise

II.1.1.2. La technologie

II.1.2. Réalisation des cellules EWT

II.1.2.1. La formation des trous

II.1.2.2. La distribution de trous

II.1.2.3. Définition de la jonction sur la face arrière

II.2. Les intérêts de la structure EWT

II.3. Les inconvénients de la structure EWT

II.4. Paramètres clés des cellules avec une structure EWT

II.4.1. la recombinaison en surface

II.4.2. La longueur de diffusion

VII- La sérigraphie

III.1 Principe général

III.1.1. Les encres

III.1.2. L'écran

III.1.3. L'impression

III.1.4. Le séchage et la cuisson

III.2. Sérigraphie pour le photovoltaïque

III.3. Avantages

III.4. Inconvénients

VIII- La passivation de surface

IV.1. Dépôt des couches minces de matériaux

IV.1.1 Dépôt par voie physique (PVD) :

IV.1.2 Dépôt par voie chimique (CVD):

IV.2 Les matériaux « low-k » et « high-k » ou dépôt de films diélectriques

IV.2.1 Les critères de choix d'un oxyde

IV.2.2 Les oxydes utilisés dans la simulation

IV.2.2.1 le dioxyde de silicium ou quartz ou silice ou saphir

IV.2.2.2 l'oxyde d'aluminium ou alumine :

IV.2.2.3 l'oxyde d'hafnium

IV.2.2.4 l'oxyde de titane

IV.2.3 Propriétés optiques des oxydes utilisés

Conclusion

Bibliographie du chapitre II

Liste des figures du chapitre II

Figure II-1 : Part de la technologie des cellules photovoltaïques au silicium

Figure II-2 : Les pays producteurs de silicium

Figure II-3 : Tirage d'un lingot de Silicium par la méthode Czochralski

Figure II-4 : Les différentes étapes de la méthode Czochralski

Figure II-5 : Lingots de silicium monocristallin

Figure II-6 : Obtention des lingots de silicium multi cristallin

Figure II-7 : Lingots de silicium multi cristallin

Figure II-8: La technologie du silicium en ruban

Figure II-9 : Silicium cristallin en ruban mince

Figure II-10 : Cellule à contacts arrières type Emitter Wrap Through

Figure II-11 : Description de la structure EWT (Emitter Wrap Through)

Figure II-12 : Le laser JenLas Disk IR50/IR70 utilisé par ISE Fraunhofer pour les cellules photovoltaïques de type MWT/EWT

Figure II-13 : Perforation au laser pour la fabrication des cellules EWT (images SEM)

Figure II-14: Cellule élémentaire de la structure EWT

Figure II-15 : Cellule solaire EWT (à gauche : face avant ; à droite : face arrière)

Figure II-16 : Mouvement de la raclette pendant la sérigraphie

Figure II-17 : Synoptique des différentes techniques de dépôts de couches minces

Figure II-18 : Schématisation de deux exemples de dépôt de couches minces : PVD et CVD

Figure II-19: Constantes diélectriques de quelques oxydes en fonction du gap

Figure II-20 : Indice de réfraction des oxydes en fonction de la longueur d'onde
(a) SiO_2 (b) : Al_2O_3 (c) : HfO_2 (d) : TiO_2

Figure II-21: Rayonnements réfléchi, transmis et absorbé

Figure II-22 : Loi de la réflexion

Liste des tableaux du chapitre II

Tableau II-1 : Les différentes technologies des cellules solaires au silicium

Tableau II-2 : Classification des principales technologies des cellules solaires

Tableau II-3 : Gaps optiques et hauteurs de barrière vis-à-vis du silicium pour quelques oxydes

Introduction

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les cellules à contact en face arrière (RCC) représentent un terrain idéal pour atteindre de hauts rendements.

L'ombrage de métallisation en face avant (exposée au soleil) est éliminé grâce à la présence des contacts sur la face arrière.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à un type de cellules RCC à savoir la structure EWT (Emitter Wrap Throught) au silicium multicristallin, nous énoncerons ses avantages et ses inconvénients.

Ensuite, nous présenterons le procédé technologique industriel pour la réalisation de ce type de cellules tout en insistant sur les paramètres clés qui interviennent dans les calculs du rendement.

I- La production du silicium multi cristallin

90% des cellules photovoltaïques fabriquées dans le monde sont à base de silicium. Il s'agit d'un matériau présent en très grande quantité sur notre planète puisqu'il représente un peu plus de 25% de la masse de la croûte terrestre (2^{ème} élément le plus abondant après l'oxygène) [1]. Il n'y a donc aucun risque de pénurie de matière première. Il est vrai cependant que conjoncturellement, ce sont parfois les usines qui fabriquent le silicium solaire en quantité insuffisante pour répondre à la demande. Le silicium se trouve sous forme de composés : silice, silicate, ou encore dioxyde de silicium [2]. Ses propriétés de semi-conducteur en font un matériau de choix pour les composants électroniques qui nécessite néanmoins un silicium d'une extrême pureté donc cher à produire [3]. Aujourd'hui le silicium entre dans la composition de la grande majorité des panneaux solaires photovoltaïques. On distingue 3 façons de le produire pour l'industrie solaire: le monocristallin, le poly cristallin et l'amorphe [4].

Technologie	Méthode de fabrication	Rendement %	Avantages	Inconvénients	Part de marché (2007)
Mono-cristallin	Croissance d'un lingot puis découpe de tranches	12-16	Bon rendement par cellule	Coût de fabrication élevé (2,5€/Wc) Perte de matériel en cours de fabrication (découpe)	42%
Multi-cristallin	Moulage lingot puis découpe de tranches	11-14	Cellules carrées Bon rendement par superficie	Coût de fabrication élevé (2€/Wc) Perte de matériel en cours de fabrication (découpe)	45%
amorphe	Dépôt de silicium sur un substrat	5-8	Facile à fabriquer Résistant aux variations de température Souple Coût de fabrication faible (0,5€/Wc)	Rendement faible Jusqu'à 10% en multicouches	5%

Tableau II-1 : Les différentes technologies des cellules solaires au silicium

Les 2 premiers à eux seuls représentent plus de 80% du marché mondial, presque 60 ans après avoir assuré les débuts du photovoltaïque [5].

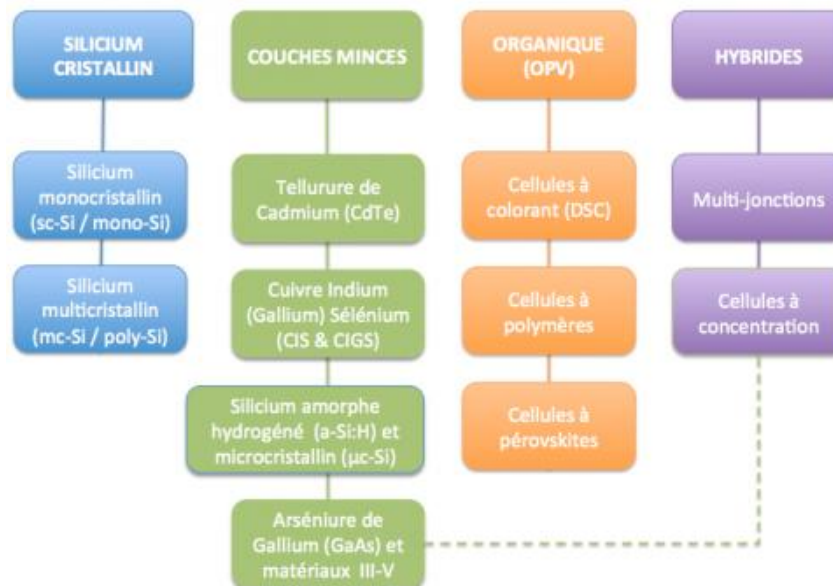


Tableau II-2 : Classification des principales technologies des cellules solaires (Source : Hespul, 2014)

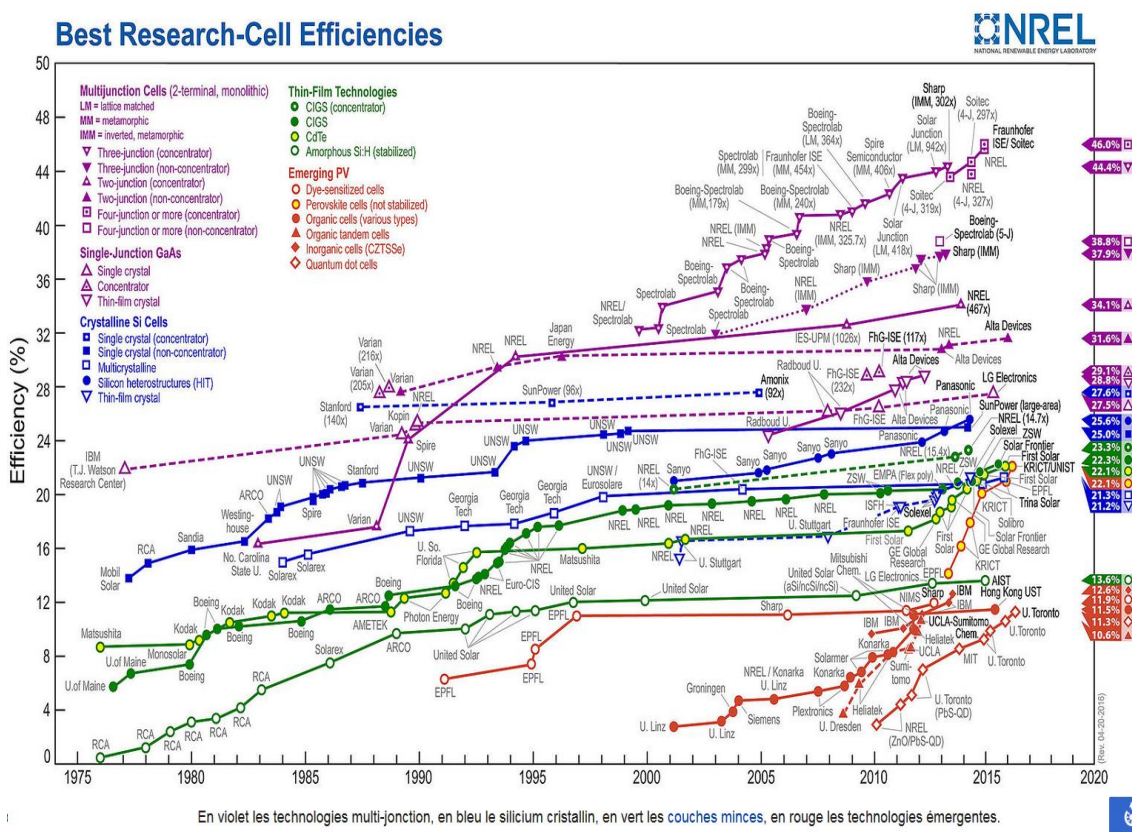


Figure II-1 : Part de la technologie des cellules photovoltaïques au silicium cristallin par rapport aux autres technologies mis à jour régulièrement par le National Renewable Energy Laboratory (NREL) [6]

Les travaux présentés dans cette thèse sont axés sur les filières en bleu sur le schéma NREL de la Fig.II-1 utilisées pour le PV terrestre, sans concentration. Nous nous intéresserons uniquement aux filières développées à l'échelle industrielle.

Il existe plusieurs familles technologiques de modules photovoltaïques. On en cite les deux plus importantes :

- celle du silicium cristallin : elle représente encore plus de 80% des panneaux produits dans le monde. Les lingots de silicium sont fondus puis refroidis lentement pour conserver un cristal homogène (monocristallin), ou rapidement ce qui entraîne la formation de multiples cristaux (poly cristallin). Ses lingots sont ensuite découpés en cellules photovoltaïques (wafers) d'une épaisseur d'environ 200µm. Ces cellules sont rigides. Des traitements par texturisation permettent d'améliorer le rendement tout en faisant disparaître l'aspect « mosaïque » du poly cristallin.

- celle des couches minces : cette technologie brevetée par la compagnie américaine First Solar¹ permet de fabriquer des modules photovoltaïques à très faible coûts, à partir de cellules à base de tellure de cadmium à couche mince [7].

D'après les dernières données de l'Irena, le parc solaire mondial (photovoltaïque et thermodynamique compris) a généré près de 197,1 TWh d'électricité dans le monde en 2014, soit approximativement 0,8% de la production mondiale d'électricité.

En 2016, l'estimation de la production mondiale de silicium était de 7.2 millions de tonnes, dont plus de 80% pour l'industrie solaire uniquement (source US Geological Survey). Selon la PV Market Alliance, à la fin 2016, le parc photovoltaïque mondial a dépassé les 300GW installés.¹

Sur la base d'un besoin de 15t/MWc, l'industrie photovoltaïque a produit 8GWc de panneaux photovoltaïques à base de silicium cristallin.

La figure ci-dessous représente la production mondiale de silicium par pays depuis 2010 jusqu'à 2016:

¹ **First Solar** est une compagnie américaine fondée en 1999. Elle a commencé à produire et à commercialiser des panneaux solaires dès 2002. En 2012, elle affirme détenir le coût le plus bas du marché mondial (0.76\$/W) avec un rendement de 12.5%.

² **L'Irena** (International Renewable Energy Agency) est une organisation intergouvernementale fondée en janvier 2009 à Bonn et dédiée à la promotion des énergies renouvelables (bioénergies, hydroélectricité, géothermie, éolien, solaire, énergies marines)., elle regroupe 145 membres (144 pays et l'UE). Sa principale mission est d'encourager la recherche en favorisant les réseaux et les transferts de technologies.



Figure II-2 : Les pays producteurs de silicium [8]

L'obtention de ce matériau arrive en fin d'un processus de raffinage que l'on peut séparer en deux grandes étapes :

- La transformation du quartz en silicium de grade métallurgique ou MG-Si : elle est réalisée dans un four à arc : type de four utilisé dans l'industrie métallurgique. La pureté du MG-SI est de l'ordre de 98 à 99% [9].
- La purification du silicium métal en silicium de grade solaire ou S₀G-Si : De toute la chaîne de production des modules photovoltaïques, c'est l'étape la plus énergivore. Le silicium obtenu est d'une pureté de l'ordre de 99.9999% [10]. Cette purification est réalisée par le procédé Siemens, qui utilise des réacteurs chimiques pour synthétiser le silicium poly cristallin². En raison du coût très élevé de cette étape et du fait qu'une pureté moindre peut être approuvée, des techniques pour produire du silicium solaire à partir de nouveaux procédés (le procédé Elkem) chimiques mais aussi métallurgiques, notamment, sont explorés [9],[11].

A ce stade et jusqu'à la fabrication du module, sont mis en jeu des savoir-faire propres à l'industrie photovoltaïque.

Le silicium va être purifié encore une fois, dopé uniformément et découpé en plaques une fois refroidi. La technique de cristallisation consiste à solidifier progressivement le silicium poly cristallin fondu de manière contrôlée [12].

C'est dans la charge de silicium en fusion que sera ajouté l'élément dopant, généralement du bore, qui donne un dopage de type p. Le matériau présente au final un réseau cristallin, qui est un arrangement ordonné des atomes de silicium [13].

L'élimination des impuretés se fait par ségrégation. Plus solubles en phase liquide que solide, les impuretés vont migrer vers les zones se solidifiant en dernier. Dans le cas d'un refroidissement par le bas, elles vont se concentrer sur le haut du lingot [9].

Pour la cristallisation, 3 grandes voies sont possibles, selon le choix technologique fait par le fabricant.

- Le tirage Czochralski, pour donner des lingots cylindriques de silicium monocristallin : Le silicium monocristallin est obtenu par croissance ou étirage d'un lingot cylindrique à partir d'un mono cristal « souche » selon le procédé Czochralski

² attention : on utilise souvent abusivement le terme poly cristallin pour parler des modules multi cristallins, or le silicium poly cristallin n'intervient qu'au début pour ensuite être transformé en silicium monocristallin ou multi cristallin

ou CZ [14]. Les cellules finales du silicium monocristallin ont un des meilleurs rendements (15%), mais pour une plus grande dépense énergétique à cette étape [9].



Figure II-3 : Tirage d'un lingot de Silicium par la méthode Czochralski [15]

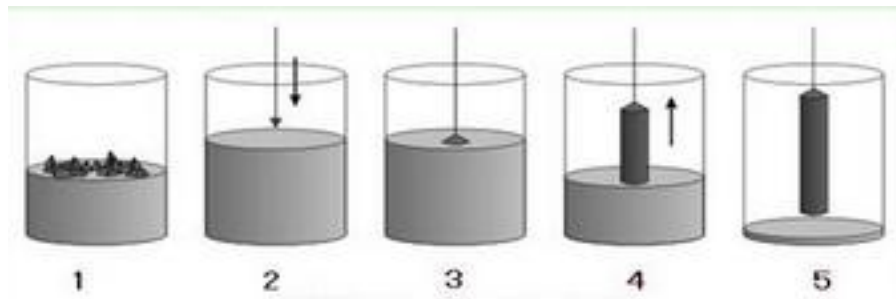


Figure II-4 : Les différentes étapes de la méthode Czochralski [16]



Figure II-5 : Lingots de silicium monocristallin [12]

- La solidification directionnelle donne des briques de silicium multi cristallin (mc-Si) [9], [12] : Le silicium multi cristallin est obtenu par couplage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures [17].

Sa mise au point est moins énergivore et le rendement final des cellules est d'environ 12% [18].

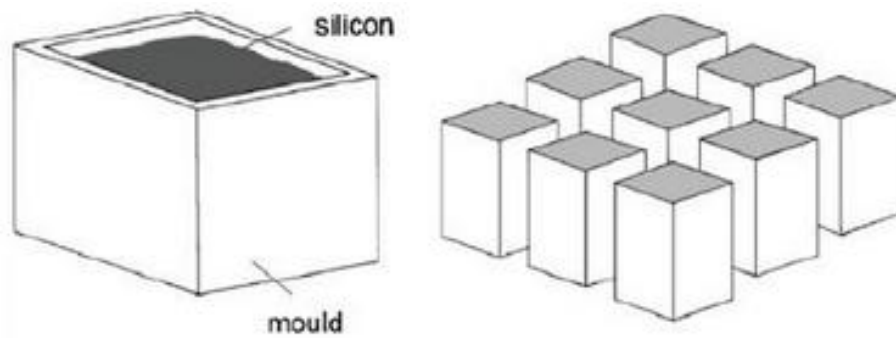


Figure II-6 : Obtention des lingots de silicium multi cristallin [18]

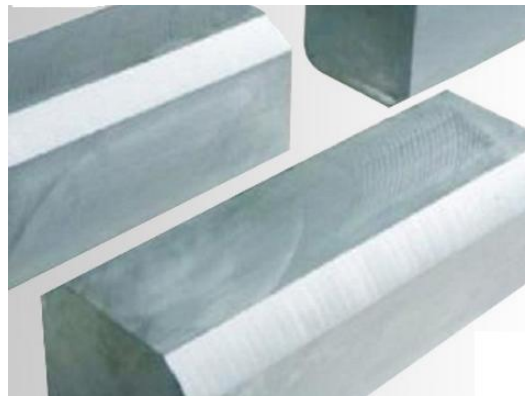


Figure II-7 : Lingots de silicium multi cristallin [19]

Le tirage de ruban pour donner du silicium multi cristallin en ruban : cette technologie présente l'avantage de minorer la perte de matière (silicium) [10], [20]. Elle combine à la fois les étapes de cristallisation et de mise en forme du matériau. A partir d'un bain de silicium fondu, il est obtenu par entraînement d'un ruban de silicium sur un support (plan ou tubulaire) [21].

Le développement de la croissance de silicium sous forme de rubans connaît un essor important ces dernières années et ce à cause du contexte économique actuel. En effet, la possibilité de faire croître des rubans de silicium d'une épaisseur proche de celle des wafers permet de s'affranchir de l'étape de découpe qui induit une perte de matière d'environ 50 % [22], et de l'introduction de certains défauts [23].

Plusieurs techniques ont été développées pour ce type de croissance. Actuellement, deux techniques sont en voie d'industrialisation : rubans de silicium sur support généralement

appelé RAD « Ribbon Against Drop » [24] et rubans de silicium auto-supportés appelé aussi EFG « Edge defined film-fed Growth » [25].

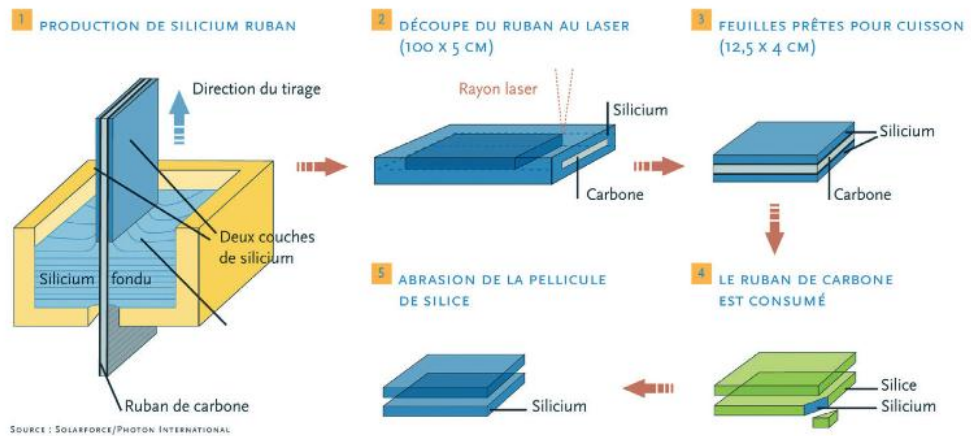


Figure II-8: La technologie du silicium en ruban [26]



Figure II-9 : Silicium cristallin en ruban mince [27]

II- La structure EWT industrielle

La structure EWT présente un émetteur en face avant mais les contacts métalliques sont en face arrière.

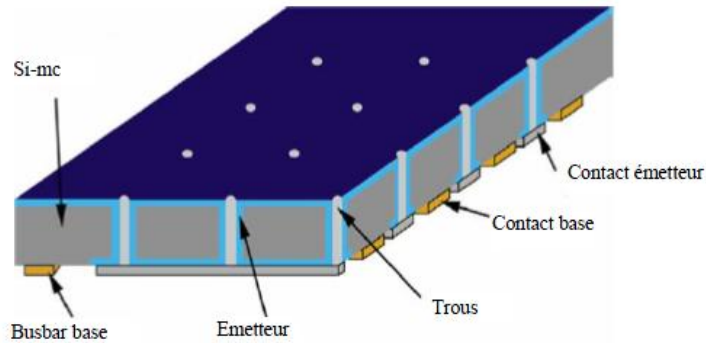


Figure II-10 : Cellule à contacts arrières type Emitter Wrap Through [28],[29],[30]

L'interconnexion de l'émetteur entre la face avant et la face arrière est pratiquée à l'aide de trous dans le substrat. Des ouvertures (vides ou trous) généralement réalisées à l'aide d'un laser, sont dopées et garantissent ainsi la conduction des porteurs de charge de la face avant à la face arrière.

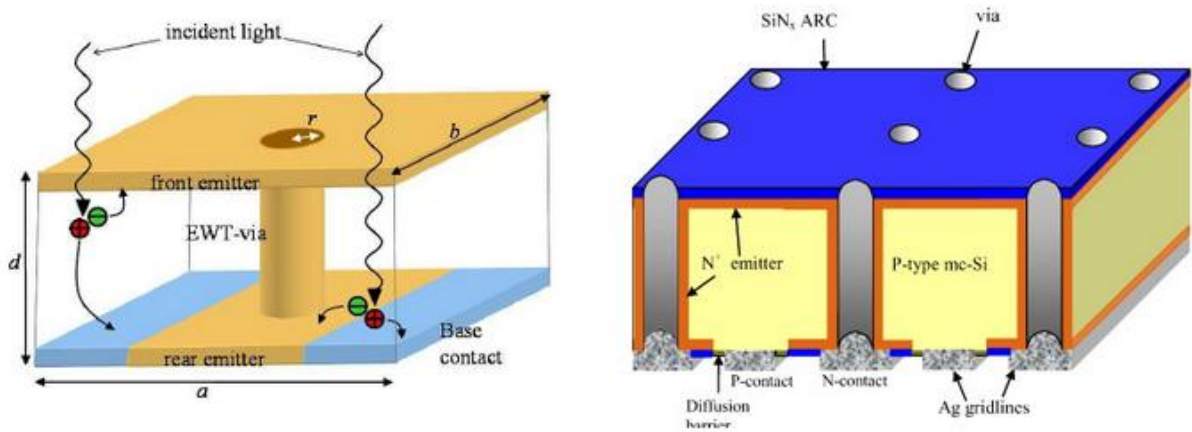


Figure II-11 : Description de la structure EWT (Emitter Wrap Through) [31]

Une partie de l'émetteur se trouve en face arrière permettant la collecte des porteurs minoritaires générés près de la face arrière.

Les contacts n et p placés en face arrière, et formant des peignes inter digités permettent une bonne réflectivité de la face arrière dans laquelle une diffusion de phosphore à haute concentration est réalisée.

II.1. Les principaux résultats obtenus dans la littérature

La notion de la structure EWT fut exposée pour la première fois lors de la conférence « Photovoltaic Specialists » qui s'est tenue à Las Vegas par J.Gee et al en 1993. Depuis, de nombreuses attentions ont été accordées à cette structure par les « Sandia National Laboratories » qui ont détenu, pendant de longues années, le record de rendement par photolithographie. En Europe l'université de Konstanz (Allemagne) et ECN (pays bas) ont développé cette technologie par différents procédés dont la sérigraphie [32]. Le record actuel de 21.4% sur une surface de 4cm^2 et obtenu par photolithographie sur substrat FZ est détenu par le Fraunhofer ISE. Dans les records, on peut signaler le résultat remarquable de la structure RISE-EWT [33],[34] qui a permis d'obtenir 20% sur 93cm^2 . Cette structure, ne nécessitant qu'une seule étape de diffusion et de métallisation, est réalisée sur substrat FZ à l'aide de plusieurs gravures laser. Au niveau industriel, l'entreprise « Advent Solar Inc », a obtenu des rendements de 15.6% pour ce type de cellules sur silicium multi cristallin avec une technologie basée sur la sérigraphie [28]. Advent solar a été fondée en 2002-2003 (rachetée en 2009 par Applied Materials) pour produire des cellules EWT de façon industrielle. Son origine est liée aux travaux développés au « Sandia National Laboratories ». La technique de Sandia, basée sur un dépôt d'oxyde, une lithographie et des contacts sérigraphiés, a permis d'obtenir des cellules ayant un rendement de 15.2% sur substrat Cz. La société Advent Solar a été créée pour les produire industriellement et diminuer leurs coûts de fabrication. Depuis le début de l'année 2007, cette firme basée à Albuquerque (Nouveau Mexique), possède une ligne de production de 25MWc et prévoit dans les prochaines années un développement exponentiel de leur production. Leur ligne pilote a permis d'obtenir des rendements de 15.6% sur un substrat multi cristallin de 156cm^2 avec un procédé relativement simple [5]. A noter que le record est détenu pour la cellule RISE-EWT de Stiebel Eltron qui présente un rendement record atteignant 21,4% [33].

II.2. La technologie

Les cellules EWT produites par Advent Solar sont fabriquées à partir de substrat multi cristallin de 156cm^2 . Grâce à un laser, chaque plaquette est percée par environ 15000 trous pour former la structure EWT. A l'aide d'une solution alcaline, un nettoyage chimique est ensuite réalisé pour enlever les défauts de coupe et de gravure. Afin de délimiter les zones p et n lors de la diffusion, la sérigraphie de la barrière de diffusion est alors réalisée. Cette diffusion est réalisée sous POCl_3 et permet de former en une seule étape, l'émetteur sur la face

avant, la face arrière et dans les trous. Pour passiver les surfaces, un dépôt de nitrure est alors effectué sur chacune des faces avant et arrière et les contacts sont formés par sérigraphie sous formes de deux peignes inter digités. Ces cellules sans texturisation, ni émetteur sélectif, permettent d'obtenir un rendement moyen de 15.2% sur substrat multi cristallin d'environ 220 μm d'épaisseur avec une durée de vie des porteurs minoritaires de 20 à 30 μs [28].

II.3. Réalisation des cellules EWT

II.3.1. La formation des trous

La plupart des procédés de fabrication produits pour le macroscopique sont actuellement adaptés à l'échelle microscopique. Les procédés de micro usinage par arrachement de matière tels que le perçage, la gravure ou encore la découpe s'invitent dans le secteur industriel photovoltaïque.

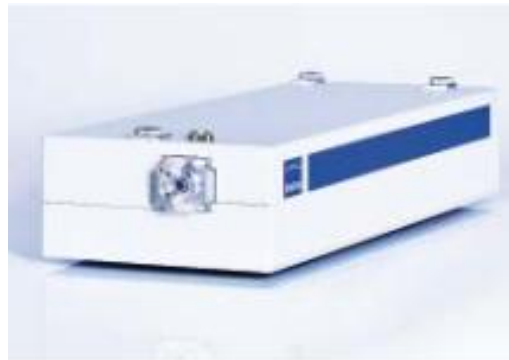
Plusieurs solutions ont été envisagées pour percer des trous entre la face avant et la face arrière: gravure chimique et plasma, gravure par ultrasons, abrasion mécanique, et finalement par laser. La gravure laser est actuellement la technique la plus exploitée car elle présente l'avantage de ne pas dépendre de l'orientation du matériau (gravure uniforme sur silicium multi cristallin) et sa vitesse d'exécution rend la production de cellules EWT industrialisable [28].

Les potentialités offertes des lasers ainsi que la qualité du micro usinage induisent à une diminution du temps et du coût de fabrication. En plus, l'absence de contact entre le laser et la plaque de silicium (la cible) permet l'usinage de pièces très fines et donc très fragiles. Les lasers utilisés sont impulsionnels (à l'opposé des lasers continus) et les profondeurs usinées à chaque impulsion sont excellentement maîtrisées. Pour les cellules photovoltaïques de type EWT, le laser utilisé pour le perçage du silicium est le « laser impulsionnel nanoseconde ». Pour éviter toute bavure telle que les déformations liées à la chaleur, il est important d'optimiser le temps d'exposition de la cible au faisceau du laser [35].

A titre d'exemple, l'institut allemand ISE Fraunhofer utilise pour les cellules photovoltaïques de type MWT/EWT les lasers de références JenLas Disk IR50 et JenLas Disk IR70 dont les propriétés sont les suivantes [36] :

- Source laser de plus de 65W
- Durée d'impulsion accordable :30...2000ns

- Taux de répétition des impulsions de plus de 2KHz
- Energie de pulsation de plus de 7mJ



FigureII-12 : Le laser JenLas Disk IR50/IR70 utilisé par ISE Fraunhofer pour les cellules photovoltaïques de type MWT/EWT [36]

Ces types de lasers peuvent percer une plaque de silicium à raison de 2000 trous/seconde. Le diamètre du trou pouvant varier de 20 à 100 μ m.

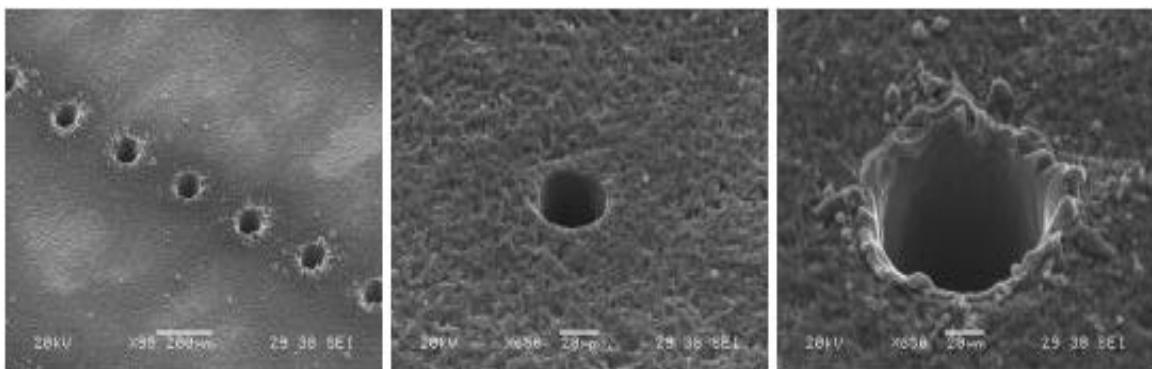


Figure II-13 : Perforation au laser pour la fabrication des cellules EWT (images SEM)

II.3.2. La distribution de trous

La conciliation entre la diminution de la résistance série et la précision d'alignement lors des différentes étapes de réalisation est primordiale et déterminante pour la distribution des trous. La résistance série au sein de la cellule est engendrée par de nombreux paramètres : la conductivité des lignes de métallisation, la résistance des trous, la conductivité de l'émetteur, la conductivité des porteurs majoritaires dans le substrat, la qualité des contacts métal-semi-conducteur...A noter que la conductivité des lignes de métallisation et la qualité du contact métal-semi-conducteur sont indépendants de la répartition des trous [28].

L'influence des trous sur la résistance série est exprimée par :

$$R_{s, \text{trou}} = R_{\text{émetteur}} \cdot \frac{e}{2\pi r} \cdot \frac{A}{N} \quad \text{EqII-1}$$

Où : $R_{\text{émetteur}}$ correspond à la résistance de l'émetteur, e à l'épaisseur du substrat, A à la surface de la cellule et N au nombre de trous.

D'après l'équation II-1, la résistance de l'émetteur est proportionnelle à la résistance engendrée par les trous, donc l'augmentation du dopage de l'émetteur permet de diminuer la résistance série. Par application numérique de cette formule aux cellules standards d'Advent Solar, les trous engendrent une perte résistive de l'ordre de 20%.

Au niveau de l'émetteur, les pertes résistives sont engendrés par la conduction des porteurs collectés dans l'émetteur jusqu'aux trous. Pour calculer la résistance série, une cellule élémentaire (Figure II-13) doit être déterminée. La cellule élémentaire a une longueur correspondante à la distance entre deux doigts adjacents et sa largeur est égale à la distance entre deux trous d'un même contact.

Une évaluation de la résistance série due à l'émetteur peut être faite en substituant la cellule unitaire rectangulaire par une surface circulaire de même surface.

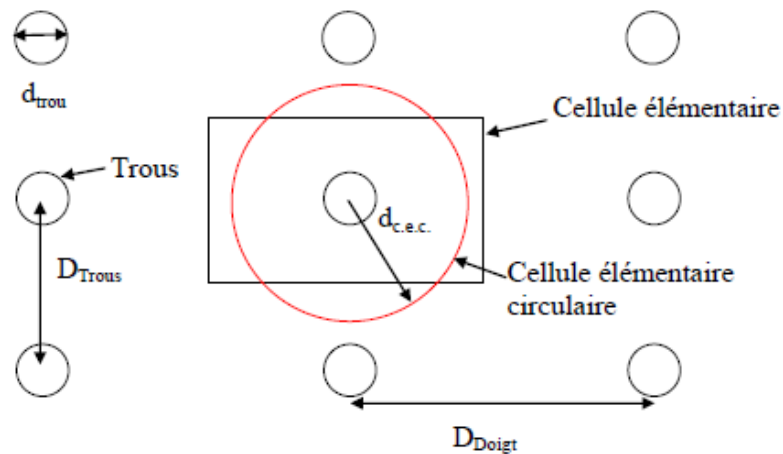


Figure II-14: Cellule élémentaire de la structure EWT [28]

Dans ce cas, l'expression des pertes résistives est exprimée par :

$$R_{s, \text{émetteur}} = \frac{R_{\text{émetteur}} \cdot A_{CE}}{2\pi} [0.25(1-r_c^4) - (1-r_c^2) - \ln r_c] \quad \text{Eq II-2}$$

Où : $R_{\text{émetteur}}$ correspond à la résistance de l'émetteur, A_{ce} à la surface de la cellule élémentaire, et r_c au diamètre du trou divisé par le diamètre de la cellule élémentaire. Pour obtenir une faible $R_{s,\text{émetteur}}$, les doigts doivent être très rapprochés, la distance entre les trous doit être faible et les trous de diamètre élevé. Une faible résistivité d'émetteur permet aussi de réduire l'influence de la résistance série mais altère défavorablement le IQE pour les courtes longueurs d'onde.

Au niveau de la conception, les doigts constituant les peignes inter digités p et n doivent être espacés pour écarter tout problème de courts circuits. Pour obtenir un écartement acceptable et fiable, un bon compromis est obtenu en utilisant une distance de 2 mm entre les doigts de même polarité. Entre les trous d'un même doigt, une distance de 0.5-0.8 mm est couramment choisie par compromis entre le temps de réalisation des trous et la résistance série.

II.3.3. Définition de la jonction sur la face arrière

La délimitation des zones p et n à l'arrière de la cellule est l'un des points cruciaux de la conception des cellules EWT. Dans la littérature, plusieurs techniques ont été développées et que l'on peut diviser en 3 groupes :

- séparation de la zone n+ par dépôt d'une couche de diélectrique (masque de protection avant diffusion)
- séparation des zones p et n par des méthodes abrasives (gravures laser, plasma chimique)
- formation directe de la jonction rectifiée (P-Al co-diffusion, dépôt localisé de couche dopante).

La principale différence entre ces trois technologies est l'état de la zone de charge espace (ZCE) sur la face arrière suite à la réalisation de la cellule. La ZCE dans cette région n'est pas localisée dans le substrat mais en surface, ce qui cause des recombinaisons additionnelles.

Dans une cellule à contacts en face avant standard, la ZCE ouverte se trouve en périphérie du substrat et a donc une longueur égale au périmètre de la cellule. Dans le cas des structures à contacts arrière type EWT, la jonction pn «ouverte» se trouve en périphérie du peigne n+ et sa longueur est de 40 à 50 fois plus grande que sur une cellule à contact en face avant standard de même taille. L'influence de la jonction pn «ouverte» sera donc plus importante pour les cellules EWT.

L'utilisation d'une ouverture de jonction par une méthode abrasive engendre des défauts de surface qui sont très recombinaisons. Pour les cellules à contact en face avant, cette technique simple et rapide sera utilisée du fait de la faible influence de la jonction pn « ouverte » sur le rendement. En revanche sur les cellules à contact arrière, cette méthode ne sera pas utilisée à moins de former une couche de passivation sur la jonction pn « ouverte ». Cette méthode est appliquée dans le cas de la cellule RISE-EWT [33] par croissance d'un oxyde de silicium. L'université de Konstanz a développé un procédé original de séparation des peignes p et n par Al-P co-diffusion. Ce procédé consiste à partir d'un substrat de type p, à évaporer à travers un masque une couche d'aluminium de $3\mu\text{m}$ et d'ensuite réaliser une diffusion POCl_3 . Il y a alors formation de l'émetteur, du BSF et d'une zone compensée. Cette méthode permet d'obtenir des cellules EWT présentant des facteurs de forme de 71% mais le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert restent faibles. Cette technique peut être améliorée avec l'ajout d'une couche de Si_3N_x par la méthode LPCVD comme des limitations des zones p et n. cette technique fut utilisée par Jooss qui a obtenue des rendements de 16.6% sur le même type de cellules.

La délimitation de la zone n+ par dépôt d'une couche diélectrique est, dans la littérature, la méthode la plus souvent utilisée. Elle peut se faire à l'aide d'une couche de SiO_2 , LPCVD SiN_x , PECVD SiN_x . Ces diélectriques doivent avoir certaines caractéristiques: barrière de diffusion lors du dopage phosphore, résister aux attaques chimiques (HF gravure alcaline) et permettre une bonne passivation sans création d'une zone d'inversion pouvant court-circuiter la jonction. Ces diélectriques sont en général déposés sur toute la surface et ouverts localement pour permettre la diffusion. Les motifs sont réalisés à l'aide d'une gravure laser ou par lithographie suivie d'une gravure chimique. Une solution plus économique et industrielle consiste à déposer ce diélectrique par sérigraphie.

II.4. Les intérêts de la structure EWT

La structure EWT présente plusieurs avantages [28]:

- il n'y a pas de taux d'ombre des contacts (puisque les contacts sont placés en face arrière)
- la résistance série R_s est réduite vu que les contacts sont réalisés sur la face arrière. Les contacts métalliques servent de réflecteur arrière et peuvent donc être larges ce qui améliore le confinement optique.

- Vu la situation de l'émetteur, les recombinaisons dans l'émetteur sont moindres et par voie de conséquence, l'émetteur peut être fortement dopé, ce qui augmente la barrière de potentiel de la jonction PN.

Les cellules de type EWT sont connectées uniquement à partir de la face arrière, elles peuvent être disposées en module de façon très dense.

Pour une meilleure mise en valeur dans le bâtiment, l'architecture est en quête de modules de couleur uniforme. L'absence de contacts en face avant permet de produire des modules de couleur uniforme très esthétique.

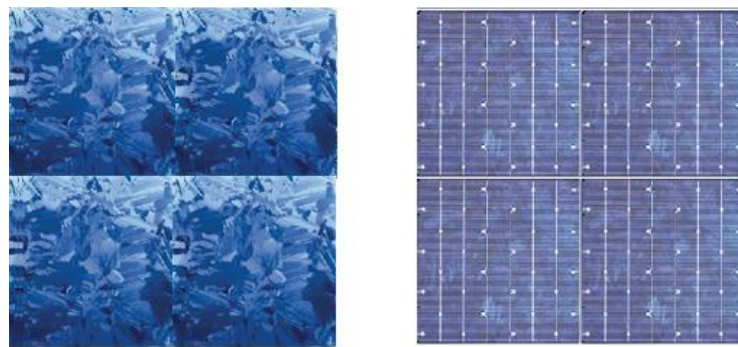


Figure II-15 : Cellule solaire EWT (à gauche : face avant ; à droite : face arrière)
(Source : Applied Materials ; 2014)

II.5. Les inconvénients de la structure EWT

La structure EWT présente quelques inconvénients dont on cite [37] :

- la difficulté de fabrication de la structure : l'utilisation de technique d'alignement est nécessaire (lithographie, sérigraphie, masque métallique).
- le substrat de silicium doit être de bonne qualité : les longueurs de diffusion des porteurs doivent être supérieures à l'épaisseur du substrat.
- la passivation de la face avant est primordiale. (nous reviendrons sur ce point dans le dernier chapitre).

II.6. Paramètres clés des cellules avec une structure EWT

II.6.1. la recombinaison en surface :

Le processus de génération des porteurs est équilibré par un processus appelé : « recombinaison » (déjà cité au chapitre I) qui peut être qualifié de :

- Directe (bande à bande) : l'électron passe directement de la bande de conduction à la bande de valence [38].
- Indirecte : l'électron passe de la bande de conduction à un niveau d'énergie d'une impureté agissant comme « centre de recombinaison » et situé dans la bande interdite, puis il sera réémis vers la bande de valence. Cette étape peut aussi être décrite, de façon équivalente, comme la capture par le centre recombinant d'un trou de la bande de valence [39].
- Radiative : l'énergie (de recombinaison) est cédée sous forme lumineuse (photon) [38].
- Non radiative : l'énergie est cédée sous forme de phonons (vibrations du réseau) ou à un autre électron libre (« recombinaison Auger ») [40].

II.6.2. La longueur de diffusion

La longueur de diffusion des porteurs minoritaires (L_p dans un matériau de type n et L_n dans un matériau de type p) caractérise la distance moyenne que peuvent atteindre les porteurs photogénérés ou injectés avant de se recombiner [41].

$$L = \sqrt{D\tau} \quad \text{Eq II-3}$$

Où D est le coefficient de diffusion des porteurs calculé à partir de la relation d'Einstein dans le cas d'un semi-conducteur non dégénéré, dans laquelle interviennent la mobilité des porteurs et la température.

$$D = \frac{kT}{q} \mu \quad \text{Eq II-4}$$

II.7. La sérigraphie

Le terme « sérigraphie » vient du latin « sericum » qui veut dire « soie » et du grec « graphein » qui veut dire « écrire ». Avec ce processus d'impression, on peut imprimer des motifs sur diverses matières: céramiques, verres, métaux, matières plastiques, tissus... [42].

Dans le domaine du photovoltaïque, l'élaboration des contacts est une des étapes clé dans le procédé de fabrication des cellules photovoltaïques. En particulier dans le cas des structures à haut rendement [43]. Le choix de la technique de métallisation et du métal utilisé est très important et dépend d'un certain nombre de critères, tant au niveau électrique (résistance de contact, conductivité des lignes), mécanique (adhérence suffisante, soudabilité) qu'économique. Actuellement, la méthode la plus utilisée dans l'industrie photovoltaïque est la sérigraphie [43]. En effet, en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son bas coût, la sérigraphie de pâte à base d'Ag pour la surface avant et d'Al pour la face arrière est utilisée pour plus de 85% de la production mondiale avec le développement de nouvelles structures de cellules haut rendement et toujours dans un souci de limitation des coûts, de nombreuses investigations ont été menées pour améliorer les techniques de sérigraphie et la composition des pâtes [44]. Plus récemment, des méthodes alternatives ont vu le jour, celles dites électrochimiques présentant un intérêt grandissant [43].

II.7.1. Principe général

II.7.1.1. Les encres

ils sont constitués de trois éléments principaux [45]

- Le liant organique (provisoire) qui est un liquide comportant divers éléments qui disparaîtront au fur et à mesure des opérations. Il assure la cohésion de la couche avant le traitement thermique et après l'étape de dépôt.
- Le liant minéral (permanent) assure la cohésion de la couche après traitement thermique et après disparition du liant organique.
- Le matériau actif : pour réaliser les résistances et les capacitances ainsi que les connections métalliques, les fabricants utilisent différents matériaux actifs tels que les poudres d'or, d'argent, de carbone ou des alliages. Pour que la couche conserve les mêmes propriétés, il faut que les particules doivent être très fines et de forme sphérique pour favoriser une bonne rhéologie de l'encre.

Malheureusement, les fabricants restent très flous sur les compositions utilisées et la formulation des encres est complexe et fait intervenir beaucoup de savoir-faire [45].

II.7.1.2. L'écran

il permet la réalisation des dépôts. Il est formé d'un cadre métallique sur lequel est tendue une toile (en acier inoxydable pour l'industrie) enduite d'un polymère et ajourée selon les motifs désirés [46].

Quatre paramètres sont à définir :

- Le pas de la maille
- Le vide de la maille
- La transparence de la toile
- L'épaisseur de la toile

II.7.1.3. L'impression

Selon la qualité du dépôt souhaité, les paramètres d'impression sont ajustés : épaisseur, définition, reproductibilité...).

A titre d'exemples, l'augmentation de la vitesse du mouvement de la raclette entraîne une augmentation de l'épaisseur de dépôt et l'augmentation de la dureté de la raclette entraîne une diminution de la définition du dépôt [47].

II.7.1.4. Le séchage et la cuisson

La cuisson donne aux couches leurs caractéristiques finales notamment la résistance mécanique. Pratiquement, tous les traitements thermiques se font entre 800 et 950°C [45].

Le séchage commence dès que la couche est mise en contact avec l'air (idéalement entre 15 et 38°C). Le séchage risque d'être plus lent si l'air est très humide, si la température est trop basse, ou si la couche d'encre est trop épaisse [48].

Donc, pour réaliser une couche épaisse, plusieurs paramètres sont à considérer pour obtenir des couches de qualité. De nombreuses études de compréhension et d'optimisation ont été réalisées, mais restent un savoir-faire industriel non publié.

II.7.2. Sérigraphie pour le photovoltaïque

Le principe de la sérigraphie est de déposer une pâte métallique au travers d'un masque afin de réaliser le motif de grille souhaité.

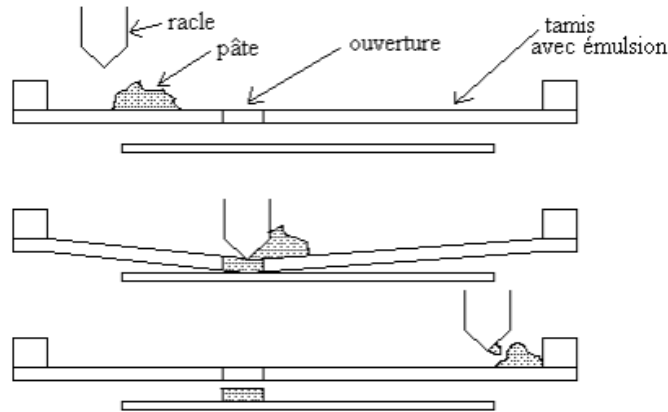


Figure II-16 : Mouvement de la raclette pendant la sérigraphie [32]

Le tamis comporte une émulsion dans laquelle on constitue des ouvertures par photolithographie. Au cours de la sérigraphie, une pâte d'argent est pressée à l'aide d'une raclette au travers de ces ouvertures [32], [49]. La pâte doit ensuite être frittée. Pendant cette opération, le métal diffuse dans l'émetteur, ce qui assure un bon contact, mais impose que ce dernier soit suffisamment épais pour ne pas être percé, du moins à proximité des métallisations [50].

Dans le cas des cellules photovoltaïques industrielles, la grille métallique est réalisée avec une pâte à base d'Argent (pour le contact de type n) et une pâte à base d'Aluminium (pour le contact de type p) [37]. Une large gamme de pâtes métalliques est disponible sur le marché. Les constituants principaux des ces pâtes sont:

- des particules métalliques, dont la taille est généralement comprise entre 1 et 7 μ m
- de la fritte de verre, typiquement des verres de silicates contenant du PbO, pour permettre la pénétration de la pâte au travers d'une couche diélectrique. Elle favorise également la réduction de la température de fusion des particules métalliques et permet la formation des cristallites de métal.
- des solvants, pour éviter l'agglomération des particules métalliques
- des agents liants, qui assurent la cohésion et l'ajustement de la viscosité de la pâte [43].

La formation du contact sur silicium a lieu lors de l'étape de recuit [51]. Après dépôt de la pâte, une première étape de séchage dans une étuve à air à 150°C est réalisée pour permettre l'évaporation des solvants. Le recuit se fait ensuite dans un four à passage à recuit rapide en 2 étapes : un plateau de température compris entre 300°C et 500°C pour solidifier la pâte, suivi d'un pic de température à 800°C pendant 5s, durant lequel seront assurés la formation de l'Al-BSF en face arrière et la formation du contact en argent [53].

Les rendements typiques de cellules sérigraphiées industrielles sont compris entre 15 et 16% (silicium multi cristallin) avec des facteurs de forme FF généralement compris entre 75 et 77% [32].

II.7.3. Avantages

L'implantation massive de la sérigraphie dans l'industrie photovoltaïque est due aux nombreux avantages qu'elle comporte [45]:

- la rapidité : cette technique permet d'assurer la métallisation de 1000 wafers par heure, soit la cadence moyenne de production d'une cellule toutes les 3s.
- le bas coût : la simplicité et la maîtrise des moyens techniques nécessaires à sa mise en œuvre en fait une technique très compétitive économiquement.

II.7.4. Inconvénients

Cependant, elle possède un certain nombre de limitations, qui deviennent particulièrement problématiques si l'on veut l'appliquer aux structures à haut rendement [28], [53]. On peut citer :

- la forte résistivité des lignes sérigraphiées par rapport à un métal massif en raison de la porosité des contacts
- la nécessité d'avoir un dopage d'émetteur élevé : la concentration de dopants en surface doit en effet être supérieure à 10^{20}cm^{-3} pour assurer une résistance de contact inférieure à $10^{-2}\Omega\text{cm}^2$. Les valeurs typiques de ρ_c de l'Ag sérigraphié sur émetteur n+ avec 10^{20}cm^{-3} de dopants en surface sont comprises entre 0.3 et $3\text{m}\Omega.\text{cm}^2$.
- le risque de court-circuit de l'émetteur en cas de pénétration trop profonde de la pâte de sérigraphie dans le Si pendant le recuit.

III- *Passivation de la surface*

Augmenter la collecte des porteurs photogénérés en améliorant leur durée de vie (ou leur longueur de diffusion), (comme cela a été vu au paragraphe V-7) via l'amélioration de la qualité cristalline du silicium, est une étape importante pour obtenir de hauts rendements de conversion lors de la fabrication de cellules photovoltaïques en silicium cristallin. Ceci est possible par la réduction de l'activité recombinante des défauts présents en surface ou dans le volume du matériau. On spécifie la passivation de surface, caractérisée par les vitesses de recombinaisons en faces avant et arrière, couplée, dans le cas du silicium multi cristallin, à la passivation de volume, caractérisée par la durée de vie des porteurs minoritaires. Pour assurer cette passivation, les matériaux déposés en couches minces sur la face avant et /ou arrière des cellules photovoltaïques, visent à « guérir » les défauts présents en surface du silicium, soit en réduisant la densité d'états d'interface (en neutralisant par exemple chimiquement les liaisons pendantes), soit en repoussant les porteurs (électrons ou trous) loin de la surface par effet de champ. D'autre part, dans le cas du silicium multi cristallin, lors des étapes de fabrication des cellules photovoltaïques, des atomes d'hydrogène diffusent à partir de la couche de passivation vers le volume du matériau silicium. Cette hydrogénation diminue le nombre de défauts présents en volume, passive le matériau et améliore le rendement final de la cellule [54].

A l'exception de leurs propriétés de passivation, les couches minces déposées doivent également avoir des propriétés optiques particulières. Par conséquent, lorsqu'elles sont situées sur la face avant des cellules, les couches minces doivent être anti-réfléctives et non absorbantes. La couche antireflet permet de minimiser les pertes de rayonnement dues à la réflexion de la lumière sur la face avant de la cellule. Par contre, lorsqu'elles sont déposées sur la face arrière des cellules, les couches minces doivent au contraire présenter un taux de réflexion interne élevé pour limiter les pertes dues à la transmission en face arrière [55].

C'est pourquoi, propriétés optiques (indice de réfraction n , coefficient d'absorption k , épaisseur) et propriétés de passivation (durée de vie et longueur de diffusion des porteurs minoritaires, vitesses de recombinaison en surface) des films minces déposés doivent être spécifiées.

III.1. Dépôt des couches minces de matériaux

De nombreux dispositifs utilisent des couches minces. Le choix des matériaux utilisés dépend du domaine d'application. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux couches minces diélectriques et plus particulièrement aux oxydes [56]. En optique ou en optoélectronique, on utilise les films diélectriques pour obtenir une réponse optique bien définie. Plus précisément, on cherche à obtenir une structure qui ait un certain facteur de réflexion, ou de transmission, sur une plage de longueurs d'onde. Par exemple, un revêtement antireflet permet de diminuer le facteur de réflexion dans le spectre du visible [57]. L'étape de « conception » consiste à définir quelle valeur doit avoir l'épaisseur en fonction de l'indice de réfraction pour que la structure présente les propriétés optiques recherchées.

Une couche mince est un élément dont l'épaisseur est nanométrique. Les couches minces sont obtenues par dépôt d'un matériau sur un substrat. Leurs propriétés sont étroitement liées aux techniques de dépôt [58]. Elles ont de multiples applications, en particulier en microélectronique, photovoltaïque...etc. On distingue deux méthodes de dépôt :

III.1.1 Dépôt par voie physique (PVD) :

Le dépôt PVD (Physical Vapor Deposition) est le procédé le plus utilisé pour les dépôts de couches minces des matériaux. Il consiste à utiliser des vapeurs du matériau à déposer pour réaliser un dépôt sur un substrat quelconque. Le transport des vapeurs de la source vers le substrat nécessite un vide assez poussé (10^{-5} à 10^{-10} Pa) pour transporter les atomes en évitant la formation de poudre ou toute autre forme de pollution liée à une condensation [59].

III.1.2 Dépôt par voie chimique (CVD):

Il est largement utilisé pour sa fiabilité, ses vitesses rapides de dépôts et sa capacité d'élaborer des couches avec des compositions variées.

Contrairement à la (PVD), les méthodes par (CVD) n'utilisent pas une source de vapeurs mais des précurseurs gazeux qui réagissent chimiquement pour former une couche solide déposée sur un substrat (des vapeurs de précurseur sont transportées en phase gazeuse jusqu'à la surface du substrat ou elle se décompose) [60].

Les méthodes de synthèse les plus utilisées sont :

- CVD
- PECVD (Plasma Enhanced CVD)
- ALD (le dépôt par couche atomique dans le but de réduire les températures de dépôt)

Pour les dépôts CVD « classique », la température élevée du substrat (plusieurs centaines de degrés Celsius) fournit l'énergie d'activation nécessaire pour amorcer les réactions chimiques, on parle alors de CVD « thermique » [61]. Toute fois, il est possible d'activer ces réactions en utilisant un plasma [62]. La figure ci-dessous englobe les techniques de dépôts les plus utilisées :

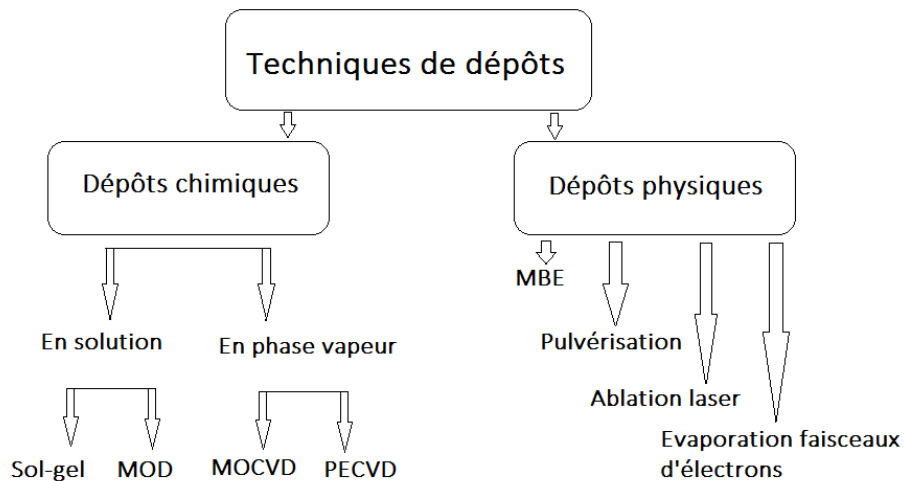


Figure II-17 : Synoptique des différentes techniques de dépôts de couches minces [63]

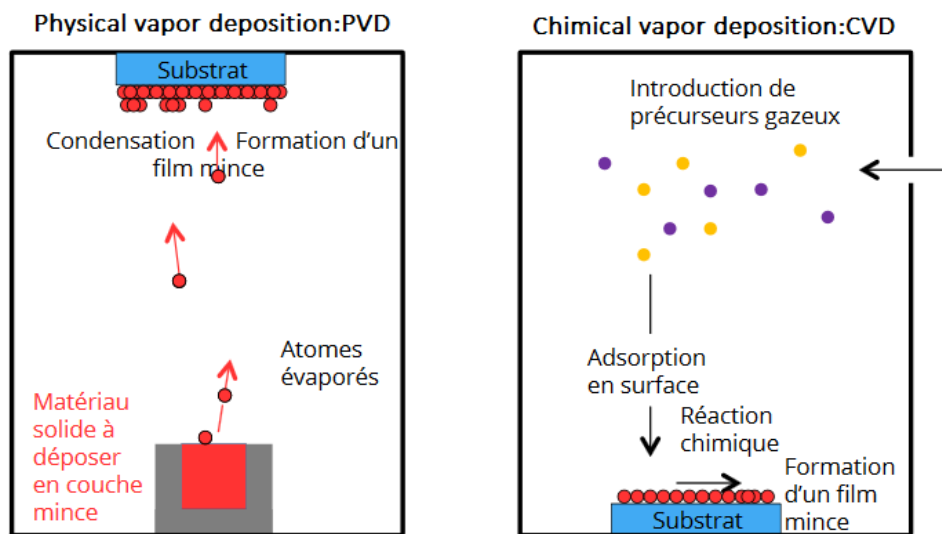


Figure II-18 : Schématisation de deux exemples de dépôt de couches minces : PVD et CVD [64]

III.2 Les matériaux « low-k » et « high-k » ou dépôt de films diélectriques

Dans le chapitre 1, nous avons vu que le rendement de conversion ne peut atteindre théoriquement 30% sous (AM1.0). Cette limite est essentiellement due au mécanisme de pertes (énergie de gap du Si=1.124eV). Les autres pertes incluent :

- la thermalisation c'est-à-dire les photons dont l'énergie excèdent celle du gap,
- les pertes par transition c'est-à-dire les photons dont l'énergie est inférieure au gap,
- Les pertes radiatives(Auger) c'est-à-dire les recombinaisons des porteurs de charge.

En vue de minimiser ces pertes, on a tenté depuis plusieurs années de trouver les meilleures architectures et différentes stratégies ont été développées dont la passivation en surface.

III.2.1 Les critères de choix d'un oxyde

Nombreux sont les matériaux qui possèdent une constante diélectrique élevée ou très élevée qui peuvent convenir [65]. On peut les classer en trois catégories au côté des matériaux dont la permittivité n'excède pas 10 :

- ✓ les « medium-k » ($10 \leq k \leq 15$)
- ✓ les « high-k » ($15 \leq k \leq 100$)
- ✓ les « very high-k » ($k \geq 100$)

On serait tenter de dire en premier lieu que les oxydes les plus appropriés sont ceux dont la permittivité est la plus élevée possible : les « very high-k », mais le choix du matériau candidat n'est pas si simple .

Les oxydes déposés doivent répondre à certaines exigences :

- Aspects liés à la largeur de la bande interdite : il est primordial qu'un oxyde utilisé possède une largeur de bande interdite ΔE_g suffisamment grande. La figure ci-dessous illustre-pour quelques oxydes (binaires ou ternaires)- leur gap en fonction de leur constante diélectrique.

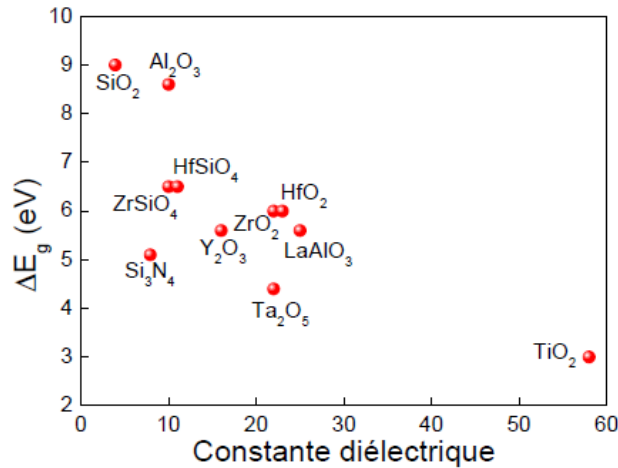


Figure II-19: Constantes diélectriques de quelques oxydes en fonction du gap [66]

Le tableau ci-dessous illustre, pour quelques oxydes (binaires ou ternaires), leurs gaps optiques et les hauteurs de barrière vis-à-vis du silicium.

Oxyde	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Ta ₂ O ₅	ZrO ₂	HfO ₂	Al ₂ O ₃	LaAlO ₃	Y ₂ O ₃	SrTiO ₃
ΔE_c (eV)	3,5	2,4	0,3	1,4	1,5	2,8	2,1	2,3	-0,1
ΔE_v (eV)	4,4	1,8	3,0	3,3	3,4	4,9	1,9	3,6	2,4
ΔE_g (eV)	9,0	5,1	4,4	6,0	6,0	8,6	5,6	5,6	3,2

Tableau II-3 : Gaps optiques et hauteurs de barrière vis-à-vis du silicium pour quelques oxydes [66]

Comme illustré en figure II-18, la hauteur de barrière décroît quand la constante diélectrique augmente. On a donc, à trouver un compromis entre la constante diélectrique et le gap et cela limite l'application des matériaux à très forte permittivité. Les hauteurs de barrière sont des propriétés importantes puisqu'elles représentent la hauteur vue par les électrons depuis la bande de conduction ou par des trous depuis la bande de valence [67]. Pour garantir un comportement d'isolant, les hauteurs de barrière doivent être suffisamment grandes afin de minimiser l'injection des porteurs. Robertson et Peacock ont montré que les valeurs de gaps et de hauteurs de barrières doivent être supérieures à 5 et 1eV respectivement. Ils ont aussi remarqué qu'en règle générale, les matériaux possédant une permittivité faible ont un gap élevé et vice versa [68]. Dans le cas contraire, cela pourrait être à l'origine d'une contribution excessive du courant de fuite [66].

- Aspects liés à la stabilité physico-chimique : la stabilité thermique de l'oxyde à température élevée (jusqu'à 1000°C) est un aspect capital du choix du matériau, sous-entendu :
 - ✓ L'absence de modification de la morphologie structurale durant le procédé de dépôt ou post-dépôt (cristallisation notamment).
 - ✓ L'absence de diffusion atomique et de réaction (il faut éviter tout phénomène de dégradation tel que la formation d'une couche interfaciale de silice ou de silicate mal contrôlée et pas du tout désirable).
- La qualité de l'interface et défauts dans le volume : c'est un paramètre crucial pour le transport des porteurs. Une faible densité d'état d'interface (comprise entre 10^{10} et $10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$) est requise afin de se rapprocher le plus d'une interface quasi-idéale.
- La morphologie : le matériau choisi doit être compatible avec les procédés de fabrication et la fiabilité du dispositif : la structure du matériau doit résister aux températures lors du processus de fabrication. Le matériau déposé ne doit pas cristalliser lors des recuits, sous peine de former des joints de grain.

III.2.2 Les oxydes utilisés dans la simulation

1) le dioxyde de silicium ou quartz ou silice ou saphir

- Formule chimique : SiO_2
- Masse molaire : 60.08g/mol
- Densité : 2.65g/cm^3
- Point de fusion : 1600°C
- Point d'ébullition : 2230°C
- Indice de réfraction : $n=1.4655$ ($\lambda=1.68\mu\text{m}$)
- Coefficient d'extinction : ($k=0.0000$)
- Constante diélectrique relative =3.9
- Gap =9eV

2) l'oxyde d'aluminium ou alumine :

- Formule chimique : Al_2O_3
- Masse molaire : 101.96g/mol

- Densité : 3.95g/cm^3
- Point de fusion : 2072°C
- Point d'ébullition : 2977°C
- Indice de réfraction : $n=1.6216$ ($\lambda=1.54\mu\text{m}$)
- Coefficient d'extinction : ($k=0.00008$)
- Constante diélectrique relative =9.5
- Gap =8.8eV

3) l'oxyde d'hafnium

- Formule chimique : HfO_2
- Masse molaire : 210.49g/mol
- Densité: 9.68g/cm^3
- Point de fusion : 2758°C
- Point d'ébullition : 5400°C
- Indice de réfraction : $n=2.0711$ ($\lambda=1.54\mu\text{m}$)
- Constante diélectrique relative =25
- Gap =5.8eV

4) l'oxyde de titane

- Formule chimique : TiO_2
- Masse molaire : 79.866g/mol
- Densité : 4.23g/cm^3
- Point de fusion : 1843°C
- Point d'ébullition : 2972°C
- Indice de réfraction : $n=2.4335$ ($\lambda=1.538\mu\text{m}$)
- Coefficient d'extinction : ($k=0.0001$)
- Constante diélectrique relative =80
- Gap =3.5eV

Dans ce chapitre, nous avons vu que la couche antireflet en nitrure de silicium hydrogéné ($\text{SiN}_x:\text{H}$) déposé par PECVD constitue un moyen peu coûteux mais efficace pour réduire la

réflexion [57]. L'oxyde déposé sur la couche antireflet va agir comme une double couche anti reflet (DCAR) combinant deux matériaux : l'oxyde et le nitrure de silicium.

En vu d'améliorer les propriétés de passivation et de réflexion et donc d'augmenter le rendement de conversion des cellules solaires, on va établir les graphes d'absorption, de réflexion et de transmission.

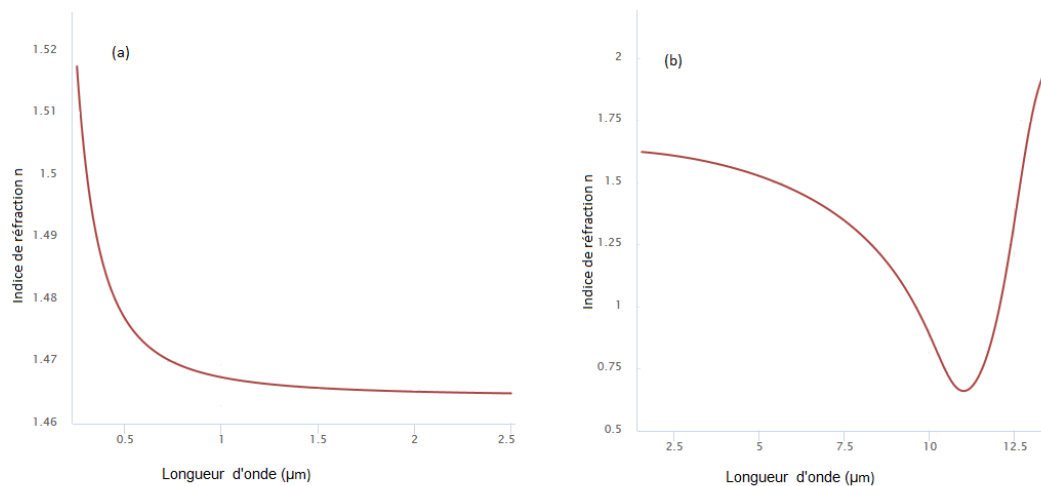
III.2.3 Propriétés optiques des oxydes utilisés

Les propriétés optiques d'un matériau recouvrent essentiellement son indice de réfraction et son coefficient d'absorption. Ces propriétés régissent le déplacement de la lumière dans le matériau.

L'indice de réfraction d'un matériau est défini par le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide C sur la vitesse de la lumière dans le matériau V [27] par la relation :

$$n = \frac{C}{V} \quad \text{EqIV-1}$$

La vitesse de la lumière dans un matériau n'est pas constante, elle varie avec la longueur d'onde. La figure ci-dessous représente les indices de réfraction des différents oxydes utilisés dans la simulation en fonction de la longueur d'onde.



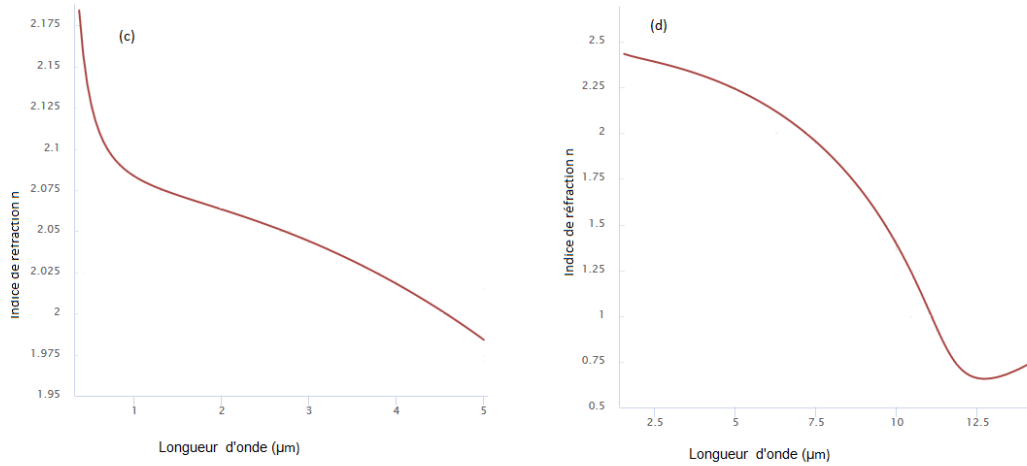


Figure II-20: Indices de réfraction des oxydes en fonction de la longueur d'onde
 (b) SiO2 (b) : Al2O3 (c) : HfO2 (d) : TiO2 (Courbes obtenues avec le programme Refractive index.info)

L'indice de réfraction intervient également dans la détermination des coefficients de réflexion et de transmission à travers la relation de Snell-Descartes [69]:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \tag{EqIV-2}$$

avec :

n_1 et n_2 sont les indices de réfraction de deux milieux différents

θ_1 et θ_2 sont les angles que font les rayons lumineux incident et réfracté (transmis) avec la normal.

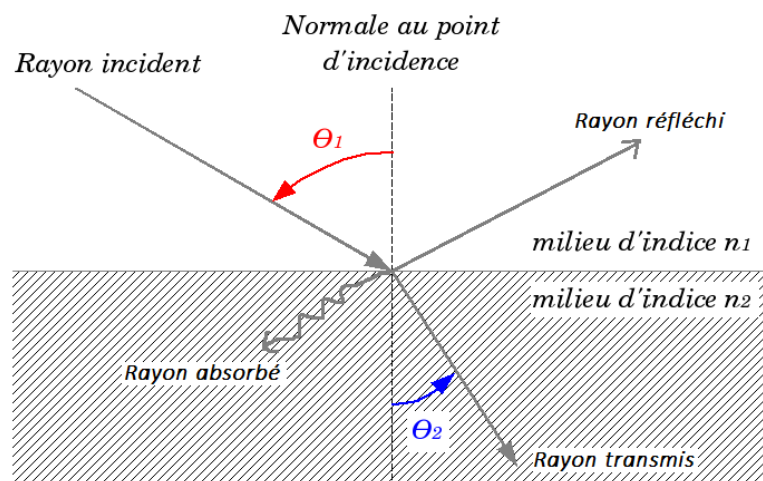


Figure II-21: Rayonnements réfléchi, transmis et absorbé [70]

Le rayon réfléchi est symétrique au rayon incident par rapport à la normale à la surface réfléchissante.

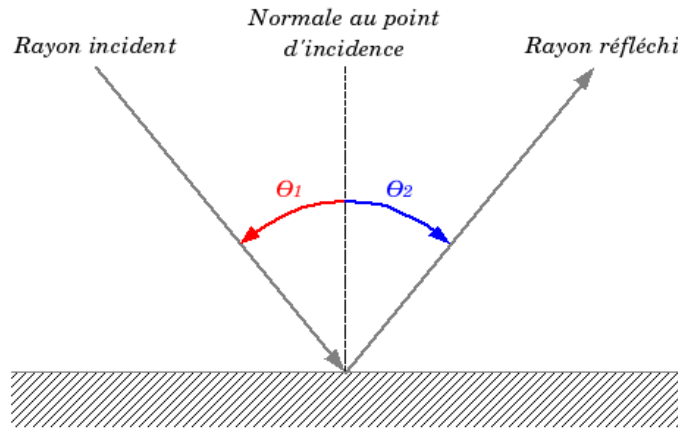


Figure II-22 : Loi de la réflexion [71]

Le coefficient de réflexion R (ou réflectivité) est défini comme le rapport de l'intensité réfléchie I_r sur l'intensité incidente I_i [72]

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad \text{Ou} \quad R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad \text{EqIV-3, IV-4}$$

Le coefficient de transmission T est défini comme le rapport de l'intensité transmise I_t sur l'intensité incidente I_i [73]

$$T = \frac{I_t}{I_i} \quad \text{Ou} \quad T = \frac{1 - R}{1 + R} \quad \text{EqIV-5, IV-6}$$

La permittivité relative d'un matériau ou constante diélectrique décrit la réponse d'un matériau à un champ électrique appliqué et est définie par [74] :

$$\epsilon_r = \chi \epsilon_0 \quad \text{EqIV-7}$$

avec χ est la susceptibilité électrique du matériau et ϵ_0 est la permittivité du vide ($=8,85 \cdot 10^{-12} \text{F.m}^{-1}$)

Lorsque le phénomène d'absorption a lieu dans un matériau, l'indice de réfraction a une composante complexe et est définie par :

$$\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) + iK(\lambda) \quad \text{EqIV-8}$$

où K est le coefficient d'atténuation appelé aussi coefficient d'extinction [75].

Si l'intensité incidente est prise comme étant égale à l'unité, nous avons alors la relation [57]:

$$R + T + A = 1 \quad \text{D'où} \quad A = 1 - R - T \quad \text{EqIV-9}$$

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons introduit la technologie industrielle utilisée pour la fabrication des cellules photovoltaïques type EWT depuis la production du silicium multi cristallin.

Nous avons, ensuite, expliqué le principe de fonctionnement de ce type de structures tout en insistant sur les points spécifiques à leur réalisation. Par la suite, leurs avantages et inconvénients ont été exposés.

Avant de terminer ce chapitre, nous avons énoncé les paramètres clés qui interviennent dans le calcul du rendement des cellules photovoltaïques type EWT. Ensuite, nous avons justifié le choix de la technique de métallisation qu'est la sérigraphie et qui est la technique la plus couramment utilisée pour la production de cellules solaires industrielles en raison de son faible coût, sa rapidité et sa facilité de mise en œuvre. Enfin, la passivation de surface - étape importante dans le processus de fabrication des cellules solaires- est utilisée en vue d'augmenter le rendement de conversion.

Bibliographie du chapitre II

- [1] F. Berthet, R. Brunet, C. D. L. Bunelaye, C. Fabron, C. Ville et E. Bicchi, *Performance des cellules photovoltaïques : une évolution vers les cellules à pérovskites est-elle possible ?*, Projet Scientifique d'Initiation à la Recherche, 2017.
- [2] Peter William Atkins, Loretta Jones, Leroy Laverman, *Principes de chimie*, De Boeck Supérieur, 4^{ème} édition, avril 2017
- [3] Vincent Gouysse, *Crise du système impérialiste Mondial*, août 2009, Première Edition
- [4] Anne Labouret, Michel Villos ; *Energie solaire photovoltaïque*, édition Dunod, Octobre 2009, collection Technique et ingénierie
- [5] B. Flèche - D. Delagnes, *Production d'énergie électrique : Energie Solaire Photovoltaïque*, Energie solaire photovoltaïque.doc, juin 2007 ;
http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2006/Toulouse/PV/A_Introduction_PV/Energie_solaire_photovoltaïque.pdf
- [6] Sarah Kurtz , Keith Emery ; *Conversion efficiencies of best research solar cells worldwide from 1976 through 2016 for various photovoltaic technologies*. Efficiencies determined by certified agencies/laboratories., National Renewable Energy Laboratory (NREL)
- [7] Thomas Mambrini, *Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies*, Université Paris-Sud, Décembre 2014, thèse de Doctorat
- [8] Le Portail de Statistiques, <https://fr.statista.com/statistiques/570477/principaux-pays-producteurs-de-silicium-2010/>
- [9] Cécile Miquel, *Systèmes Photovoltaïques: fabrication et impact environnemental*, Hespul- Energies Renouvelables et efficacité énergétique, 2009.
- [10] Fatoumata Bintou Santara, *Cristallisation du silicium photovoltaïque sous induction électromagnétique : étude d'une vanne de rétention et de la ségrégation sous brassage*, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010, Thèse de Doctorat
- [11] S. Rousseau, M. Benmansour, D. Morvan et J. Amouroux, *Purification du silicium de qualité métallurgique par plasma thermique RF couplé à la polarisation du bain fondu*, Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 53 – 60
- [12] photovoltaïque.info, *Les technologies de cellules solaires photovoltaïques*, <http://www.photovoltaïque.info/Les-technologies-de-cellules.html>, dernière mise à jour

décembre 2016

- [13] RAHMOUN Abdessamad, HABIBES Zoubir, *Dimensionnement D'une Installation Pv Hybride «Application A Un Systeme Raccorde Au Reseau»*, Université Abou bekr Belkaid de Tlemcen, Mémoire de Master II en Electronique, 2016
- [14] Amal Nadri, *Modélisation de la microstructure des grains dans le silicium multicristallin pour le photovoltaïque*, Université de Grenoble, 2012, Thèse de Doctorat
- [15] WaferPro, *About Silicon Wafers*, <http://www.waferpro.com/about-silicon-wafers/>, 2017.
- [16] F. KAPALA , J.-L. Vignes, G. André, *Données industrielles, économiques, géographiques sur les principaux produits chimiques, métaux et matériaux*, <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/acc.htm>, 2017.
- [17] Zouhair EL JOUAD, *Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques*, Université d'Angers sous le sceau de l'Université Bretagne Loire, 2016, *Thèse de Doctorat*
- [18] *La fabrication des cellules photovoltaïques*, http://www.photovoltaique.guidenr.fr/I_3_lingot-silicium-photovoltaïque.php
- [19] A. Ricaud, *Les convertisseurs photovoltaïques: Gisement solaire, cellules, modules et champ de modules*, European Master in Renewable Energy, 2011.
- [20] SETA ENERGIES, *La solution photovoltaïque de demain : le ruban de silicium mince* <http://www.solaire-photovoltaïque-pro.fr/infos/la-solution-photovoltaïque-de-demain-le-ruban-de-silicium-mince>
- [21] P Siffert , *Nouvelles techniques de réalisation de photopiles au silicium* - Revue de Physique Appliquée, 1979
- [22] H.J. Möller, C. Funke, D. Kreßner-Kiel, S. Würzner, *Growth optimization of multicrystalline silicon*, Energy Procedia. 3 (2011) 2–12.
- [23] W.-C. Li, D.-M. Tsai, *Automatic saw-mark detection in multicrystalline solar wafer images*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 95 (2011) 2206–2220.
- [24] M. Mautref, C. Lacroix, C. Belouet, C. Fages, B. Biotteau, F. Amoult, *Passivation par l'hydrogène de défauts recombinants dans les photopiles réalisées sur rubans de silicium polycristallin RAD*, Rev. Phys. Appliquée. 19 (1984) 333–342.
- [25] Amina TANDJAOU, *Solidification dirigée du silicium multi-cristallin pour les applications photovoltaïques : caractérisation in situ et en temps réel par imagerie X synchrotron*, Aix-Marseille Université, 2013, Thèse de Doctorat

- [26] M. Mansoura, «*Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs)*,» Thèse de Magister, Université Mohamed Khider-Biskra, 2012.
- [27] H. Benson, «*Physique III: Ondes, optique, et physique moderne*,» de Boeck supérieur, Vol3, 2016.
- [28] P. PAPET, *Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium cristallin*, Thèse de doctorat, 2007.
- [29] J. Gee, P. Kumar et J. H. a. D. Tanner, *Development of industrial high-efficiency back-contact czochralski-silicon solar cells*, 19 (7): 887 - 893: Progress in Photovoltaics Research and Applications, 2011.
- [30] Jeyakumar Ramanujam et al, *Inorganic photovoltaics – Planar and nanostructured devices*, Volume 82, Pages 294-404: Progress in Materials Science, September 2016.
- [31] C. Ulzhöfer, S. Hermann, Nils Harder, Pietro P. Altermatt et al, *The VIRE effect: via-resistance-induced recombination enhancement - The origin of reduced fill factors of emitter wrap through solar cells*, European Photovoltaic Solar Energy Conference, Volume: 24, September 2009
- [32] Dib Wassila née Kazi-Tani, *Modélisation Des Structures Photovoltaïques : Aspects Fondamentaux Et Appliqués*, Université Abou Bakr Belkaïd Tlemcen: Thèse de Doctorat, 2010.
- [33] N.-P. Harder, S. Hermann, A. Merkle, T. Neubert, T. Brendemühl, P. Engelhart, R. Meyer et R. Brendel, *Laser-processed high-efficiency silicon RISE-EWT solar cells and characterisation*, Physica Status Solidi, 2009.
- [34] Z. M. W. Xiaodong Wang, *High-Efficiency Solar Cells: Physics, Materials, and Devices*, Springer.
- [35] Cédric Mas, *Modélisation physique du procédé de découpe de métaux par laser*, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2003, Thèse de Doctorat
- [36] Fraunhofer - Institut für Solare Energiesysteme (ISE), *Laser Applications for Photovoltaics Crystalline and Thin Film Technologies*, Jenoptik Lasers & Material Processing
- [37] G. Poulain, *Procédés laser pour la réalisation de cellules photovoltaïques en silicium à haut rendement*, Thèse de Doctorat: INSA de Lyon, 2014.
- [38] A.Chovet et P.Masson, *Physique des semi-conducteurs*, Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille: Département Micro-électronique et Télécommunications, 2004/2005.

- [39] F. Lévy, *Physique et Technologie des Semiconducteurs*, Presses Polytechnique et Universitaires Romandes, 1995.
- [40] H. Moulin, *Etude Et Caracterisation De Materiaux Semi-Conducteurs En Vue De Leurs Applications A La Detection De Rayonnements Ionisants*, Université Joseph Fourier GrenobleI, 1989.
- [41] Yassine SAYAD, *Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière matière*, l'Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon, 2009, Thèse de Doctorat
- [42] *Technique De La Sérigraphie*, Fiche Métiers De L'impression, Sérigraphie, Version Juin 2007
- [43] Caroline Boulord, *Développement de techniques de métallisation innovantes pour cellules photovoltaïques à haut rendement*, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2011, Thèse de Doctorat
- [44] Norchene JEMAI, *Développement De La Technique De Sérigraphie Pour La Formation De Billes De Connexions Inferieures A 100µm Pour L'assemblage 3D : Optimisation Et Etude De Fiabilité*, Université de Toulouse, 2010, Thèse de Doctorat
- [45] Béatrice Rivière, *Optimisation du procédé de sérigraphie pour la réalisation de capteurs de gaz en couche épaisse. Etude de la compatibilité avec la technologie Micro-électronique*, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2004, Thèse de Doctorat
- [46] Thibault Reynier, *Elaboration par cofrittage d'une cellule de pile à combustible SOFC à base de zircone scandiée: approches mécanique, microstructurale et électrochimique*, L'université De Grenoble, 2012, Thèse de Doctorat
- [47] Romain MAGNIER, *Etude Et Optimisation De L'imprimabilité De Films PVC Produits Par Calandrage Et Enduction*, École nationale supérieure des mines de Paris, 2015, Thèse de Doctorat
- [48] Serge Renoud, *Cours complet de sérigraphie-Le séchage*, 1999
- [49] Asmaa BOUYELFANE, *Optimisation de la métallisation des cellules solaires conventionnelles à base de Silicium multi cristallin*, 2015, Thèse de Doctorat
- [50] Nadim Alayli, A. Girard, F. Schoenstein, Pierre-Richard Dahoo, K.L. Tan, et al. *Etude du frittage de particules d'argent pour la connexion dans un système électronique de puissance*, Matériaux 2010, 18-22 Octobre 2010, Nantes, France.
- [51] A. Bouyelfane et A. Zerga, *Effet de la résistance carrée de l'émetteur diffusé POCl3 et de la largeur des doigts sérigraphiés d'une cellule solaire conventionnelle au mc-Si*, Journal of Scientific Research, Vol. 1, N°0, 2010.

- [52] Bruno Thuillier, *Caracterisation Structurale Des Contacts Ohmiques Realises A Partir D'encres Metalliques Sur Cellules Photovoltaïques En Silicium Multicristallin*, Institut National Des Sciences Appliquees De Lyon, 2001, Thèse de Doctorat
- [53] N. Oleksiy, *Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités*, Thèse de Doctorat, 2005.
- [54] Laboratoire PROMES (CNRS) Procédés, Matériaux Et Énergie Solaire, *Caractérisation des propriétés photovoltaïques-Caractérisation des propriétés photovoltaïques*
- [55] Alice Defresne, *Amélioration de la passivation de cellules solaires de silicium à hétérojonction grâce à l'implantation ionique et aux recuits thermiques*, Université Paris-Saclay, 2016, Thèse de Doctorat
- [56] Francis Lévy, *Traité des Matériaux Physique et technologie des semi-conducteurs*, presses polytechniques et universitaires Romandes, 1995
- [57] N. SAHOUANE, *Elaboration, Modélisation et Caractérisation des Cellules Solaires de type IIIème Génération dotées de Couches Antireflets à Indice Graduel*, Université Abou Bekr Belkaïd: Thèse de Doctorat, 2016
- [58] C. Janot et B. Ilschner, *Matériaux émergents*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2001
- [59] Ahcene SIAD, *Etude numérique et expérimentale de la croissance de couches minces déposées par pulvérisation réactive*, ParisTech, 2016, Thèse de Doctorat
- [60] Amanda Thouvenin. *Dépôt et caractérisation de couches minces de SiC_xNy.H par CVD assistée par plasma micro-ondes ECR avec précurseurs organosiliciés*, Université de Lorraine, 2016, Thèse de Doctorat
- [61] Centre d'Ingénierie en Traitements et Revêtements de surface Avancés (CITRA), *Dépôts CVD*
<http://www.citra-limousin.com/les-traitements-de-surface/les-depots-sous-vide/depots-cvd/>
- [62] Anthony GRUNENWALD, *Dépôt et caractérisation de couches minces diélectriques poreuses à porosité ordonnée obtenues par voies sol-gel et plasma*, 2011, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier, Thèse de Doctorat
- [63] Emmanuel DEFAÏ, *Elaboration et caractérisation de couches minces piézoélectriques de Pb(Zr,Ti)O₃ sur silicium pour applications aux microsystèmes*, Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon, 2009, Thèse de Doctorat

- [64] S. Matzen, *Techniques de dépôt de couches minces*, Université Paris-Sud / CNRS, 2017
https://www.fun-mooc.fr/c4x/UPSUD/42003/asset/Cours_2-2a.pdf
- [65] Mireille LONTSI FOMENA, *Etude Theorique De La Diffusion De L'oxygène Dans Des Oxydes Diélectriques*, Université Bordeaux 1, 2008, Thèse de Doctorat
- [66] Vincent EDON, *Dépôt d'oxydes de grille par pulvérisation cathodique magnétron : corrélation entre les propriétés du plasma et celles des films déposés*, Université Paris-Sud, 2007, Thèse de Doctorat
- [67] Théodore NGUYEN, *Caractérisation, modélisation et fiabilité des diélectriques de grille à base de HfO₂ pour les futures technologies CMOS*, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2009, Thèse de Doctorat
- [68] P. Peacock et J. Robertson, *Band offsets and Schottky barrier heights of high dielectric constant oxides*, J.Appl.Phys.92,4712, 2002.
- [69] H. Sazdjian, *ONDES-Cordes vibrantes, ondes sonores, ondes optiques*, Université Paris-Sud 11, 2012/2013
- [70] Techno-Science.net, *Réfraction Approche géométrique : Loi de Snell-Descartes*
<http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=6775>
- [71] Claire König, Futura Sciences, *Dossier - La couleur et ses mystères. Qu'est-ce qu'une couleur?*, 2016
<http://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-couleur-mysteres-757/page/2/>
- [72] Maxime BAYLE, *Architectures plasmoniques enterrées : élaboration, propriétés optiques et applications*, Université De Toulouse, 2014, Thèse de Doctorat
- [73] Richard Taillet, *Optique physique-Propagation de la lumière*, De Boeck supérieur, 2^{ème} édition, 2015
- [74] *Cours d'Optique et Physique des Ondes Partie 4: Ondes Electromagnétiques Dans Les Milieux*, Université Paris 7, 2016/2017
http://www.ipgp.fr/~grandin/Raphael_Grandin_personal_web_page/Teaching_files/4_milieux.pdf
- [75] Pascal Febvre, Richard Taillet, Loïc Villain, *Dictionnaire de physique*, De Boeck Supérieur, 18 févr. 2013

Chapitre III

Les modèles utilisés pour la simulation

Introduction

I- Les méthodes utilisées pour la simulation sous ATLAS/SILVACO

II- Les modèles physiques utilisés pour la simulation sous ATLAS/SILVACO

II.1 Les modèles de dérive-diffusion

II.1.1 La diffusion

II.1.2 La dérive (Drift)

II.2 Modèles de mobilités

II.2.1 Modèle de mobilité dépendant de la concentration en impuretés

II.2.2 Modèle de la vitesse de saturation des porteurs

II.3 La densité effective (Bandgap Narrowing)

II.4 Les modèles de recombinaison utilisés pour la simulation sous ATLAS/SILVACO

II.4.1 Recombinaison Shockley Read Hall

II.4.2 Recombinaison Auger

II.4.3 Recombinaison en surface

II.5 Les durées de vie effectives

II.6 Les contacts utilisés pour la simulation sous Atlas/Silvaco

II- Génération optique

III-1. Modélisation du faisceau optique incident

III.2 Spécification des réflexions

III.2.1 Réflexion arrière

III.2.2 Réflexion des parois latérales

III.2.3 Les couches antireflets

Conclusion

Liste des figures du chapitre III

Figure III-1 : Réflexion et réfraction de la lumière

Figure III-2 : Schéma d'une fenêtre d'illumination telle que définie par Atlas

Liste des tableaux du chapitre III

Tableau III-1 : Quelques modèles de mobilité utilisés dans Atlas

Tableau III-2 : Mobilité des électrons et des trous dans le silicium à $T=300K$

Tableau III-3: Paramètres utilisés par défaut dans Atlas pour le modèle de la vitesse de saturation des porteurs

Tableau III-4 : Paramètres par défaut du modèle de recombinaison SRH dans Atlas

Tableau III-5 : Paramètres par défaut du modèle de recombinaison AUGER dans Atlas

Tableau III-6 : Paramètres par défaut du modèle de la recombinaison en surface dans Atlas

Tableau III-7: Paramètres de contacts spécifiés dans Atlas

Introduction

Dans le but d'économiser le temps et le coût de développement, et pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs électriques, des simulateurs TCAD (de l'anglais « *Technology Computer Aided Design* ») (branche de la CAO : Conception Assistée par Ordinateur) électroniques tels que SILVACO, ISE, SYNOPSIS... permettent la modélisation du comportement physique et électrique d'un composant électronique.

Le logiciel ATLAS appartient à la famille de logiciels Silvaco, de la société Américaine « Silvaco International » ayant son siège social à Santa Clara [1]. Cette société est un fournisseur de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique. Ces outils sont utilisés par les compagnies de microélectronique pour la recherche, le développement et la conception de dispositifs à base de semi-conducteurs.

Le logiciel Atlas de Silvaco satisfait à l'exigence de pouvoir travailler en deux dimensions (et même à trois) et donc a été utilisé pour ce travail. Dans ce chapitre, nous présenterons les méthodes, et modèles physiques utilisés pour la simulation du comportement électrique de la cellule EWT à base de silicium multi cristallin.

I- Les méthodes utilisées pour la simulation sous ATLAS/SILVACO

Plusieurs méthodes numériques sont utilisées pour trouver des solutions aux problèmes liés aux dispositifs à semi-conducteurs. Elles doivent être spécifiées dans « method » dans le programme.

Atlas combine trois méthodes pour résoudre le système d'équations suivant [1] :

- L'équation de Poisson qui s'exprime par :

$$\nabla \varepsilon \nabla \Psi = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad \text{EqIII-1}$$

Où : ε est la permittivité électrique ; Ψ est le potentiel électrostatique ; q est la charge élémentaire ; n et p sont les densités des électrons et des trous et N_D^+ et N_A^- sont les nombres d'impuretés ionisés.

- L'équation de continuité qui s'exprime par :

Pour les électrons :

$$\nabla \vec{J}_n = qR_n + q \frac{\partial n}{\partial t} - qG_n \quad \text{EqIII-2}$$

Pour les trous :

$$-\nabla \vec{J}_p = qR_p + q \frac{\partial p}{\partial t} - qG_p \quad \text{EqIII-3}$$

Où R est le taux de recombinaison électron-trou ; G est le taux de génération électron-trou ; et j_n et j_p sont les densités de courant des électrons et des trous calculées à partir du modèle de dérive-diffusion où :

$$j_p = -pq\mu_p \nabla \Phi_p \quad \text{EqIII-4}$$

$$j_n = -nq\mu_n \nabla \Phi_n \quad \text{EqIII-5}$$

Où μ_n et μ_p représentent respectivement les mobilités des électrons et des trous et Φ_n et Φ_p sont les quasi-niveaux de Fermi.

Les méthodes sont les suivantes : la méthode GUMMEL (équations découplées), la méthode NEWTON (équations couplées) et la méthode BLOCK [1]

- La méthode Newton résout tout le système en considérant toutes les inconnues simultanément.
- La méthode Gummel résout le système en faisant varier chaque inconnue tout en gardant les autres inconnues constantes, répétant ainsi le processus jusqu'à ce qu'une solution stable soit trouvée. Autrement dit, elle consiste à découpler en trois sous-systèmes le système global décrit précédemment : Les trois équations sont résolues itérativement les unes après les autres jusqu'à atteindre la convergence totale des solutions.

L'intérêt potentiel de cette méthode par rapport à celle de Newton réside dans la réduction des dimensions des systèmes matriciels à résoudre, ce qui permet, à priori, de diminuer le temps de calcul.

- La méthode Block résout certaines équations couplées (avec la méthode Newton) tandis que d'autres sont découplées (avec la méthode Gummel).

Généralement, la méthode Gummel est utilisée quand le système d'équations est faiblement couplé mais a une convergence linéaire. La méthode Newton, quant à elle, est utilisée quand le système d'équations est fortement couplé et a une convergence quadratique.

Dans ce travail, la méthode utilisée est la méthode Newton. Elle est introduite en spécifiant : « METHOD NEWTON »

II- Les modèles physiques utilisés pour la simulation sous ATLAS/SILVACO

II.1 Les modèles de dérive-diffusion

II.1.1 La diffusion

Les courants de diffusion sont générés par l'existence d'une concentration non uniforme des électrons ou des trous dans le semi conducteur. Il est nettement plus probable qu'une charge d'une zone de concentration élevée se déplace vers une zone de basse concentration que l'inverse. Ce phénomène de diffusion est décrit par la première loi de Fick [2] qui montre la relation entre le flux de particules \vec{F} et le gradient de leur concentration $\vec{\nabla}C$ selon la relation :

$$\vec{F} = -D\vec{\nabla}C \quad \text{EqIII-6}$$

Le coefficient de proportionnalité D s'appelle coefficient de diffusion.

Les densités de courant de diffusion sont alors :

$$\overrightarrow{J_{n,diff}} = -q\overrightarrow{F_n} = qD_n\overrightarrow{\nabla}n \quad \text{EqIII-7}$$

$$\overrightarrow{J_{p,diff}} = +q\overrightarrow{F_p} = -qD_p\overrightarrow{\nabla}p \quad \text{EqIII-8}$$

D_n et D_p sont les coefficients d'Einstein et ont pour expressions :

$$D_n = \frac{kT}{q}\mu_n \quad \text{EqIII-9}$$

$$D_p = \frac{kT}{q}\mu_p \quad \text{EqIII-10}$$

II.1.2 La dérive (Drift)

En présence d'un champ électrique, le porteur de charge est accéléré entre deux collisions aléatoires. La direction est donnée par le champ électrique et génère un déplacement moyen avec une vitesse donnée pour les électrons et les trous par [3]:

$$\vec{v}_n = -\mu_n \vec{E} \quad \text{EqIII-11}$$

$$\vec{v}_p = \mu_p \vec{E} \quad \text{EqIII-12}$$

Dans les mêmes conditions de champ, les vitesses des électrons sont plus [40]grandes que celle des trous. Donc nous avons beaucoup plus de chance de collecter des électrons que des trous.

Le courant de dérive est donné par :

$$\overrightarrow{J_{n,drift}} = -qn\vec{v}_n \quad \text{EqIII-13}$$

$$\overrightarrow{J_{p,drift}} = qp\vec{v}_p \quad \text{EqIII-14}$$

II.2 Modèles de mobilités

La mobilité des porteurs est une notion physique qui relie la vitesse du porteur de charge au champ électrique qu'il subit.

Les électrons et les trous sont accélérés par les champs électriques auxquels ils sont soumis mais perdent de leur quantité de mouvement en raison des processus de diffusion. Ces derniers incluent les vibrations du réseau (phonons), les impuretés, les surfaces et les imperfections du matériau. De ce fait, les mobilités sont fonction du champ électrique local, de la température du réseau, du niveau de dopage, etc...

Les modèles les plus utilisés (mais pas les seuls) dans Atlas sont regroupés dans le tableau ci-dessous [1], [3]:

Modèle	Syntaxe	Champ d'application	Explications succinctes
« Concentration-dependent low-field »= modèle de mobilité dépendant de la concentration en impuretés	<u>CONMOB</u>	Faible champ électrique	Valide à la température de 300 K
« Concentration , temperature-dependent analytical model »= modèle de mobilité dépendant de la concentration et de la température	ANALYTIC	Faible champ électrique	Formules de Caughey-Thomas, valide entre 77 et 450K
« Masetti model »= modèle de Masetti	MASETTI	Faible champ électrique	Dépend de la concentration en impuretés, à température ambiante
« Saturation velocity model »=modèle de la vitesse de saturation des porteurs	<u>FLDMOB</u>	Champ électrique parallèle (longitudinal)	Au-delà d'un champ de 10^5 V/cm, la mobilité des porteurs décroît et les porteurs libres atteignent une vitesse limite appelée vitesse de saturation
« Lombardi model »= modèle de Lombardi	CVT	Couche inversée	La mobilité dépend du champ électrique transverse, du dopage et de la température
« Yamaguchi model »= modèle de Yamaguchi	YAMAGUCHI	Couche inversée	La mobilité dépend du champ électrique transverse et de la concentration en impuretés

Tableau III-1 : Quelques modèles de mobilité utilisés dans Atlas

Dans notre travail, nous avons utilisé les modèles « CONMOB » et « FLDMOB »

II.2.1 Modèle de mobilité dépendant de la concentration en impuretés :

A cause des collisions des porteurs avec les atomes du dopant, et au fur et à mesure que le niveau de dopage augmente, la mobilité des porteurs diminue (à température ambiante) [4]. Atlas utilise le tableau ci-dessous si la commande « CONMOB » est spécifiée dans « MODELS »

Concentration (cm ⁻³)	Mobilité (cm ² /V.s)	
	Electrons	Trous
1.10 ¹⁴	1350.0	495.0
6.10 ¹⁴	1320.0	495.0
1.10 ¹⁵	1300.0	491.1
6.10 ¹⁵	1156.0	473.3
1.10 ¹⁶	1076.0	460.9
6.10 ¹⁶	760.0	369.2
1.10 ¹⁷	675.0	331.5
6.10 ¹⁷	321.0	210.3
1.10 ¹⁸	252.0	178.0
6.10 ¹⁸	113.6	74.5
1.10 ¹⁹	90.5	61.0
6.10 ¹⁹	78.8	52.9
1.10 ²⁰	67.8	52.0
6.10 ²⁰	23.6	48.9
1.10 ²¹	17.8	48.0

Tableau III-2 : Mobilité des électrons et des trous dans le silicium à T=300K

II.2.2 Modèle de la vitesse de saturation des porteurs :

Lorsque les champs électriques appliqués sont faibles, la mobilité pour les porteurs majoritaires est indépendante du champ : la vitesse moyenne de dérive des porteurs est donné par :

$$V = \mu_0 E \quad \text{EqIII-15}$$

Lorsque les porteurs sont soumis à des champs électriques intenses ($>10^3$ V/cm), la mobilité n'est plus indépendante du champ et diminue avec l'augmentation de l'intensité du champ électrique [4]. Dès que le champ électrique dépasse 10^5 V/cm d'intensité, la mobilité moyenne des porteurs décroît et la vitesse de dérive –appelée vitesse de saturation notée V_{sat} - est constante ; les porteurs ont donc atteint leur vitesse limite.

Dans le silicium, la vitesse de saturation est donnée en fonction de la température par la formule :

$$V_{sat} = \frac{V_1}{1 + C \exp\left(\frac{T}{T_0}\right)} \quad \text{EqIII-16}$$

Où $T_0=600$ K ; $C=0.8$ et $V_1= 2,4.10^7$ cm/s

Ce phénomène -considéré comme une dégradation de la mobilité dans un champ électrique intense- est décrit dans Atlas par l'équation empirique :

$$\mu(E) = \frac{\mu_0}{\left[1 + \left(\frac{\mu_0}{V_{sat}} E\right)\right]^{\frac{1}{\beta}}} \quad \text{EqIII-17}$$

Où μ_0 est la mobilité dans un champ électrique faible et β est un coefficient sans dimension.

Le tableau ci-après indique les paramètres utilisés par défaut dans Atlas pour ce modèle de mobilité.

	V_{sat} (cm/s)	β
Electrons	10^7	1.109
Trous	8.10^6	1.213

Tableau III-3: Paramètres utilisés par défaut dans Atlas pour le modèle de la vitesse de saturation des porteurs

Pour activer ce modèle, il faut spécifier « FLDMOB » dans « MODELS »

II.3 La densité effective (Bandgap Narrowing)

Pour des semi conducteurs fortement dopés, l'expérience a montré que le produit p.n dans le silicium devient dépendant du niveau de dopage. Tandis que le dopage augmente, une diminution de la bande interdite se produit à cause de l'apparition d'états supplémentaires dans la bande interdite. Dans Atlas, ce phénomène est décrit par l'équation suivante :

$$n_{ie}^2 = n_i^2 \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \quad \text{EqIII-18}$$

Où ΔE_g est la diminution de la bande interdite dont l'expression est donnée par le modèle de De Graaf et Slotboom par :

$$\Delta E_g = BGN.E \left\{ \ln \frac{N}{BGN.N} + \left[\left(\ln \frac{N}{BGN.N} \right)^2 + BGN.C \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad \text{EqIII-19}$$

Les valeurs de BGN.E, BGN.N et BGN.C sont respectivement 9.10^{-3}V , 10^{17}cm^{-3} et 0.5 [1].

Pour activer ce modèle, il faut spécifier « BGN » dans « MODELS »

II.4 Les modèles de recombinaison utilisés pour la simulation sous ATLAS/SILVACO

La précision des calculs lors de la simulation numérique dépend vigoureusement du choix des modèles physiques utilisés pour décrire le fonctionnement des cellules solaires en général. Dans le cas des cellules solaires interdigitées, les modèles utilisés sont [3],[5],[6],[7] :

- Recombinaison Shockley Read Hall, recombinaison Auger et recombinaison en surface
- Les formules de Fresnel pour le passage de la lumière au travers des interfaces
- Pas d'ionisation par impact
- Pas d'effet quantique

II.4.1 Recombinaison Shockley Read Hall :

Aujourd'hui, pour décrire les processus de recombinaison des porteurs excédentaires via les niveaux énergétiques dans la bande interdite du semi-conducteur, la théorie de Shockley Read Hall paraît la plus appropriée. Dans Atlas, la recombinaison Shockley Read Hall est modélisée comme suit :

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_{ie}^2}{TAUPO \left[n + n_{ie} \exp\left(\frac{ETRAP}{kT}\right) \right] + TAUNO \left[p + n_{ie} \exp\left(-\frac{ETRAP}{kT}\right) \right]} \quad \text{EqIII-20}$$

Où ETRAP est la différence entre la position énergétique des états pièges et le niveau de Fermi dans le semi-conducteur intrinsèque ; k la constante de Boltzmann ; T la température en Kelvins ; TAUNO et TAUPO les durées de vie respectivement des électrons et des trous

Ce modèle est activé en utilisant l'instruction « SRH » dans « MODELS »

Le tableau suivant comprend les valeurs par défaut des durées de vie TAUN0 et TAUP0 dans le silicium.

	Paramètres	Valeurs par défaut	Unités
	ETRAP	0	eV
électrons	TAUN0	1×10^{-7}	s
trous	TAUP0	1×10^{-7}	s

Tableau III-4 : Paramètres par défaut du modèle de recombinaison SRH dans Atlas

II.4.2 Recombinaison Auger

La recombinaison Auger se produit lorsque l'énergie de recombinaison d'une paire électron-trou est transmise à un autre électron.

Le taux de recombinaison Auger est donné par l'expression suivante :

$$R_{Auger} = AUGN(pn^2 - nn_{ie}^2) + AUGP(np^2 - pn_{ie}^2) \quad \text{EqIII-21}$$

Où les paramètres AUGN et AUGP sont prédéfinis.

Ce modèle est activé en utilisant l'instruction « AUGER » dans « MODELS »

Le tableau suivant comprend les valeurs par défaut des paramètres AUGN et AUGP dans le silicium

	Paramètres	Valeurs par défaut	Unités
silicium	AUGN	8.3×10^{-32}	cm^6/s
silicium	AUGP	1.8×10^{-32}	cm^6/s

Tableau III-5 : Paramètres par défaut du modèle de recombinaison AUGER dans Atlas

II.4.3 Recombinaison en surface

En plus de la génération-recombinaison dans le volume du semi-conducteur, les électrons et les trous peuvent se recombiner ou se régénérer aux interfaces. Le taux de recombinaison en surface est donné par :

$$R_{surf} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\tau_p^{eff} \left[n + n_{ie} \exp\left(\frac{ETRAP}{kT}\right) \right] + \tau_n^{eff} \left[p + n_{ie} \exp\left(\frac{ETRAP}{kT}\right) \right]} \quad \text{EqIII-22}$$

Où :

$$\frac{1}{\tau_n^{eff}} = \frac{1}{\tau_n^i} + \frac{d_i}{A_i} S.N \quad \text{EqIII-23}$$

Et

$$\frac{1}{\tau_p^{eff}} = \frac{1}{\tau_p^i} + \frac{d_i}{A_i} S.P \quad \text{EqIII-24}$$

τ_n^i et τ_p^i sont les durées de vie calculées au nœud i ; d_i et A_i sont la largeur et la surface de l'interface au nœud i ; S.N et S.P sont les vitesses de recombinaison respectivement des électrons et des trous

Ce modèle est activé en introduisant les vitesses de recombinaison « s.n » et « s.p » dans « INTERFACES »

	paramètres	Valeurs par défaut	unités
interface	S.N	0	cm/s
interface	S.P	0	cm/s

Tableau III-6 : Paramètres par défaut du modèle de la recombinaison en surface dans Atlas

II.5 Les durées de vie effectives

Dans une cellule solaire, les expressions des durées de vie des porteurs dépendent du taux d'injection Δn ; ce dernier étant totalement lié à la puissance lumineuse reçue par la face avant de la cellule [8].

Afin de mieux connaître l'effet de chaque type de recombinaison et du taux d'injection, il est important de différencier deux cas :

- la haute injection (HI) définie par la condition $\Delta n \gg p_0$
- la faible injection (FI) définie par la condition $\Delta n \ll p_0$.

où p_0 est la concentration des porteurs majoritaires de charge à l'équilibre dans le semi conducteur.

pour un silicium de type p, on a alors :

$$\tau_{rad,HI} = \frac{1}{B\Delta n} \quad \tau_{rad,FI} = \frac{1}{Bp_0} \quad \text{EqIII-25}$$

Où

B est un coefficient de recombinaison radiative et qui est fonction de l'énergie du photon et de la température (par exemple à T=300K et pour le silicium cristallin $B=4,73 \cdot 10^{-15} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ [9]).

$$\tau_{Auger,HI} = \frac{1}{(C_p + C_n)\Delta n^2} \quad \tau_{Auger,FI} = \frac{1}{c_p p_0^2} \quad \text{EqIII-26}$$

Et

$$\tau_{SRH,HI} = \tau_{n_0} + \tau_{p_0} \quad \tau_{SRH,FI} = \tau_{n_0} \quad \text{EqIII-27}$$

Cette simplification permet de voir l'impact de chaque type de recombinaison et du taux d'injection. Ainsi, sous les hautes (fortes) injections, les recombinaisons Auger et radiatives sont prépondérantes ; par contre sous les faibles injections, ce sont les recombinaisons SRH qui sont prédominantes.

L'ensemble des durées de vie permet de définir une durée de vie effective exprimée par :

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} \quad \text{EqIII-28}$$

La durée de vie effective des porteurs de charges renseigne sur l'efficacité d'une cellule solaire : plus cette durée de vie est grande plus la probabilité de récolter un porteur photo créé par les électrodes de contacts sera importante et donc le rendement de conversion de la cellule sera augmenté [2].

II.6 Les contacts utilisés pour la simulation sous Atlas/Silvaco

La résolution du système des équations de base-étant un système des équations différentielles- ne peut se faire que si nous connaissons les conditions aux limites. Mais la difficulté majeure réside dans l'établissement des bonnes conditions aux limites. En effet, et dans un modèle bidimensionnel, le système n'est complètement résolu que si les trois variables d'état : ψ , E_{Fn} et E_{Fp} définissant l'état du dispositif sont connues en un point de coordonnées (x, y) . La résolution commence donc par l'hypothèse que le système est à l'équilibre thermodynamique, c'est à dire que le niveau de Fermi est constant en fonction de la position. Ainsi les trois équations à résoudre (équation de Poisson et les deux équations de continuité) sont réduites à une seule, l'équation de Poisson où la seule inconnue est ψ . Pour pouvoir trouver ψ il nous faut les conditions aux limites. Cette solution définit l'état initial pour les calculs hors

équilibre thermodynamique. Mais, cette fois-ci nous travaillons avec les trois variables d'état ψ , E_{Fn} et E_{Fp} , donc, il est nécessaire d'avoir six conditions aux limites ; deux seront celles correspondant à ψ , et quatre, à celles pour E_{Fn} et E_{Fp} . Elles seront définies par la contrainte que les courants des électrons et des trous doivent passer les contacts soit par émission thermoïonique soit par recombinaison à l'interface.

Un problème majeur de la physique aux limites concerne l'interaction entre un type de matériau (par exemple un métal) et un autre (par exemple un semi conducteur : le silicium dans notre cas), pour le déplacement des porteurs.

Un contact Ohmique est une région d'un semi-conducteur qui a été conçue de telle façon que la caractéristique courant-tension (I-V) du dispositif soit linéaire et symétrique. Si la caractéristique I-V n'est pas linéaire et symétrique, le contact est appelé contact Schottky. Comme dans nos simulations, nous avons travaillé avec des contacts Schottky, nous allons présenter ce type de contacts.

Un métal déposé sur un semi-conducteur (dopé ou pas) forme une barrière surfacique similaire à celle d'une jonction PN. Les métaux sont différents des semi-conducteurs par le fait que leur bande de conduction est partiellement remplie d'électrons, donc la bande de valence recouvre partiellement la bande de conduction. Ainsi le niveau de Fermi est localisé dans la bande de conduction.

Un métal est caractérisé par son travail de sortie $q\phi_m$, qui représente l'énergie nécessaire pour extraire un électron du niveau de Fermi jusqu'au niveau énergétique du vide $q\psi$. Dans un semi-conducteur un tel travail de sortie existe aussi et sera alors noté $q\phi_s$ [10].

L'énergie nécessaire pour extraire un électron de la bande de conduction jusqu'au niveau du vide s'appelle affinité électronique notée $q\chi$ qui est la différence d'énergie entre le plus bas niveau de la bande de conduction et le niveau du vide.

Dans Atlas, si on ne spécifie pas le travail de sortie, les contacts sont considérés comme ohmiques quel que soit le matériau. Pour spécifier un contact Schottky, on spécifie le travail de sortie à l'aide du paramètre « WORKFUN » de l'instruction « CONTACT ». Le potentiel de surface du contact Schottky est donné par:

$$\psi_s = AFFINITY + \frac{E_g}{2q} + \frac{kT_L}{2q} \ln\left(\frac{N_c}{N_v}\right) - WORKFUN + V_{applied} \quad \text{Eq III-29}$$

où AFFINITY est l'affinité électronique du matériau semi-conducteur, E_g est la bande interdite, N_c est la densité d'états de la bande de conduction, N_v est la densité d'états de la

bande de valence et T_L est la température ambiante. En pratique, le travail de sortie est défini comme:

$$\text{WORKFUN} = \text{AFFINITY} + \phi_B \quad \text{Eq III-30}$$

où ϕ_B est la hauteur de la barrière à l'interface métal/semi-conducteur exprimé en eV. Par exemple, si le contact Schottky était en aluminium avec une différence de travail au silicium de 4,2 eV et une hauteur de barrière de 0,7 eV, alors on définit le contact Schottky avec l'énoncé:

$$\text{NOM DE CONTACT} = \text{GATE WORKFUN} = 4.9$$

	Paramètre	Unité
Contact	WORKFUN	eV
Matériau	AFFINITY	eV

Tableau III-7: Paramètres de contacts spécifiés dans Atlas

III- Génération optique

Sous l'effet de la lumière [5], des porteurs de charge peuvent être générés dans le semi-conducteur par des transitions d'une bande à l'autre (cas des semi-conducteurs intrinsèques) ou par des transitions qui impliquent des états dans le gap (cas des semi-conducteurs extrinsèques).

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque sous lumière est d'appliquer à l'instant initial, une source incidente constante et uniforme de lumière de puissance P qui fournit un nombre de photos n_0 tel que [11],[12] :

$$n_0 = p/h\nu \quad \text{EqIII-31}$$

Comme nous l'avons déjà vu, les propriétés optiques d'un matériau recouvrent essentiellement son indice de réfraction et son coefficient d'absorption. Ces propriétés régissent le déplacement de la lumière dans le matériau.

L'indice de réfraction d'un matériau est défini par le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide C sur la vitesse de la lumière dans le matériau V par la relation :

$$n = C/V \quad \text{EqIII-32}$$

La vitesse de la lumière dans un matériau n'est pas constante, elle varie avec la longueur d'onde.

L'indice de réfraction intervient également dans la détermination des coefficients de réflexion et de transmission à travers la relation de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{EqIII-33}$$

avec :

n_1, n_2 sont les indices de réfraction de deux milieux différents

θ_1 et θ_2 sont les angles que font les rayons lumineux incident et réfracté avec la normale

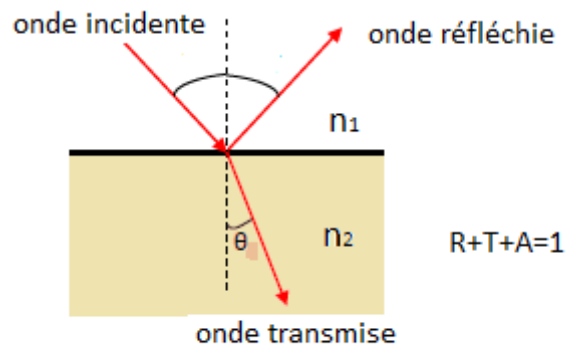


Figure III-1 : Réflexion et réfraction de la lumière

Le rayon réfléchi est symétrique au rayon incident par rapport à la normale à la surface réfléchissante [3], [5], [6].

Le coefficient de réflexion R (ou réflectivité) est défini comme le rapport de l'intensité réfléchie I_r sur l'intensité incidente I_i tel que :

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad \text{EqIII-34}$$

ou

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad \text{EqIII-35}$$

Le coefficient de transmission T est défini comme le rapport de l'intensité transmise I_t sur l'intensité incidente I_i tel que :

$$T = \frac{I_t}{I_i} \quad \text{EqIII-36}$$

ou

$$T = \frac{1 - R}{1 + R} \quad \text{EqIII-37}$$

Ces mêmes coefficients sont aussi exprimés en fonction des composantes de polarisation parallèle et perpendiculaire du faisceau incident par les équations suivantes:

$$E_r = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} E_i \quad (\text{polarisation parallèle}) \quad \text{EqIII-38}$$

$$E_t = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} E_i \quad (\text{polarisation parallèle}) \quad \text{EqIII-39}$$

$$E_r = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} E_i \quad (\text{polarisation perpendiculaire}) \quad \text{EqIII-40}$$

$$E_t = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} E_i \quad (\text{polarisation perpendiculaire}) \quad \text{EqIII-41}$$

E_i, E_r et E_t sont les amplitudes associées respectivement aux champs électriques incident, réfléchi et transmis (réfracté) [13].

Et on obtient :

$$R = \left(\frac{E_r}{E_i} \right)^2 \quad \text{EqIII-42}$$

et

$$T = \left(\frac{E_t}{E_i} \right)^2 \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \quad \text{EqIII-43}$$

III-1. Modélisation du faisceau optique incident :

Un faisceau optique est modélisé en tant que source collimatée à l'aide de l'instruction « BEAM » [1],[3],[6],[14],[15]. L'origine du faisceau est définie par les paramètres X.ORIGIN et Y.ORIGIN (voir Figure III-2). Le paramètre ANGLE spécifie la direction de propagation du faisceau par rapport à l'axe des x.

ANGLE = 90 correspond à un faisceau lumineux vertical (arrivant du haut). Les paramètres MIN.WINDOW et MAX.WINDOW spécifient la fenêtre d'illumination. Comme le montre la Figure III-2, la fenêtre d'illumination est "découpée" par rapport au domaine du périphérique, de sorte qu'aucun faisceau ne contourne le périphérique. Le faisceau est automatiquement divisé en une série de rayons de sorte que la somme des rayons couvre toute la largeur de la fenêtre d'illumination. Lorsque le faisceau est divisé, ATLAS résout automatiquement les discontinuités le long des limites de la région du dispositif.

Pour activer ce modèle, il faut spécifier « BEAM » dans « Matériaux et Modèles ». L'instruction est la suivante :

```
Beam num=1 x.origin=1000 y.origin=-30 angle= 90.0 power.file=cdrom.spec reflects=1
quantum.eff=1.0
```

x.origin=1000 y.origin=-30 veut dire que le faisceau est pointé au milieu de la cellule élémentaire à 30µm au dessus de la face avant de la structure.

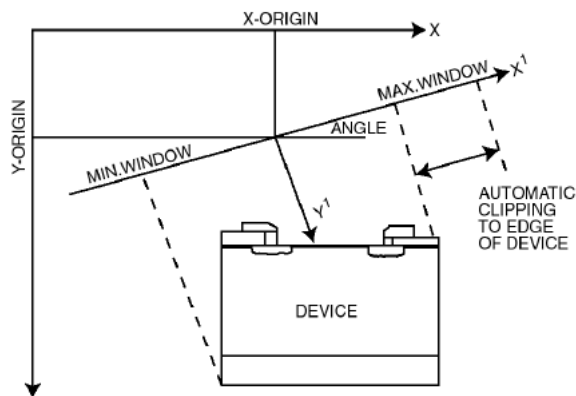


Figure III-2 : Schéma d'une fenêtre d'illumination telle que définie par Atlas [1]

III.2. Spécification des réflexions :

Par défaut, aucune réflexion n'est considérée lors de la trace du rayon.

Le paramètre REFLECTS = <i> est utilisé pour définir un nombre entier de réflexions à prendre en compte [16], [17]. Notons que la définition d'un très grand nombre de réflexions peut conduire à des temps de simulation extrêmement longs pour la trace de rayon. Un moyen pratique de surmonter les longs temps de traitement est d'utiliser le paramètre MIN.POWER.

Par défaut, la réflexion et la réfraction à la première interface sont ignorées. Le premier coefficient de réflexion est zéro et le coefficient de transmission est un. La polarisation et l'angle du rayon transmis à la première interface sont identiques à la polarisation et à l'angle du faisceau incident. Si le paramètre FRONT.REFL de l'instruction BEAM est spécifié, le coefficient de transmission est calculé à l'aide des équations 10-1 à 10-6. Lorsque le coefficient de transmission est calculé, il est supposé que le matériau en dehors du domaine du dispositif soit un vide. Les rayons transmis sont atténués par le coefficient de transmission mais le rayon réfléchi n'est pas tracé.

III.2.1. Réflexion arrière :

Par défaut, la réflexion à l'arrière du dispositif est ignorée. Aucun rayon réfléchi n'est tracé une fois que l'arrière du dispositif est atteint. Si le paramètre BACK.REFL est spécifié, le coefficient de réflexion arrière est calculé (en supposant à nouveau un vide à l'extérieur de l'appareil) et le rayon réfléchi vers l'arrière est tracé.

III.2.2. Réflexion des parois latérales:

Par défaut, la réflexion des côtés du dispositif est ignorée. Aucun rayon réfléchi n'est retracé dans la structure. Dans ce cas, BACK.REFL est utilisé pour activer les réflexions sur les parois latérales en supposant un vide à l'extérieur du dispositif.

III.2.3. Les couches antireflets :

Comme nous l'avons vu au chapitre I, des revêtements antireflets (AR) sont placés sur les dispositifs photovoltaïques pour améliorer l'efficacité quantique de ces derniers. Les revêtements ARC (pour « Anti Reflecting Coating ») simples sont typiquement composés d'une couche d'un matériau isolant transparent d'un quart d'onde optique d'épaisseur. De tels revêtements réduisent significativement la réflectivité de la lumière à la longueur d'onde de conception. Généralement, les revêtements ARC n'affectent que les propriétés optiques de l'appareil. Par conséquent, spécifier le revêtement comme une partie de la structure du dispositif augmentera inutilement la complexité de la simulation électrique. Dans ATLAS, les revêtements sont associés aux interfaces de l'appareil. Cela permet de spécifier certaines propriétés optiques de n'importe quelle limite de matériau sans affecter les propriétés électriques de la structure. Pour définir les propriétés optiques d'un revêtement associé à cette interface, on utilise l'instruction INTERFACE et on inclut le paramètre OPTICAL. Le paramètre AR.THICK définit l'épaisseur de la couche antireflet. Le paramètre AR.INDEX

définit l'indice de réfraction de la couche. x.min, x.max, y.min et y.max représentent les coordonnées de la couche dans la structure. Pour une couche antireflet simple, la syntaxe utilisée est la suivante :

```
interface optical material=SiN ar.index=2.05 ar.thick=0.08 coating=1 layer=1 x.min=0
x.max=2000 y.min=-0.08 y.max=0
```

La permittivité relative d'un matériau ou constante diélectrique décrit la réponse d'un matériau à un champ électrique appliqué et est définie par :

$$\epsilon_r = \chi \cdot \epsilon_0 \quad \text{EqIII-44}$$

avec χ est la susceptibilité électrique du matériau

et ϵ_0 est la permittivité du vide ($\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12} \text{F.m}^{-1}$)

Lorsque le phénomène d'absorption a lieu dans un matériau, l'indice de réfraction a une composante complexe et est définie par :

$$\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) + iK(\lambda) \quad \text{EqIII-45}$$

où K est le coefficient d'atténuation ou coefficient d'extinction qui correspond à la partie imaginaire de l'indice de réfraction.

Si l'intensité incidente est prise comme étant égale à l'unité, nous avons alors la relation :

$$R + T + A = 1 \quad \text{EqIII-46}$$

d'où :

$$A = 1 - R - T \quad \text{EqIII-47}$$

A rappeler que sous incidence normale ($\theta_i=0$), une SCAR de SiN ($n=2.03$) ayant une épaisseur de 75nm déposée sur un substrat de silicium d'indice $n=3.94$ permet de réduire la réflectivité de la surface de 39% à 12% [13].

Si chaque photon absorbé donne naissance à N paires électrons-trous alors le taux de génération optique est donné par la relation :

$$G = N \frac{P\lambda}{hc} \alpha e^{-\alpha y} \quad \text{EqIII-43}$$

y est la distance relative pour le rayon en question, h est la constante de Planck, λ est la longueur d'onde et c est la vitesse de la lumière. α est donné par l'équation suivante :

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} K \quad \text{EqIII-48}$$

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle physique qui est la base de la conception et de la modélisation des cellules solaires au silicium cristallin. A la base, cinq équations aux dérivées partielles : l'équation de Poisson, deux équations de continuité et deux équations de transport. Les méthodes et les modèles physiques utilisés pour la simulation sous Atlas/Silvaco sont exposés. Enfin, l'intégration de la lumière dans le système des équations est réalisée à travers la génération optique dans les deux équations de transport, celle des électrons et celle des trous.

Bibliographie du chapitre III

- [1] S. International, ATLAS User's Manual Device Simulation Software, December 7, 2006.
- [2] H. Ghembaza, *Optimisation du profil de distribution du phosphore dans les émetteurs dopés "Lydop" des cellules solaires conventionnelles à base de silicium cristallin*, Thèse de Doctorat, 2016
- [3] Dragica Vasileska, Stephen M. Goodnick, *Computational Electronics*, Morgan & Claypool Publishers, 1 déc. 2006
- [4] James D. Plummer, Michael D. Deal, Peter B. Griffith, *SILICON VLSI TECHNOLOGY: Fundamentals, Practice and Modeling*, Prentice Hall, 2000.
- [5] D. Vasileska, SILVACO Simulation of Solar Cells: capabilities of silvaco atlas for optoelectronic applications, 2011.
- [6] Dragica Vasileska, *Computational Electronics Introduction to Silvaco ATLAS*, nanoHUB.org
- [7] S. International, SOLAR : *Solar Cell Application Examples*, *Solar Cell Simulation*: <https://www.silvaco.com/examples/tcad/section44/example1/index.html>.
- [8] Mehdi Daanoune, *Mesure de durée de vie de porteurs minoritaires dans les structures semiconductrices de basse dimensionnalité*. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université de Grenoble Alpes, 2015, Thèse de doctorat
- [9] M. Pawlik, *Etude de la passivation de surface du silicium cristallin type P par dépôt de couches atomiques d'alumine pour application aux cellules solaires à haut rendement*, Ecole Centrale de Lille: Thèse de Doctorat, 2016.
- [10] Basil Salame. *Mesure de charges dans les matériaux semi-conducteurs et les métaux avec une méthode élasto-électrique*. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2015, Thèse de doctorat
- [11] M. H. Sanders, *Modeling Of Operating Temperature Performance Of Triple Junction Solar Cells Using Silvaco's Atlas*, Naval Postgraduate School: Monterey, California, 2007.
- [12] J. Baldomero Garcia, *Indium Gallium Nitride Multijunction Solar Cell Simulation Using Silvaco Atlas*, Naval Postgraduate School, Juin 2007.
- [13] N. SAHOUANE, *Elaboration, Modélisation et Caractérisation des Cellules Solaires de type IIIème Génération dotées de Couches Antireflets à Indice Graduel*, Université Abou

Bekr Belkaïd: Thèse de Doctorat, 2016

- [14] J. E. VanDyk, *Modeling laser effects on multi-junction solar cells using silvaco atlas software for spacecraft power beaming applications*, Naval Postgraduate School, Juin 2010.
- [15] D. Vasileska, *Silvaco Simulation of Solar Cells*, Arizona State University.
- [16] B. Padmanabhan, *Modeling Of Solar Cells*, ARIZONA STATE UNIVERSITY, 2008.
- [17] D. Vasileska, *Syllabus for Modeling of Optoelectronic Devices*, Arizona State University, 2010.

Chapitre IV

Simulation Des Cellules EWT industrielles

Introduction

IV- Structure, paramètres et maillage

I.1 Structure simulée

I.2 Paramètres de la structure simulée

I.3 Maillage

V- Simulation et optimisation

II.1 Variation de l'épaisseur du substrat

II.2 Variation du dopage du substrat

II.3 Variation du dopage de l'émetteur

II.4 Variation de l'épaisseur de l'émetteur

II.5 Variation de l'épaisseur du BSF

II.6 Variation du dopage du BSF

II.7 Variation de la longueur de diffusion

II.8 Variation des vitesses de recombinaisons

II.9 Effet du rapport W_{Al}/W_{BSF}

II.10 Effet du rapport $W_{Ag}/W_{émetteur}$

VI- Passivation de surface

III.1 Résultats

III.1.1 Passivation avec de l'oxyde d'aluminium

III.1.2 Passivation avec de l'oxyde d'hafnium

III.1.3 Passivation avec de l'oxyde de silicium

III.1.4 Passivation avec de l'oxyde de titane

III.2 Discussion

Conclusion

Liste des figures du chapitre IV

Figure IV- 1 : Concept de la cellule Emitter Wrap Through

Figure IV- 2 : Structure de la cellule de référence utilisée

Figure IV- 3 : Structure bidimensionnelle de la cellule EWT

Figure IV- 4 : Zoom sur la face avant de la cellule EWT

Figure IV-5 : Organigramme du programme de simulation

Figure IV-6 : Caractéristiques électriques de la cellule EWT simulée en fonction du dopage du substrat

Figure IV- 7 : Profil de dopage de l'émetteur (coté gauche de la cellule)

Figure IV-8 : Caractéristiques électriques de la cellule EWT simulée en fonction du dopage du BSF

Figure IV-9: Evolution des caractéristiques électriques en fonction de la recombinaison sur les faces avant et arrière

Figure IV-10: Face arrière de la cellule EWT

Figure IV-11 : Proportions entre le métal et le semi conducteur

Figure IV- 12 : Face arrière de la cellule EWT

Figure IV-13 : Proportions entre le métal et le semi conducteur

Figure IV-14 : Comparaison entre les résultats de réflectivité simulée et mesurée pour un substrat de silicium recouvert ou non de SiN ($R=NH_3/SiH_4= 5$, $n=2.03$)

Figure IV-15: Face avant de la cellule telle que utilisée dans la simulation

Figure IV-16: Réflectivité en fonction des épaisseurs de la simple couche anti-reflet et du diélectrique

Figure IV-17: Pertes optiques de la cellule solaire simulée en fonction de la variation de l'épaisseur de Al_2O_3 et de l'épaisseur SiN_x (A: 80 nm, B: 60 nm C: 40 nm D: 30 nm et E: 10 nm).

Figure IV-18: Paramètres électriques de la cellule solaire simulée en fonction de la variation de l'épaisseur de Al_2O_3 et de l'épaisseur SiN_x (A: 80 nm, B: 60 nm C: 40 nm D: 30 nm et E: 10 nm).

Figure IV-19: Variation des pertes optiques et des paramètres électriques de la cellule simulée avec la variation de l'épaisseur de HfO_2 (couche diélectrique) et de l'épaisseur SiN_x (SARC) (A: 80 nm, B: 60 nm et C: 40 nm).

Figure IV-20: Variation des pertes optiques et des paramètres électriques de la cellule simulée avec la variation de l'épaisseur de SiO₂ (couche diélectrique) et de l'épaisseur SiNx (SARC) (A: 80 nm, B: 60 nm et C: 40 nm).

Figure IV-21: Variation des pertes optiques et des paramètres électriques de la cellule simulée avec la variation de l'épaisseur de TiO₂ (couche diélectrique) et de l'épaisseur SiNx (SARC) (A: 80 nm, B: 60 nm et C: 40 nm).

Figure IV-22: Variation du rendement quantique externe pour les différents oxydes utilisés

Liste des tableaux du chapitre IV

Tableau IV- 1: Paramètres utilisés dans la simulation

Tableau IV- 2: Caractéristiques électriques de la cellule EWT simulée en fonction de l'épaisseur du substrat

Tableau IV-3 : Caractéristiques électriques de la cellule EWT simulée en fonction du dopage de l'émetteur

Tableau IV-4 : Caractéristiques électriques de la cellule EWT simulée en fonction de l'épaisseur de l'émetteur

Tableau IV- 5: Caractéristiques électriques de la cellule EWT simulée en fonction de l'épaisseur du BSF

Tableau IV-6 : Durées de vie recalculées à partir des longueurs de diffusion et pour deux niveaux de dopage du substrat

Tableau IV-7 : Caractéristiques électriques d'une structure EWT en fonction de la durée de vie des porteurs

Tableau IV-8 : Caractéristiques électriques d'une structure EWT en fonction du rapport W_{Al}/W_{BSF}

Tableau IV-9 : Caractéristiques électriques d'une structure EWT en fonction du rapport $W_{Ag}/W_{émetteur}$

Tableau IV-10 : Indices de refraction et Energies de gap des oxydes utilisés dans la simulation

Tableau IV-11 : Tableau récapitulatif des durées de vie et des vitesses de recombinaison (prises de la littérature) utilisées dans la simulation

Tableau IV-12 : Evaluation des caractéristiques électriques de la cellule simulée

Introduction

L'industrie du photovoltaïque d'aujourd'hui fait face à une multitude de contraintes dont le rythme accéléré de l'innovation et la complexité des processus. La bonne nouvelle, c'est que la simulation numérique peut alléger ces contraintes en facilitant la prédiction du comportement des cellules solaires avant leur fabrication et mise en marché [1].

La simulation numérique est un outil incontournable d'analyse et d'étude de plus en plus utilisé. Elle consiste à réaliser virtuellement une cellule solaire selon différents scénarios [2].

Que ce soit un dispositif ou une structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est primordiale pour obtenir de bons rendements.

La simulation numérique, couramment utilisée pour l'optimisation des cellules solaires, présente plusieurs avantages dont on cite :

- Elle permet d'éviter la fabrication de plusieurs prototypes de cellules avec des paramètres différents.
- Elle est indépendante de la technologie utilisée et donc on peut faire varier largement les paramètres.
- Si les paramètres sont indépendants, on peut dissocier l'influence de chaque zone sur une autre de la cellule.
- Elle permet d'éviter la réalisation d'essais réels, coûteux et difficiles à mettre en œuvre en prédisant le comportement de la cellule étudiée.
- Elle permet d'aboutir à des économies rationnelles de matériaux.

Généralement, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les niveaux et profils de dopage, la configuration des contacts...etc.

Les valeurs optimales de ces paramètres dépendent en grande partie de la structure à étudier, de la qualité du substrat, des contacts ohmiques, des vitesses de recombinaison en faces avant et arrière...etc.

Dans ce but, l'optimisation étudie l'influence des paramètres de la cellule solaire sur son rendement permettant d'obtenir une structure ayant un rendement maximal [3].

La simulation a été amplement utilisée dans ce travail afin de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires à émetteurs enterrés, de

minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule afin d'obtenir un rendement maximal. La difficulté majeure est le grand nombre de paramètres influençant le rendement des cellules solaires à émetteurs enterrés dont on cite :

- Les paramètres géométriques des contacts et des régions diffusées (largeur et épaisseur de l'émetteur et BSF ainsi que la distance entre émetteur et BSF)
- Longueur de diffusion et épaisseur du substrat
- Les niveaux et profils de dopage (substrat, émetteur et BSF)
- Les taux de recombinaison (face avant et arrière) et durée de vie des porteurs minoritaires
- Les coefficients de réflexion des faces avant et arrière de la cellule.

Finalement, une quinzaine de paramètres est nécessaire pour simuler la cellule solaire EWT.

Les logiciels les plus utilisés pour la simulation numérique sont: PC1D, DESSIS, ISE TCAD, SILVACO...[1]

Dans notre cas, le logiciel utilisé pour simuler les cellules solaires EWT est le logiciel à deux dimensions ATLAS de SILVACO.

D'abord, nous allons décrire la structure simulée et enfin nous exposerons les résultats obtenus.

I- Structure, paramètres et maillage

I.1 Structure simulée

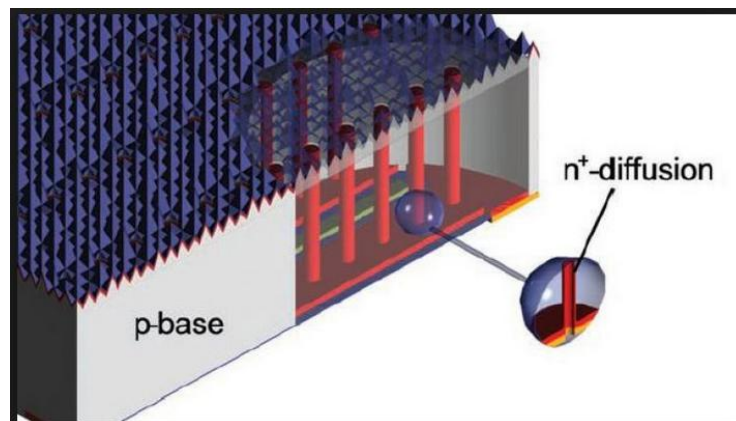


Figure IV- 1 : Concept de la cellule Emitter Wrap Through

Parce que les cellules solaires à émetteurs enterrés sont de nature périodique, nous n'avons pas simulé toute la cellule solaire mais juste une partie élémentaire.

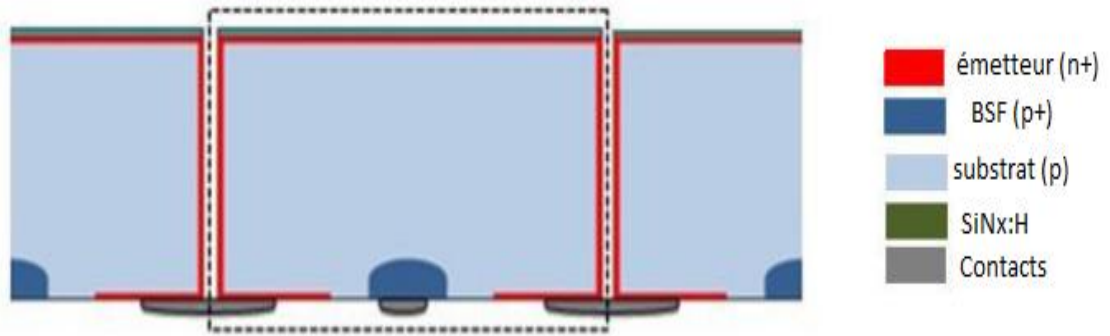


Figure IV- 2 : Structure de la cellule de référence utilisée

La figure ci-après représente la structure telle que donnée par Atlas où les régions (matérielles) sont spécifiées sachant que les matériaux spécifiques sont alors définis dans le fichier d'entrée (programme).

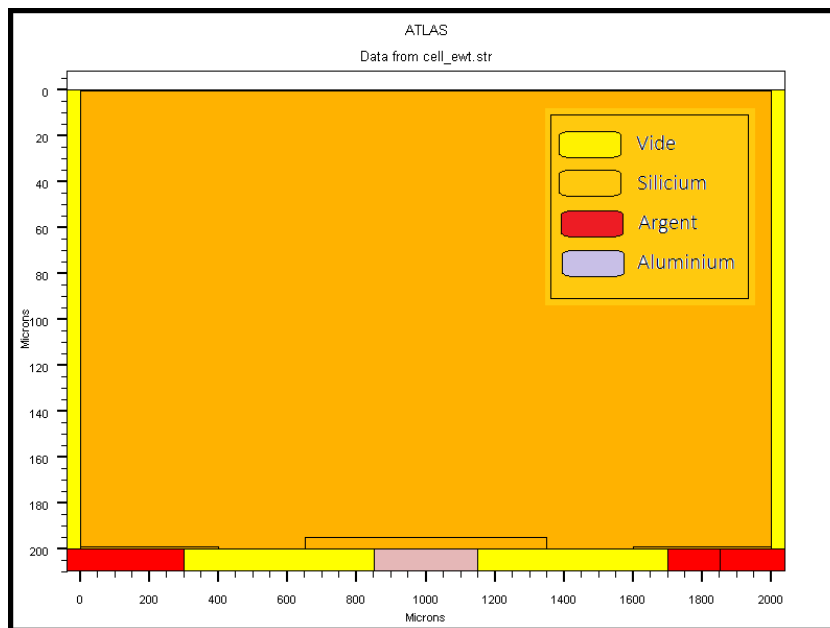


Figure IV- 3 : Structure bidimensionnelle de la cellule EWT

La figure ci-dessous représente un zoom sur la face avant puisque dans la figure ci-dessus, la couche antireflet n'y apparait pas ainsi que l'émetteur.

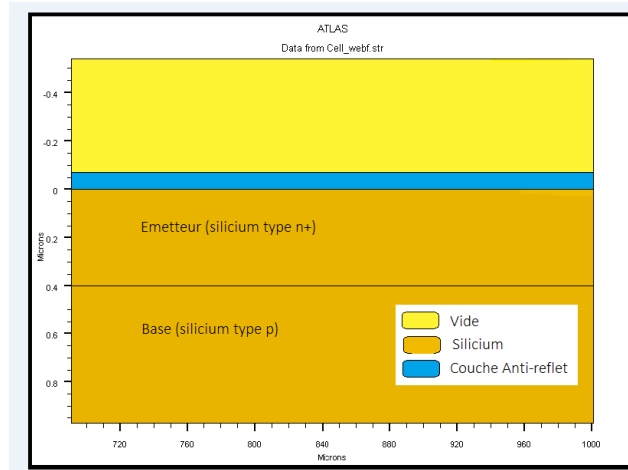


Figure IV- 4 : Zoom sur la face avant de la cellule EWT

I.2 Paramètres de la structure simulée

Nous avons en premier lieu défini une cellule élémentaire avec un ensemble de paramètres fixes (ou un intervalle de valeurs fixées). Ensuite, nous avons fait varier les différents paramètres pour voir leur influence sur le comportement de la cellule EWT.

Substrat (p)	Dopage : 10^{16} à 10^{19} (cm^{-3}) Epaisseur : 50 à 400 μm Longueur : 2000 μm
Emetteur (n+)	Dopage : 10^{18} à 10^{21} (cm^{-3}) Epaisseur : 0.2 à 1 μm Profil de dopage : ERFC
BSF (p+)	Dopage : 10^{17} à 10^{20} (cm^{-3}) Epaisseur : 5 μm Profil de dopage : ERFC
SiNx :H	Indice de réfraction : 2.05 à $\lambda = 0.4358 \mu\text{m}$ Epaisseur : 80nm
Durée de vie des porteurs minoritaires	$\tau_n = \tau_p = 1 \mu\text{s}$
Contact Ag	Epaisseur : 10 μm Workfunction (travail de sortie) : 4.08
Contact Al	Epaisseur : 10 μm Workfunction (travail de sortie) : 5.2

Tableau IV- 1: Paramètres utilisés dans la simulation

I.3 Maillage

Pour simuler la structure à étudier, il faut définir son maillage. Ce dernier repose sur le découpage de la structure en plusieurs petites cellules [4] pour pouvoir résoudre numériquement les équations aux dérivées partielles : 3 équations fondamentales de transport

de charges dans les semi-conducteurs qui sont l'équation de Poisson et l'équation de continuité pour les électrons et les trous citées précédemment. La statistique de Boltzmann détermine la concentration des porteurs. Le simulateur résout alors, numériquement ces équations à chaque nœud du maillage.

Pour une bonne précision lors de la simulation, il faut avoir le maillage le plus fin possible [1]. Par contre, si le maillage est trop fin, le temps de calcul est élevé. Donc, il est nécessaire de trouver un compromis entre le temps et la précision de calcul. Cependant, il faut resserrer le maillage près des endroits d'intérêts (zones fortement dopées et contacts par exemple) [5].

Lors de notre simulation, le maillage a été optimisé après plusieurs « runs » jusqu'à ce que nous ayons atteint la meilleure performance. Dans notre cas, le nombre de nœuds était d'environ 3000.

II- Simulation et optimisation

A partir de la cellule de référence décrite précédemment, nous avons fait varier plusieurs paramètres pour voir leur influence sur le rendement de la cellule. En pratique, le programme que nous avons conçu est décrit par l'organigramme de la figure suivante :

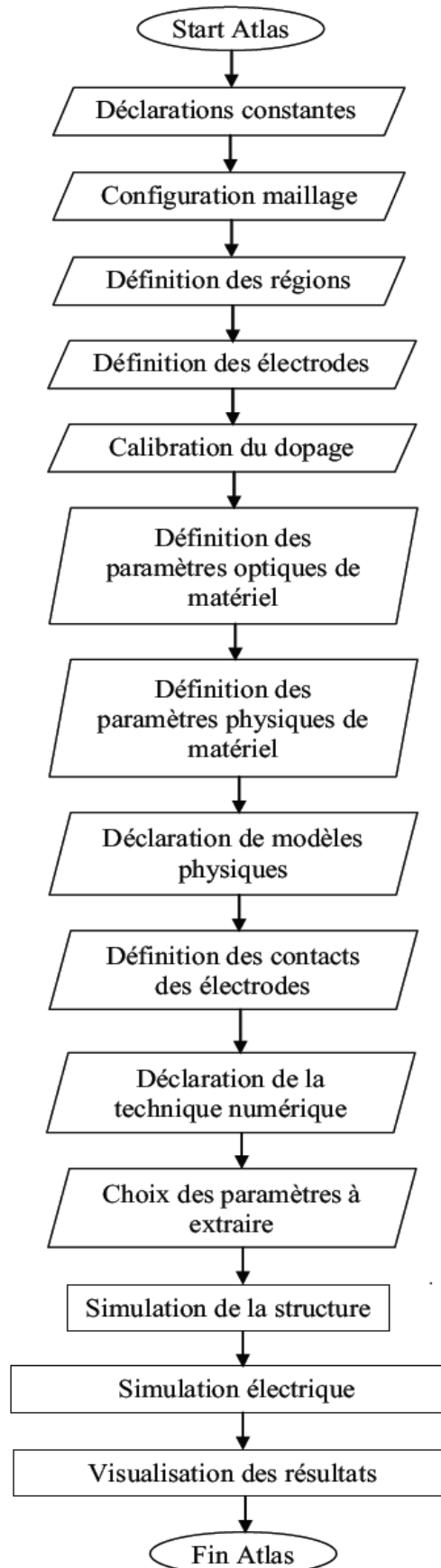


Figure IV-5 : Organigramme du programme de simulation

Parmi ces paramètres, on peut citer l'épaisseur du substrat, le dopage du substrat, le dopage de l'émetteur et du BSF, la profondeur de l'émetteur et du BSF, l'espacement entre les contacts, et le rapport entre la largeur du contact aluminium et le BSF et le rapport entre la largeur du contact argent et l'émetteur.

II.1 Variation de l'épaisseur du substrat

Dans le but de réduire la proportion de silicium cristallin dans le coût de fabrication (environ 1/3 du prix global) d'un module solaire, les industriels du photovoltaïque prévoient une réduction draconienne de l'épaisseur des plaquettes [6]. Dans cette optique, nous allons voir l'influence de l'épaisseur du substrat sur les caractéristiques électriques de notre cellule.

Le tableau suivant englobe les valeurs de simulation obtenues :

Epaisseur du substrat (μm)	50	100	200	300	400
Courant de court circuit (mA/cm^2)	31.87	33.70	35.01	35.06	36.37
Tension de circuit ouvert (V)	0.62	0.60	0.58	0.548	0.54
Rendement (%)	18.94	19.1	20.58	19.87	19.32

Tableau IV- 2: Caractéristiques électriques de la cellule EWT simulée en fonction de l'épaisseur du substrat

Avec la réduction de l'épaisseur du substrat, on remarque une réduction du courant de court circuit qui peut être expliqué par le fait que la réduction de l'épaisseur du substrat signifie réduction de l'absorption des photons. En effet, les photons très énergétiques qui pénètrent profondément dans le silicium sont perdus.

En plus, plus le substrat est mince, plus la densité des porteurs photogénérés aux environs de la face arrière est grande. En effet, les photons non absorbés et réfléchis par le contact arrière vont entraîner une photogénération des porteurs au niveau de la face arrière auxquels vont s'ajouter les porteurs photogénérés par l'absorption directe du matériau entraînant ainsi une amélioration de la tension en circuit ouvert.

Enfin, on remarque que dès que l'épaisseur du substrat dépasse les $200\mu\text{m}$ (substrat épais), le rendement a tendance à diminuer ; ceci est dû à la faible longueur de diffusion des porteurs minoritaires.

II.2 Variation du dopage du substrat

En se référant à la figure 5, on constate qu'il y a une valeur optimale du dopage du substrat, qui correspond au maximum de rendement obtenu. Cette valeur optimale est égale à 20.58%.

Si on augmente plus le dopage du substrat, la durée de vie des porteurs et les taux de recombinaison (Auger et SRH) augmentent, entraînant ainsi une décroissance importante du rendement et du courant de court-circuit.

Par contre, si on réduit le dopage du substrat ($<10^{15} \text{ cm}^{-3}$), la hauteur de la barrière de potentiel de la jonction p-n est réduite et la collecte des porteurs est mauvaise.

Enfin, on remarque que les valeurs maximales du rendement, du courant de court-circuit ainsi que la tension de circuit-ouvert ne correspondent pas au même niveau de dopage du substrat. Donc, il est difficile de faire une optimisation simultanée pour avoir un rendement maximal, un courant de court-circuit maximal ou encore une tension de circuit-ouvert maximale.

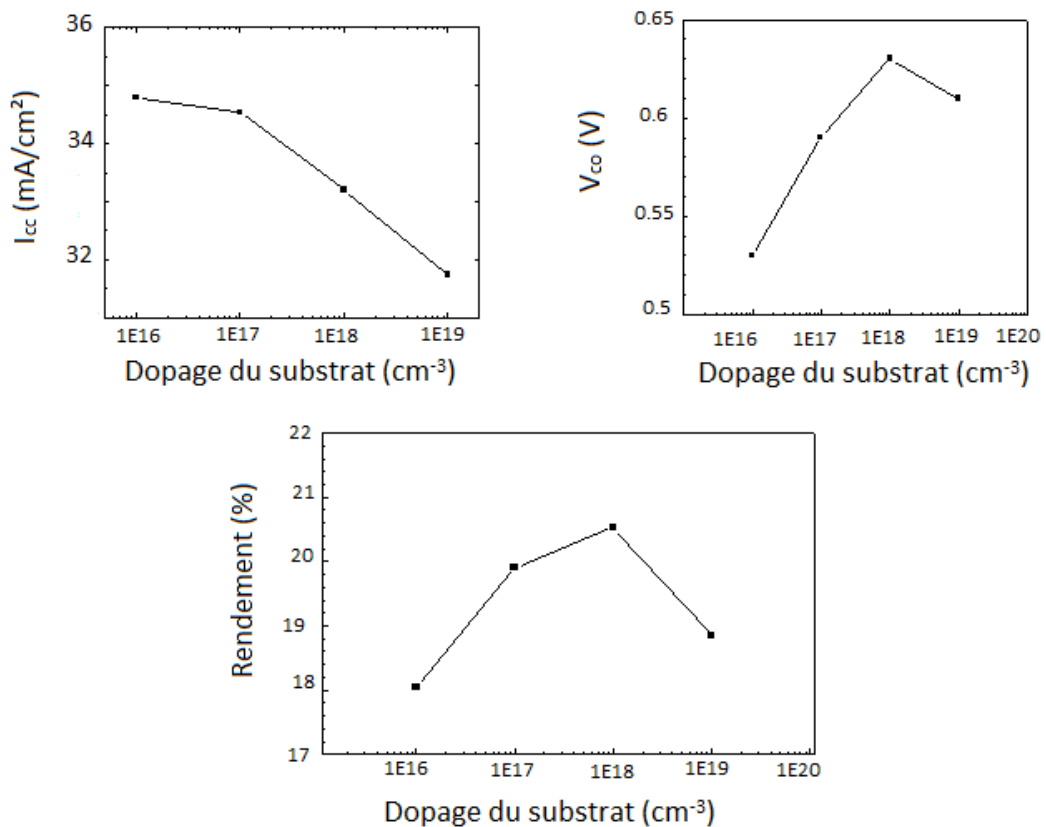


Figure IV-6 : Caractéristiques électriques de la cellule EWT simulée en fonction du dopage du substrat

II.3 Variation du dopage de l'émetteur

La figure ci-après représente le dopage de l'émetteur situé sur la face avant et dans les trous

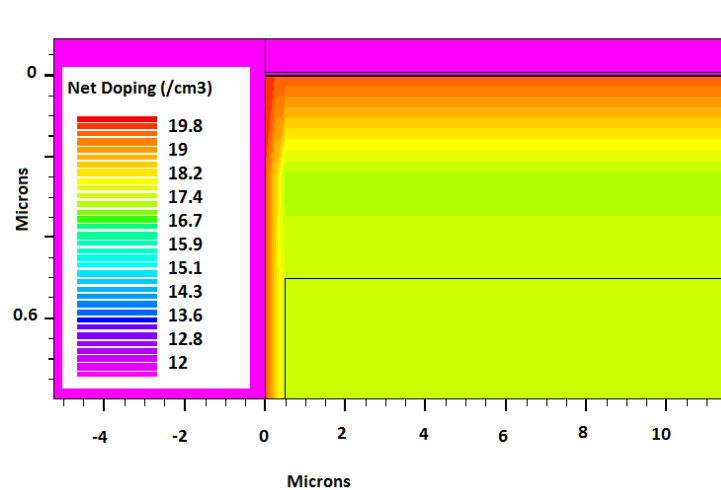


Figure IV- 7 : Profil de dopage de l'émetteur (coté gauche de la cellule)

Si on augmente le dopage de l'émetteur, on remarque une croissance du rendement de la cellule EWT. Par contre, on constate que le courant de court-circuit varie peu, voir pratiquement pas, ceci est dû en grande partie à cause de l'épaisseur de l'émetteur comparé à celle de la cellule. Les recombinaisons dans l'émetteur sont négligeables comparées à celles totales dans la cellule.

D'après le tableau 9, on remarque que la tension de circuit-ouvert augmente avec l'élévation du niveau de dopage de l'émetteur ; ceci est dû au fait qu'en augmentant le dopage de l'émetteur, on augmente la hauteur de la barrière de potentiel de la jonction p-n. Donc, en augmentant le dopage de l'émetteur, on assiste à une augmentation de la tension de circuit-ouvert et du rendement de la cellule.

Dopage de l'émetteur (cm ⁻³)	5.10 ¹⁸	1.10 ¹⁹	5.10 ¹⁹	1.10 ²⁰	5.10 ²⁰	1.10 ²¹
Tension de circuit ouvert (V)	0.58	0.59	0.60	0.60	0.61	0.63
Rendement (%)	19.24	19.37	19.51	19.54	19.56	19.59

Tableau IV-3 : Caractéristiques électriques de la cellule EWT simulée en fonction du dopage de l'émetteur

II.4 Variation de l'épaisseur de l'émetteur

Avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur, on observe une amélioration des caractéristiques électriques de la cellule. D'après le tableau ci-dessous, on remarque que la

variation de la tension de circuit ouvert et du rendement de la cellule en fonction de l'épaisseur de l'émetteur est beaucoup plus importante. On peut supposer que la croissance du rendement et celle de la tension de circuit ouvert peuvent être expliquées par l'influence de la recombinaison sur le contact ohmique.

Epaisseur de l'émetteur (μm)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Courant de court circuit (mA/cm²)	33.12	33.38	33.99	34.28	34.36
Tension de circuit ouvert (V)	0.58	0.582	0.586	0.59	0.60
Rendement (%)	19.53	19.94	20.39	20.57	20.61

Tableau IV-4 : Caractéristiques électriques de la cellule EWT simulée en fonction de l'épaisseur de l'émetteur

II.5 Variation de l'épaisseur du BSF

A l'heure actuelle, la technologie de production des cellules solaires à base de silicium multicristallin utilise un procédé à alliage d'aluminium pour former le BSF. En général, le BSF est réalisé par formation d'un alliage entre le silicium et l'aluminium par recuit thermique rapide (Rapid Thermal Annealing RTA) du contact p-Si/Al.

Les valeurs obtenues par cette méthode sont pour le dopage $N \approx 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et pour l'épaisseur $d \approx 0.3\text{-}5 \mu\text{m}$.

Pour voir l'influence de ce paramètre qu'est l'épaisseur du BSF sur les caractéristiques de la cellule EWT, nous avons tracé le tableau suivant:

Epaisseur du BSF (μm)	1	2	3	4	5
Courant de court circuit (mA/cm²)	33.54	33.79	33.91	34.23	34.62
Tension de circuit ouvert (V)	0.58	0.59	0.60	0.60	0.61
Rendement (%)	19.64	19.73	19.85	19.97	20.21

Tableau IV-5: Caractéristiques électriques de la cellule EWT simulée en fonction de l'épaisseur du BSF

On remarque que l'épaisseur du BSF doit être importante pour pouvoir réduire les recombinaisons sur le contact au substrat.

II.6 Variation du dopage du BSF

On remarque, d'après la figure ci-dessous, que l'augmentation du niveau du dopage du BSF permet l'amélioration de toutes les caractéristiques de la cellule EWT.

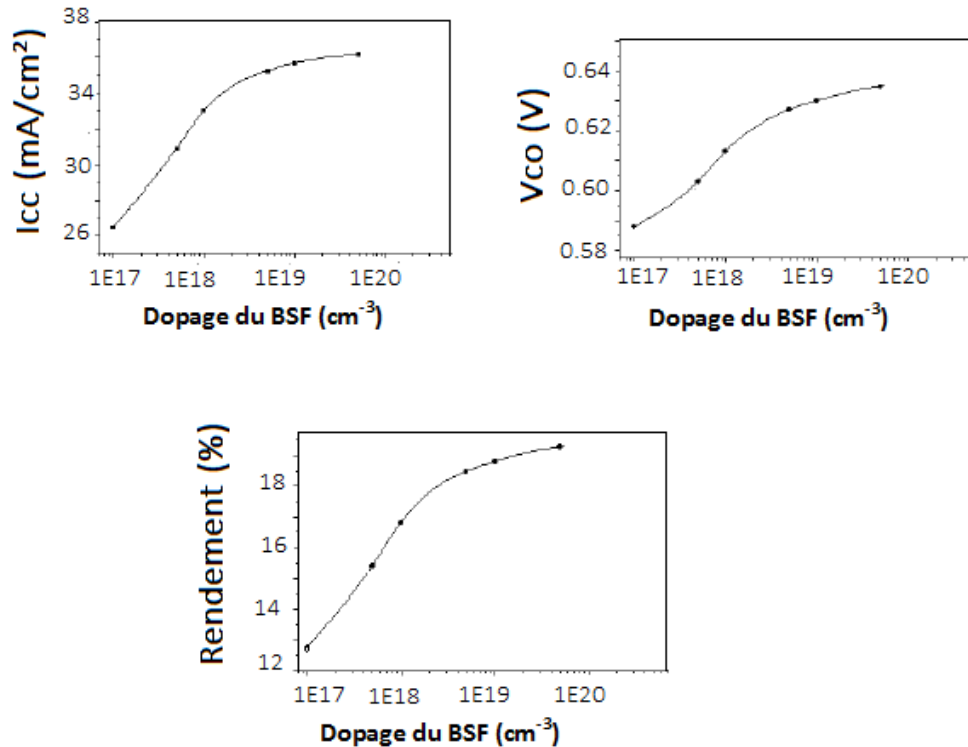


Figure IV-8 : Caractéristiques électriques de la cellule EWT simulée en fonction du dopage du BSF

Vu l'emplacement du BSF sur la face arrière de la cellule, les recombinaisons dans le BSF sont très faibles.

En plus, on sait qu'un BSF fortement dopé permet de réduire les recombinaisons au niveau du contact métal/semi conducteur [5]. Dans un BSF fortement dopé, les électrons sont repoussés par le BSF du contact au substrat, et dans le cas d'un BSF faiblement dopé, les électrons générés au dessus du contact rentrent dans le contact Al et pas dans l'émetteur.

II.7 Variation de la longueur de diffusion :

La longueur de diffusion est la longueur moyenne d'un porteur de charge entre la génération et la recombinaison. Les matériaux semi-conducteurs fortement dopés ont des taux de recombinaison plus élevés et, par conséquent, ont des longueurs de diffusion plus courtes. Les longueurs de diffusion plus élevées sont indicatrices des matériaux avec des durées de vie plus longues, et sont donc de meilleure qualité.

Le second paramètre lié au taux de recombinaison est la longueur de diffusion des porteurs minoritaires qui est la distance moyenne qu'un porteur peut parcourir du point de génération

jusqu'à sa recombinaison. La longueur de diffusion est étroitement liée à la probabilité de collecte.

Dans un programme Atlas/Silvaco, on ne peut pas introduire directement la longueur de diffusion du matériau mais la durée de vie des porteurs. Pour recalculer la longueur de diffusion, on peut faire appel à d'autres logiciels comme PC1D (logiciel de modélisation d'une cellule solaire à une dimension) à partir de la durée de vie. Le tableau suivant représente les durées de vie recalculées à partir de deux longueurs de diffusion et pour deux niveaux de dopage du substrat.

Niveau de dopage du substrat (cm ⁻³)	1 ^e 16		1 ^e 17	
Longueur de diffusion (µm)	200	300	200	300
Durée de vie des porteurs (µs)	15	31	25	57

Tableau IV-6 : Durées de vie recalculées à partir des longueurs de diffusion et pour deux niveaux de dopage du substrat

Le tableau ci-dessous englobe les résultats de simulation obtenus pour différentes valeurs de durées de vie des porteurs :

Durée de vie (µs)	Rendement (%)	I _{cc} mA/cm ²	V _{co} (V)
1	16.68	32.08	0.52
10	19.02	33.97	0.56
100	21	35.01	0.6
1000	21.76	35.10	0.62

Tableau IV-7: Caractéristiques électriques d'une structure EWT en fonction de la durée de vie des porteurs

II.8 Variation des vitesses de recombinaisons

Pour voir l'influence de la recombinaison faces avant et arrière sur le rendement de la cellule EWT, nous avons fait varier chaque paramètre séparément. La figure ci-dessous représente la variation du rendement de la cellule avec une structure EWT en fonction de ces deux paramètres.

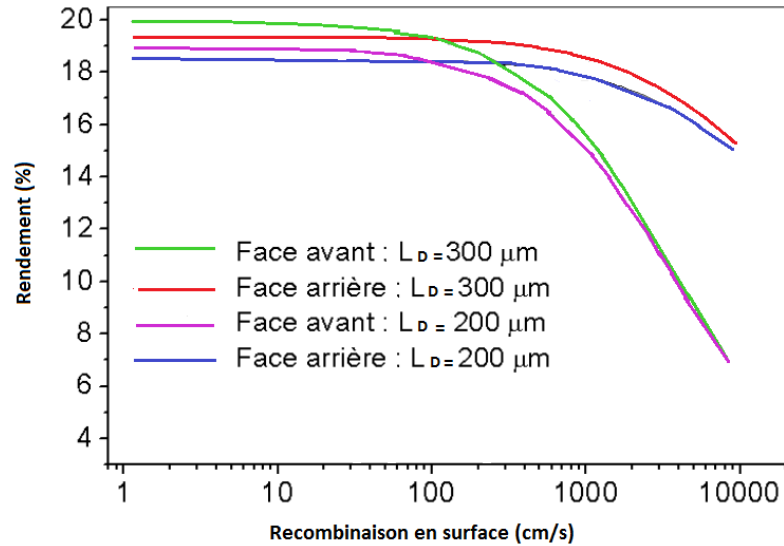


Figure IV-9: Evolution des caractéristiques électriques en fonction de la recombinaison sur les faces avant et arrière

On peut, de prime à bord, dire que la vitesse de recombinaison en surface est un paramètre qui influence le plus sur le rendement des cellules EWT. En effet, on remarque que pour une vitesse de recombinaison en surface inférieure à 100cm/s, ce paramètre n'influe pratiquement pas sur le rendement. Par contre, pour une vitesse de recombinaison en surface supérieure à 100cm/s, le rendement diminue significativement et la cellule EWT est complètement dégradée : pour une vitesse de recombinaison en face avant de l'ordre de 10000cm/s, le rendement décroît de 19 à 7 % et pour la même valeur de la vitesse de recombinaison en face arrière le rendement décroît de 19 à 16 %. Il est donc préférable d'être au dessous de la valeur 100cm/s.

II.9 Effet du rapport W_{Al}/W_{BSF}

Dans ce cas, nous avons fixé les largeurs de l'émetteur et du contact en argent, et nous avons fait varier la largeur du BSF et celle du contact en aluminium.

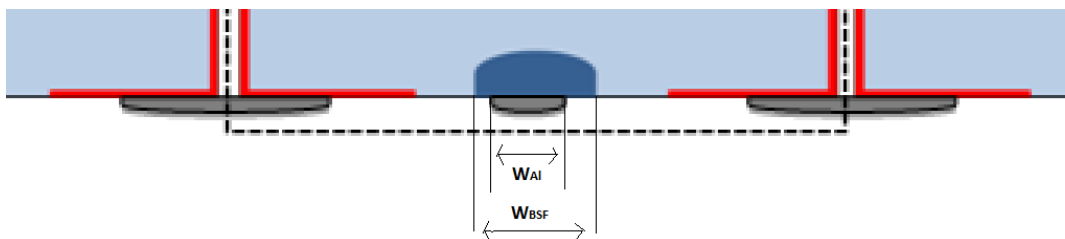


Figure IV-10: Face arrière de la cellule EWT

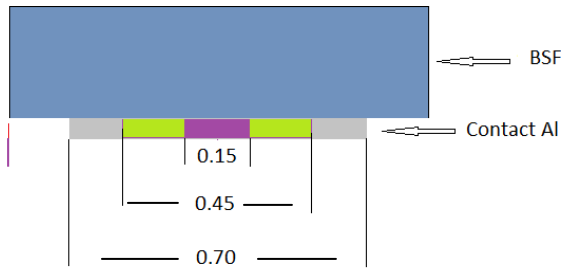


Figure IV-11 : Proportions entre le métal et le semi conducteur

Le tableau ci-dessous représente les résultats de la simulation en fonction du rapport de la largeur du BSF sur celle du contact aluminium.

W_{Al}/W_{BSF}	$I_{cc}(mA/cm^2)$	$V_{co} (V)$	Rendement (%)
0.15	32.10	0.64	18.87
0.45	32.09	0.64	18.86
0.70	32.07	0.64	18.84

Tableau IV-8 : Caractéristiques électriques d'une structure EWT en fonction du rapport W_{Al}/W_{BSF}

Du tableau ci-dessus, on peut observer que la métallisation partielle ou totale peut être considérée s'il n'y a pas de court-circuit. Ainsi, aucun effet significatif de la largeur du doigt en aluminium sur les performances électriques des cellules solaires EWT n'est obtenu.

II.10 Effet du rapport $W_{Ag}/W_{émetteur}$

Dans ce cas, nous avons fixé les largeurs du BSF et du contact en aluminium, et nous avons fait varier la largeur de l'émetteur et celle du contact en argent.

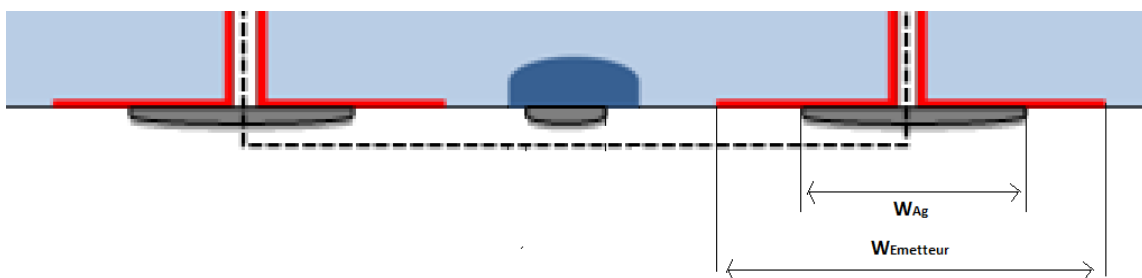


Figure IV- 12 : Face arrière de la cellule EWT

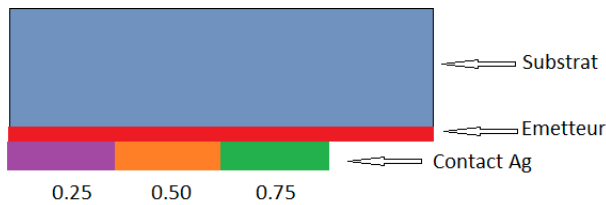


Figure IV-13 : Proportions entre le métal et le semi conducteur

Le tableau ci-dessous représente les résultats de la simulation en fonction du rapport de la largeur de l'émetteur sur celle du contact argent.

W_{Ag}/W_{émetteur}	I_{cc} mA/cm²	V_{co} (V)	Rendement (%)
0.25	33.53	0.64	18.57
0.50	33.48	0.63	18.55
0.75	33.45	0.63	18.52

Tableau IV-9 : Caractéristiques électriques d'une structure EWT en fonction du rapport W_{Ag}/W_{émetteur}

Afin d'éviter des pertes résistives, l'émetteur utilisé est fortement dopé (1.10^{21}cm^{-3}). Du tableau 8, la meilleure performance peut être atteinte pour un ratio de 25% entre le contact Ag et l'émetteur. Donc, il n'est pas nécessaire de couvrir tout l'émetteur par le métal.

III- Passivation de surface

Au sein de notre équipe, nous avons établi des codes de simulation en utilisant le logiciel Matlab, pour évaluer les pertes optiques à savoir : réflexion, transmission et absorption [7]. Pour cela, nous avons considéré des cellules exposées directement à l'air ($n_0=1$), non encapsulées et sous une incidence normale. (Les réflexions multiples n'ont pas été prises en considération dans les calculs).

Pour cela, nous avons cherché la meilleure configuration qui permet d'aboutir à la plus faible réflectivité et à une transmission maximale en fonction de l'épaisseur des différentes couches.

A rappeler que sous incidence normale ($\theta_i=0$), une SCAR de SiN ($n=2.03$)- ayant une épaisseur de 75nm déposée sur un substrat de silicium d'indice $n=3.94$ - permet de réduire la réflectivité de la surface de 39% à 12% [7].

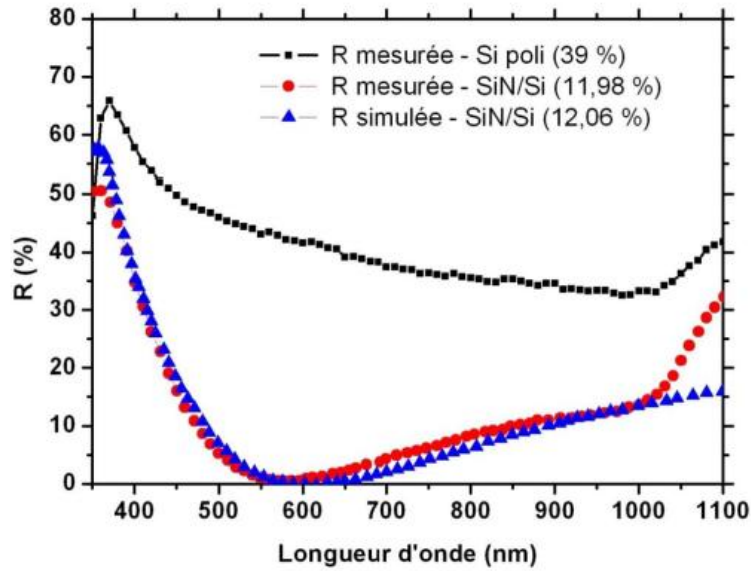


Figure IV-14 : Comparaison entre les résultats de réflectivité simulée et mesurée pour un substrat de silicium recouvert ou non de SiN ($R=NH_3/SiH_4=5$, $n=2.03$) [7].

Les pertes par réflexion sont importantes pour les petites et grandes longueurs d’ondes (UV et IR). La réflectivité est fortement réduite dans la gamme du visible.

La figure ci-dessous représente la face avant des cellules simulées telle qu’utilisée dans la simulation :

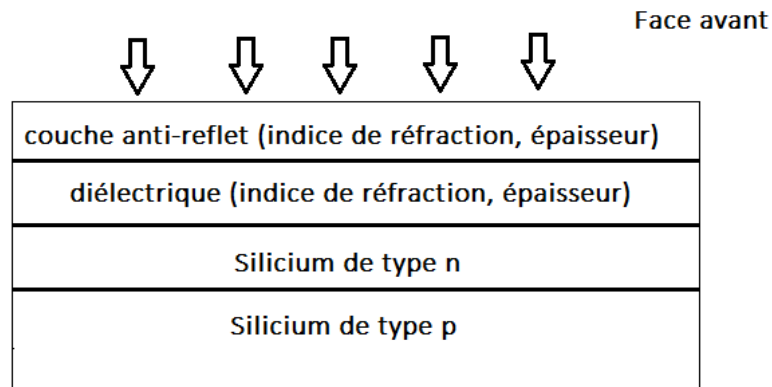


Figure IV-15: Face avant de la cellule telle que utilisée dans la simulation

Le tableau IV-10 réunit les diélectriques utilisés avec leur indice de réfraction (à 620 nm) et leur énergie de gap :

Couche diélectrique	Indice de réfraction (à 620 nm)	Energie de gap (eV)
Al ₂ O ₃	1.65	8.8
HfO ₂	2.10	5.6
SiO ₂	1.47	9
TiO ₂	2.60	3.1

Tableau IV-10 : Indices de refraction et Energies de gap des oxydes utilisés dans la simulation [8],[9],[10].

Nous avons commencé par calculer les réflectivités en fonction des différentes épaisseurs de la couche antireflet et celle de la couche diélectrique. Puis, nous les avons représentées. (Voir figure IV-20).

III.1 Résultats

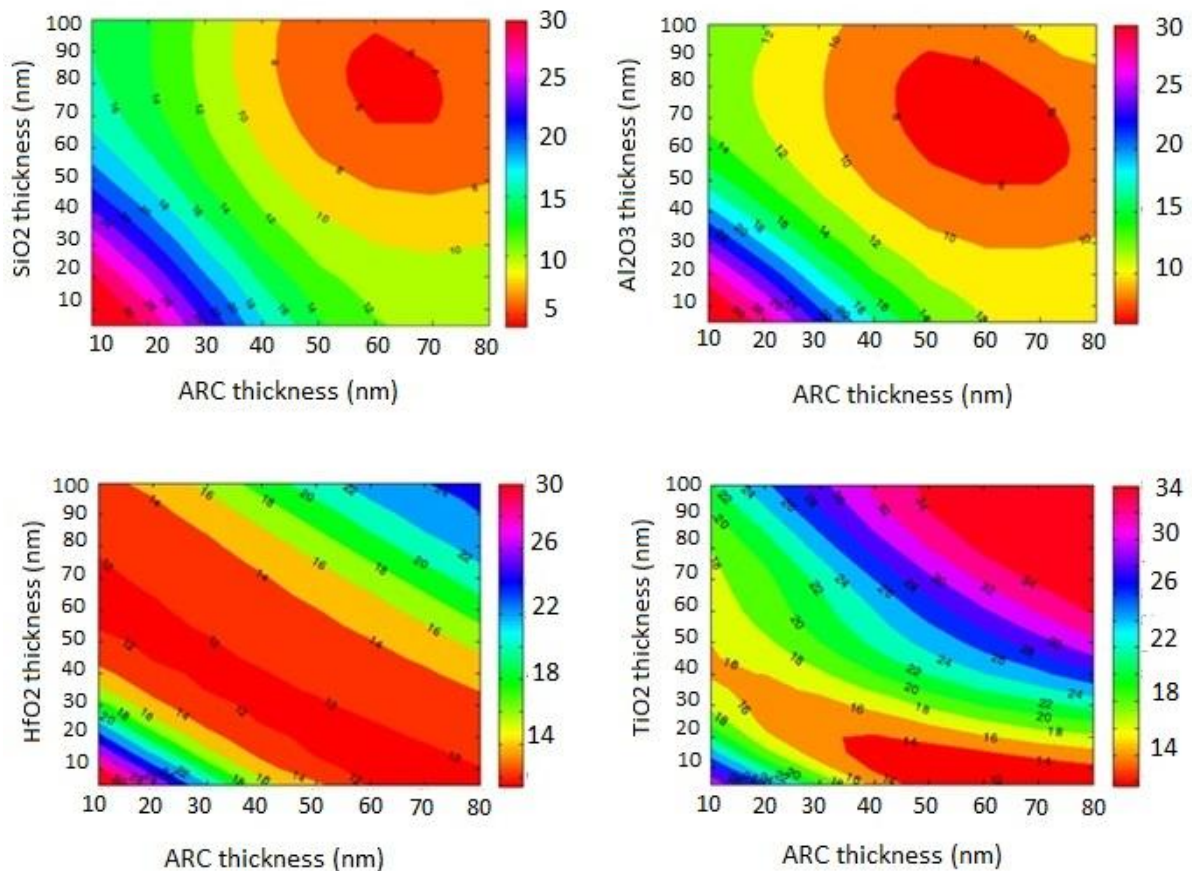


Figure IV-16: Réflectivité en fonction des épaisseurs de la simple couche anti-reflet et du diélectrique

Le tableau IV-17 englobe les durées de vie et les vitesses de recombinaison (prises de la littérature)- utilisées dans la simulation-pour chaque oxyde en fonction de son épaisseur et de la technique de dépôt.

Couche diélectrique	épaisseur	Technique de dépôt	τ_{eff} (μs) pour $\Delta n = 5.10^{15}$	S_{eff} (cm/s)	S_{eff} (cm/s) (prise de la littérature)
SiO ₂ [11]	20nm	T-ALD	324	31	10 - 70
SiO ₂ [11]	20nm	PECVD	36	277	80 - 400
Al ₂ O ₃ [11], [12]	15nm	T-ALD	613	17	5 - 30
Al ₂ O ₃ [11]	15nm	PE-ALD	3790	3	2 - 20
HfO ₂ [13]	10nm	ALD	650	55	/
TiO ₂ [14]	10nm	ALD	730	20	/

Tableau IV-11 : Tableau récapitulatif des durées de vie et des vitesses de recombinaison (prises de la littérature) utilisées dans la simulation

Les résultats obtenus sont injectés dans le programme silvaco/Atlas pour évaluer les caractéristiques électriques de la cellule simulée.

En fonction des épaisseurs des différentes couches (couche antireflet + diélectrique), nous avons calculé le courant de court circuit, la tension en circuit ouvert et le rendement de la cellule après avoir évalué les pertes optiques dues à la réflexion et à l'absorption.

III.1.1 Passivation avec de l'oxyde d'aluminium

Les pertes optiques -dues à la réflexion et à l'absorption sur la face avant de la cellule solaire simulée passivée avec Al₂O₃- sont évaluées et reportées dans la figure ci-dessous.

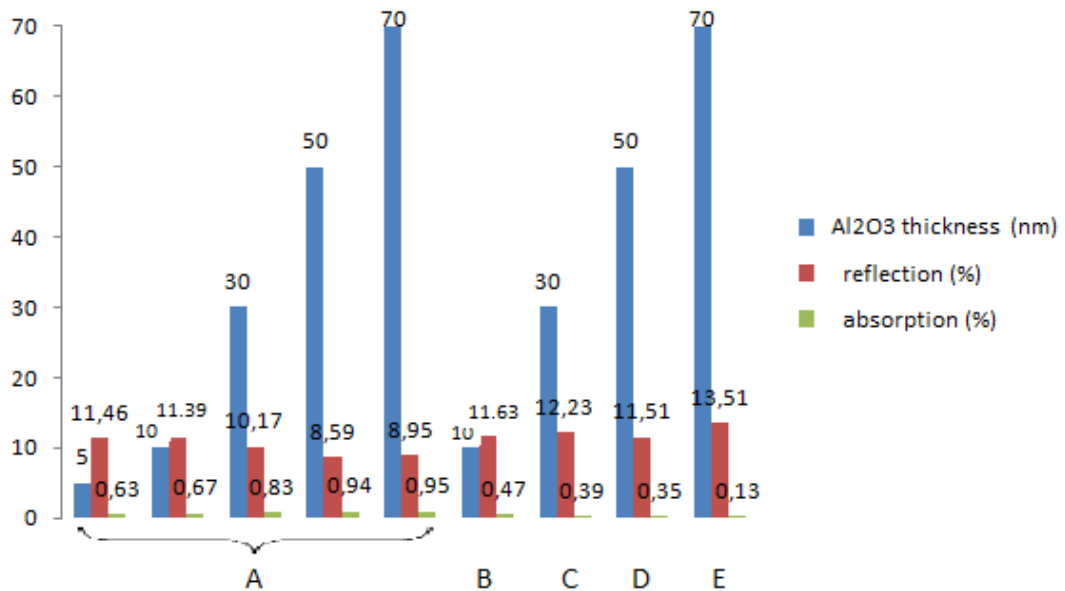


Figure IV-17: Pertes optiques de la cellule solaire simulée en fonction de la variation de l'épaisseur de Al₂O₃ et de l'épaisseur SiN_x (A: 80 nm, B: 60 nm C: 40 nm D: 30 nm et E: 10 nm).

Ensuite, les paramètres électriques, tels que le courant de court-circuit et l'efficacité des cellules solaires de la cellule solaire simulée, en fonction de la variation de l'épaisseur Al₂O₃ (couche diélectrique) et de l'épaisseur SiN_x (SARC) sont résumés dans la figure ci-dessous.

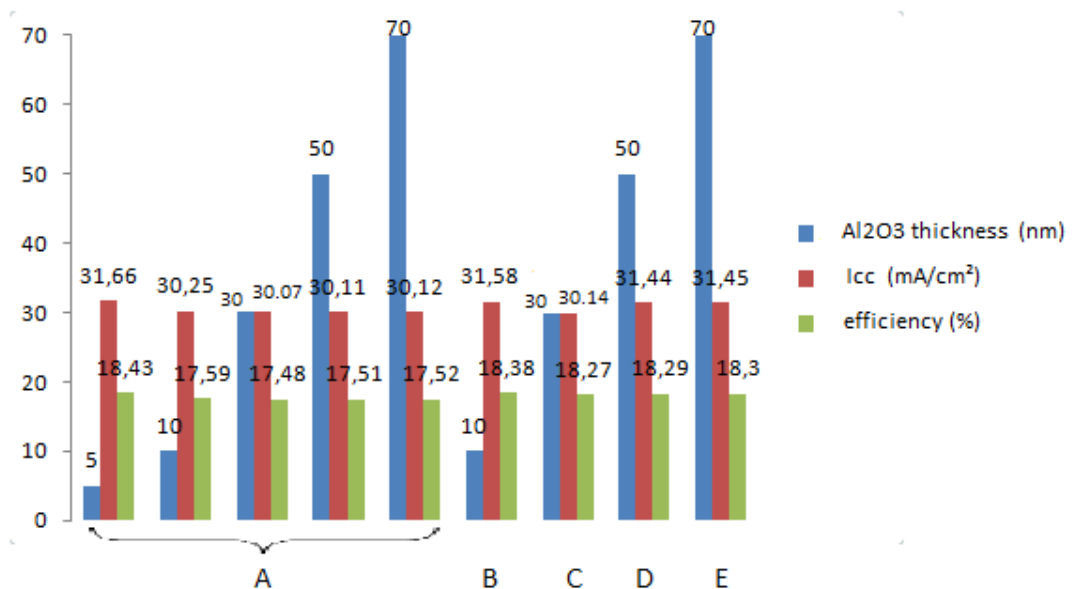


Figure IV-18: Paramètres électriques de la cellule solaire simulée en fonction de la variation de l'épaisseur de Al₂O₃ et de l'épaisseur SiN_x (A: 80 nm, B: 60 nm C: 40 nm D: 30 nm et E: 10 nm).

III.1.2 Passivation avec de l'oxyde d'hafnium

Les pertes optiques dues à la réflexion et à l'absorption ainsi que les paramètres électriques, tels que le courant de court-circuit et le rendement de la cellule solaire simulée passivée avec HfO_2 , sont évaluées et reportées dans la figure ci-dessous :

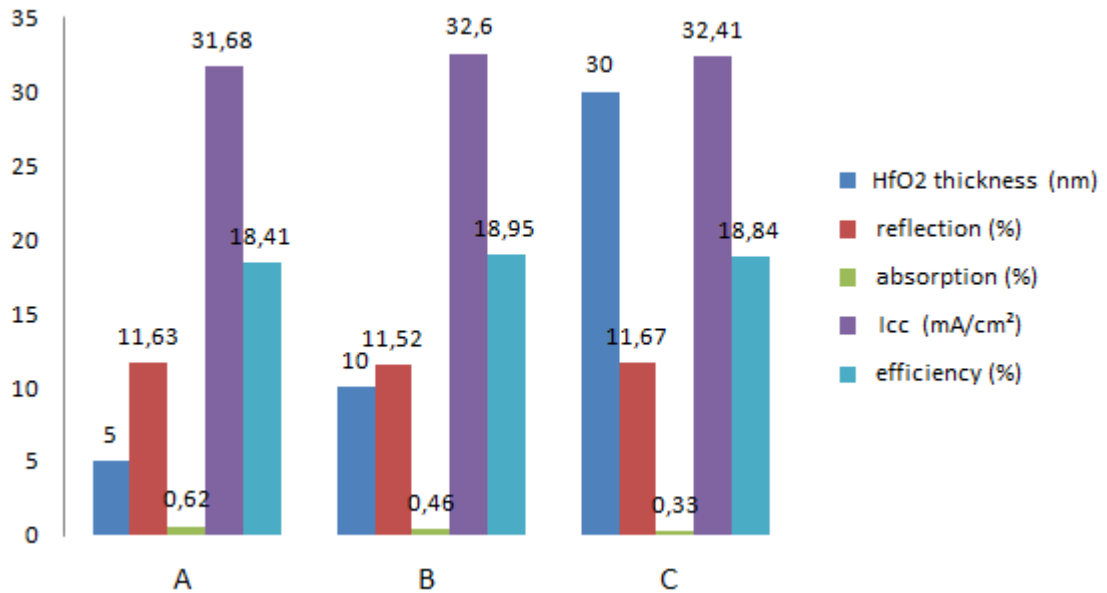


Figure IV-19: Variation des pertes optiques et des paramètres électriques de la cellule simulée avec la variation de l'épaisseur de HfO_2 (couche diélectrique) et de l'épaisseur SiNx (SARC) (A: 80 nm, B: 60 nm et C: 40 nm).

III.1.3 Passivation avec de l'oxyde de silicium

Les pertes optiques dues à la réflexion et à l'absorption ainsi que les paramètres électriques, tels que le courant de court-circuit et le rendement de la cellule solaire simulée passivée avec SiO_2 , sont évaluées et reportées dans la figure ci-dessous :

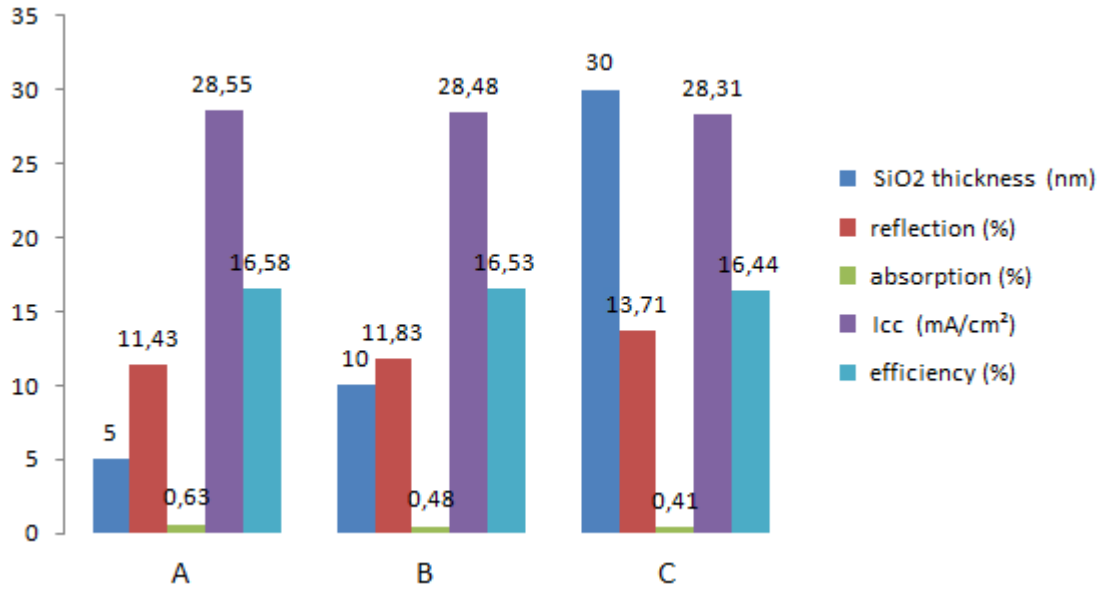


Figure IV-20: Variation des pertes optiques et des paramètres électriques de la cellule simulée avec la variation de l'épaisseur de SiO₂ (couche diélectrique) et de l'épaisseur SiNx (SARC) (A: 80 nm, B: 60 nm et C: 40 nm).

III.1.4 Passivation avec de l'oxyde de titane

Les pertes optiques dues à la réflexion et à l'absorption ainsi que les paramètres électriques, tels que le courant de court-circuit et le rendement de la cellule solaire simulée passivée avec TiO₂, sont évaluées et reportées dans la figure ci-dessous :

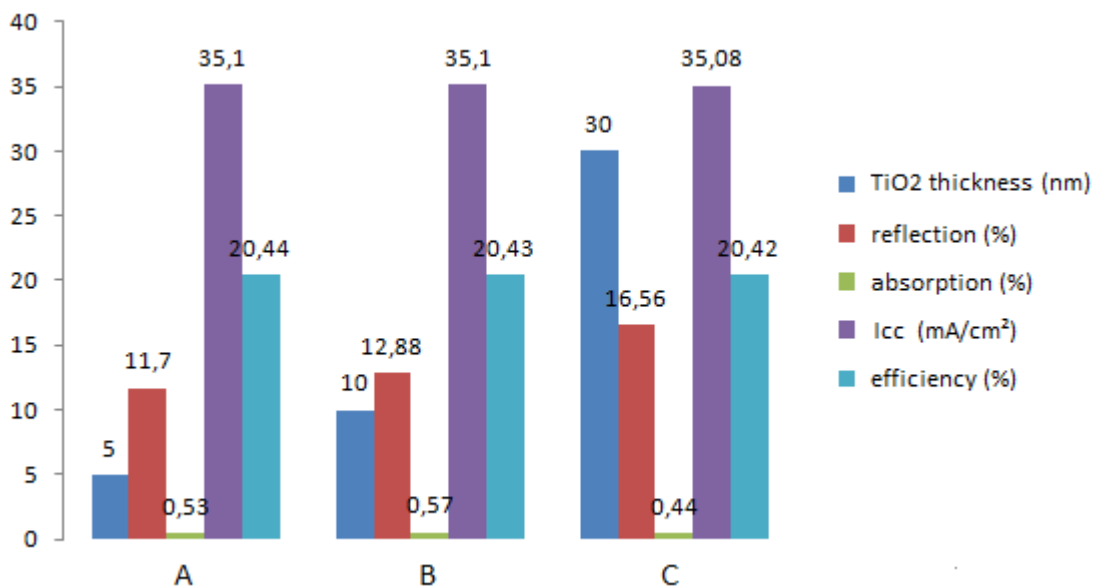


Figure IV-21: Variation des pertes optiques et des paramètres électriques de la cellule simulée avec la variation de l'épaisseur de TiO₂ (couche diélectrique) et de l'épaisseur SiNx (SARC) (A: 80 nm, B: 60 nm et C: 40 nm).

Le tableau IV-18 est un tableau récapitulatif qui englobe les différentes pertes par réflexion et absorption évaluées à partir d'un programme Matlab, injectées dans un programme Silvaco/Atlas pour calculer les paramètres électriques, tels que le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert et l'efficacité des cellules solaires de la cellule solaire simulée.

Dielectric oxide	oxide thickness (nm)	SiNx ARC thickness (nm)	Losses (%) by		I_{cc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	η (%)
			reflection	absorption			
/	/	80	10.32	0.59	32.32	0.68	18.51
Al ₂ O ₃	5nm	80	11.46	0.63	31.66	0.697	18.43
HfO ₂	10nm	60	11.52	0.46	32.60	0.696	18.95
SiO ₂	5nm	80	11.43	0.63	28.55	0.694	16.58
TiO ₂	5nm	70	11.70	0.53	35.10	0.699	20.44

Tableau IV-12 : Evaluation des caractéristiques optiques et électriques de la cellule simulée

III.2 Discussion

Pour optimiser le rendement des cellules solaires, nous avons commencé par ajuster l'épaisseur du revêtement antireflet unique (SARC) à l'épaisseur du diélectrique. Pour cela, un code de simulation numérique Matlab (développé dans notre équipe de recherche [8]) a été utilisé; la méthode de la matrice de transfert a été appliquée pour résoudre l'équation optique. Les solutions ont permis de représenter la réflectivité optique en fonction des longueurs d'onde et des épaisseurs de couches. L'indice de réfraction optique et l'épaisseur des matériaux considérés ont permis de simuler les propriétés électriques de la cellule en utilisant le logiciel TCAD (2D) / Silvaco Atlas. La base de données des indices de réfraction de chaque matériau utilisé dans la simulation en fonction de la longueur d'onde a été tirée de la littérature.

L'utilisation d'une couche de passivation sur la face avant de la cellule implique un compromis entre réflexion, absorption et passivation de surface. En effet, on peut voir que plus la couche diélectrique est épaisse, plus la recombinaison de surface est faible. Cependant, lorsque l'épaisseur de la couche diélectrique augmente, une grande partie du rayonnement est absorbée et donc perdue. Il est donc nécessaire de déterminer l'épaisseur optimale de la couche diélectrique qui peut passiver correctement le substrat. Ainsi, une fine couche de passivation doit conduire au meilleur compromis entre l'optique (absorption et réflexion) et les pertes électriques (recombinaison).

Pour Al_2O_3 , l'efficacité maximale obtenue était de 18,43% (inférieure à l'efficacité d'une cellule solaire en silicium multi-cristallin EWT de type p sans passivation de la surface avant). Les figures IV-26, IV-25 et IV-24 montrent la variation des pertes optiques (réflexion et absorption) et les paramètres électriques (courant de court-circuit et rendement des cellules solaires) de la cellule simulée en fonction des épaisseurs de différents diélectriques (HfO_2 , TiO_2 et SiO_2) et l'épaisseur de SiNx (SARC). Pour HfO_2 , de bonnes propriétés de passivation ont été trouvées. Pour une couche diélectrique de 10 nm d'épaisseur et un SARC de 60 nm d'épaisseur, le courant de court-circuit atteint était d'environ $32,6 \text{ mA} / \text{cm}^2$ et l'efficacité de conversion d'énergie d'environ 19%. Pour le SiO_2 , les paramètres électriques se dégradent, notamment le courant de court-circuit qui diminue d'environ $6,75 \text{ mA} / \text{cm}^2$. Cette dégradation est principalement provoquée par la diffusion de l'hydrogène atomique à l'interface SiO_2 -Si. A partir des résultats de la simulation, une telle dégradation ne peut s'expliquer que par l'augmentation du taux de recombinaison sur la face avant. Pour le TiO_2 , la tension en circuit ouvert avoisine 0,7 V, le courant de court-circuit obtenu dépasse $35 \text{ mA} / \text{cm}^2$ et un rendement de conversion d'énergie de 20,44% est atteint. Cette amélioration de l'efficacité peut s'expliquer par la diminution du taux de recombinaison à l'avant de la cellule.

La figure ci-dessous présente les résultats de simulation obtenus sur des cellules photovoltaïques à structure emitter wrap through passivées avec les différents diélectriques. On remarque qu'aux faibles longueurs d'ondes, la réponse spectrale révèle l'influence des

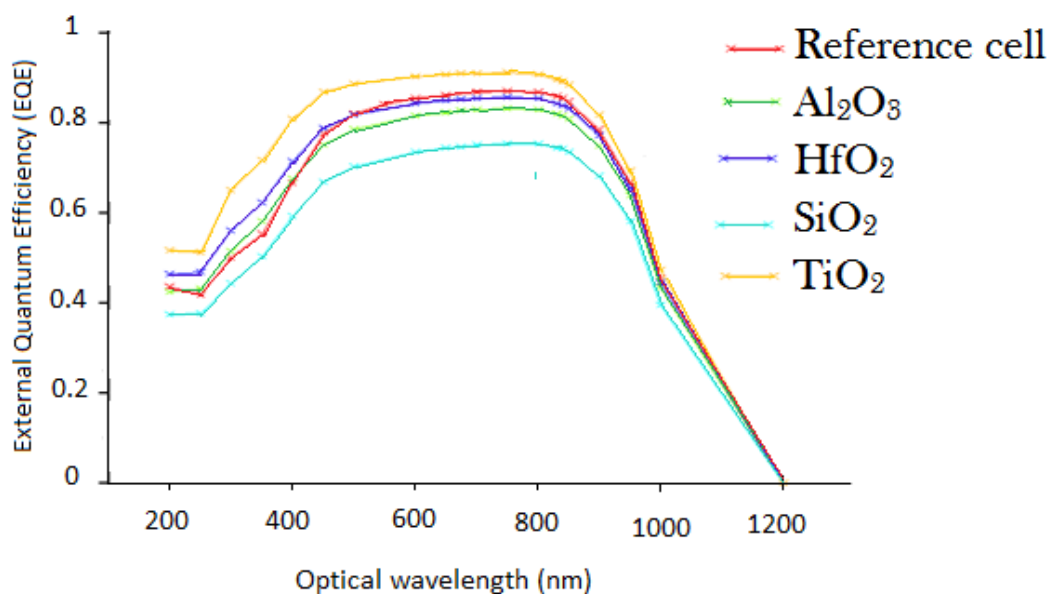


Figure IV-22: Variation du rendement quantique externe pour les différents oxydes utilisés

surfaces recombinantes. En effet, à ces longueurs d'ondes, les porteurs sont générés près de la surface et les pertes liées à la recombinaison en surface sont plus élevées. On peut d'ailleurs noter l'amélioration de la réponse spectrale après le dépôt de la couche diélectrique car celle-ci, en passivant la surface, atténue les recombinaisons en surface. Pour les longueurs d'ondes intermédiaires, la réponse spectrale caractérise la qualité du matériau.

Pour voir l'apport de la passivation face avant sur une cellule solaire avec une structure EWT, nous avons calculé le gain, c'est-à-dire nous avons évalué l'aire du domaine compris entre les deux courbes, l'une rouge représentant le rendement quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour la cellule solaire de référence (avec une structure EWT sans passivation) et l'autre jaune qui représente le rendement quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour la cellule solaire avec une structure EWT et une passivation TiO_2 . La méthode utilisée est celle des trapèzes.

Rappelons que l'aire d'un trapèze est donnée par :

$$S = \frac{(\text{Grande Base} + \text{Petite Base}) * \text{Hauteur}}{2} \quad \text{Eq IV-1}$$

Sachant que l'approximation de l'aire sous la courbe est :

$$\sum_{i=1}^n S_i : \text{la somme des aires des trapèzes}$$

et si S_1 est la somme des aires des trapèzes sous la courbe rouge et si S_2 est la somme des aires des trapèzes sous la courbe jaune, alors le gain relatif est donné par le rapport :

$$\beta = \frac{\Delta S}{S_2} \quad \text{Eq IV-2}$$

Alors on trouve après calcul:

$$\beta \cong 30\%$$

Ce résultat montre que, par rapport à une cellule conventionnelle, une passivation avec 5nm de TiO_2 , nous permet de récolter 30% de photons en plus, qui peuvent, si la qualité du matériau le permet, arriver jusqu'à la face arrière pour être collectés.

Conclusion

Durant ce travail, nous avons utilisé le simulateur ATLAS de Silvaco pour modéliser les performances des cellules solaires de type EWT au silicium multi cristallin. Le simulateur permet la simulation des dispositifs à semi-conducteurs d'un point de vue électrique, optique, et même le comportement thermique par la méthode des éléments finis. Les simulations effectuées au cours de cette thèse donnent un aperçu précieux des mécanismes physiques importants pour la performance des cellules solaires de type EWT au silicium multi cristallin et donc aussi les règles de conception qui doivent être prises en compte dans la production industrielle d'une telle cellule solaire. Le programme ainsi élaboré a permis d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule afin de minimiser les pertes et d'obtenir un rendement maximal. Parmi ces paramètres, on cite :

- Les niveaux et profils de dopage (substrat, émetteur et BSF)
- Les paramètres géométriques des régions diffusées
- Longueur de diffusion et épaisseur du substrat
- Les taux de recombinaison (face avant et arrière) et durée de vie des porteurs minoritaires
- Les fractions de surface contact métal/semi-conducteur

Un module solaire en silicium multi cristallin disponible sur le marché est typiquement en plaquettes carrées de 5 pouces avec une épaisseur d'environ 200 μm . Mais ceci est trop grand pour obtenir une précision satisfaisante lors de la simulation du dispositif par la méthode des éléments finis. Nous avons donc considéré la plus petite unité récurrente de notre dispositif, une cellule dite unité, représentée par la figure IV-2 ; étant entendu que la cellule solaire de type EWT est représentée par la figure IV-1. Les simulations de cellules unitaires donnent un aperçu du comportement de la zone active de la cellule solaire. Le maillage doit être suffisamment dense pour que la précision des calculs soit à un niveau satisfaisant, tout en fonctionnant efficacement et prévenir les temps de calculs inutilement longs. Le maillage est optimisé en répétant des calculs avec une séquence de mailles plus fines.

Une autre partie de la simulation concerne l'effet de passivation de surface dans le but de réduire l'activité recombinante des défauts présents en surface ou dans le volume du matériau. Pour assurer cette passivation, des matériaux sont déposés en couches minces sur la face avant des cellules photovoltaïques, et visent à « guérir » les défauts présents en

surface du silicium. A partir des propriétés optiques (indice de réfraction n , coefficient d'absorption k , épaisseur) et des propriétés de passivation (durée de vie et longueur de diffusion des porteurs minoritaires, vitesses de recombinaison en surface) des films minces déposés, nous avons évalué les pertes par réflexion et absorption à travers ces couches.

Les paramètres électriques, tels que le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert et le rendement des cellules solaires de la structure simulée sont évalués en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche déposée. La simulation a montré qu'un dépôt d'une couche de 5nm de TiO_2 par la méthode ALD a permis d'obtenir une tension en circuit ouvert qui avoisine 0,7 V, un courant de court-circuit qui dépasse 35 mA / cm^2 et un rendement de conversion qui a atteint 20,44%.

Bibliographie du chapitre IV

- [1] N. Oleksiy, *Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités*, Thèse de Doctorat, 2005
- [2] Raphaël LACHAUME, *Contribution à la caractérisation électrique et à la simulation numérique des cellules photovoltaïques silicium à hétérojonction*, Université De Grenoble, 2006, Thèse de Doctorat
- [3] Djicknoum DIOUF, *Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière*, Université Paris-Sud 11, 2010, Thèse de Doctorat
- [4] Valérie AUFFRAY, *Etude comparative de schémas numériques pour la modélisation de phénomènes diffusifs sur maillages multiéléments*, Institut National Polytechnique De Toulouse, 2007, Thèse de doctorat
- [5] Răzvan NEGRU, *Conception et modelisation de pixels de photodetection*, Ecole polytechnique, 2008, Thèse de Doctorat
- [6] Fabrice DE MORO, *Développement d'une filière silicium cristallin en rubans minces*, programme de l'ADEME, www.ademe.fr/invest-avenir
- [7] N. SAHOUANE, *Elaboration, Modélisation et Caractérisation des Cellules Solaires de type IIIème Génération dotées de Couches Antireflets à Indice Graduel*, Université Abou Bekr Belkaïd, Thèse de Doctorat, 2016.
- [8] G. Dingemans, W.M.M. Kessels, *Aluminum oxide and other materials for Si surface passivation*, ECS Transactions Vol 41 (2) 293-301, 2011
- [9] Vincent EDON, *Dépôt d'oxydes de grille par pulvérisation cathodique magnétron : corrélation entre les propriétés du plasma et celles des films déposés*, Université Paris-Sud, 2007, Thèse de Doctorat
- [10] Maciej Wolborski, *Characterization of Dielectric Layers for Passivation of 4H-SiC Devices*, Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm Sweden, 2006, Thèse de doctorat
- [11] R. Kotipalli, R. Delamare, O. Poncelet, X. Tang, L.A. Francis, and D. Flandre, ICTEAM, Université catholique de Louvain, Belgium, *Passivation effects of atomic-layer-deposited aluminum oxide*, EPJ Photovoltaics 4, 45107, 2013
- [12] Jan Schmidt et al, *Atomic-Layer-Deposited Aluminum Oxide For The Surface Passivation Of High-Efficiency Silicon Solar Cells*, 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, CA, USA, USA, 2008

- [13] Karen Dabertrand, Croissance de diélectrique à forte permittivité par la technique MOCVD en phase liquide pulsée : Elaboration, et caractérisation de films de HfO₂, Université Joseph Fourier, 2007, Thèse de Doctorat
- [14] Bryce S. Richards, *High Temperature Processing of TiO₂ Thin Films for Application in Silicon Solar Cells*, Journal Of Vacuum Science And Technology A, 22 (2004), 339- 348

Conclusion générale et perspectives

La production mondiale d'énergie photovoltaïque augmente de façon importante depuis plusieurs années, mais son développement reste limité par son coût élevé par rapport aux énergies dites conventionnelles : fossiles et nucléaires.

Mais dans un souci d'augmenter le rendement des cellules photovoltaïques et diminuer leur coût, plusieurs alternatives ont été présentées.

Le travail présenté dans cette thèse concerne les cellules photovoltaïques à émetteurs enterrés qui – par rapport aux cellules conventionnelles ayant les contacts sur les faces avant et arrière – présentent les avantages suivants : pas de taux d'ombre dû aux métallisations sur la face avant, les principales étapes de fabrication de la cellule type EWT standard sont réalisées sur la face arrière (seule la couche anti reflet est réalisée sur la face avant).

Néanmoins, pour la « conception » de ces cellules, il est nécessaire d'avoir recours à la sérigraphie qui – actuellement- est la méthode la plus utilisée dans l'industrie photovoltaïque, en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son bas coût.

Afin d'optimiser les structures EWT, nous avons utilisé le logiciel à deux dimensions Atlas de Silvaco pour simuler numériquement leurs rendements de conversion en fonction de différents paramètres à savoir des paramètres géométriques ainsi que les profils de dopage.

Après avoir exposé les méthodes et les modèles physiques utilisés dans la simulation, et sachant que les recombinaisons en surface et dans le volume sont des paramètres qu'il faut minimiser, nous avons passivé la face avant des cellules EWT par plusieurs diélectriques (oxydes) et avons optimisé leurs épaisseurs – étant entendu qu'un compromis entre l'optique (absorption et réflexion) et les pertes électriques (recombinaisons) doit être trouvé.

Le meilleur rendement a été trouvé avec une couche de TiO_2 (indice de réfraction $n=2.6$ pour $\lambda=620\text{nm}$) de 80nm d'épaisseur atteignant les 20,5%.

En conclusion, Atlas est un outil très puissant pour simuler des cellules solaires au silicium. Dans ce travail, nous avons créé un modèle précis pour simuler des cellules « emitter wrap through » au silicium multi cristallin. A partir de maintenant, ce modèle peut être utilisé pour optimiser chaque paramètre de la cellule.

En perspective, il serait d'abord intéressant de faire des analyses supplémentaires concernant l'influence des paramètres d'élaboration des couches minces déposées (épaisseur, porosité, oxydation, hydrogénisation).

Puis, il serait plus avantageux de voir l'effet de la passivation de surface avec d'autres oxydes (mis à part les oxydes binaires) tels que les oxydes ternaires par exemple et qui reposent essentiellement sur les composés binaires déjà cités tels que HfO_2 , ZrO_2 ou encore La_2O_3 , combinés aux silicates (SiO_2) ou aux aluminates (Al_2O_3). Le plus étudié dans la littérature est le silicate $\text{Hf}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$ ou encore l'aluminate de lanthane LaAlO_3 .

Ensuite, il serait judicieux de faire la même étude sur un substrat de type n. En effet, le silicium de type p est très sensible aux contaminations métalliques lors des procédés d'élaboration métallurgiques, ce qui engendre la création de nombreux centres de recombinaison (pièges) en son sein et donc des durées de vie de porteurs en volume plus faibles que celles obtenues sur du silicium de type n. C'est pourquoi, les perspectives de développement des cellules solaires au silicium s'orientent de plus en plus vers des cellules de type n. Le besoin d'un rendement de conversion élevé, ajouté à la réduction des coûts de fabrication lors de procédés métallurgiques, en font un excellent candidat. De plus le silicium de type n, est moins sensibles aux dommages induits par le laser.

Enfin, lors de l'exécution des simulations des cellules solaires, l'augmentation de la température n'a pas été prise en compte. C'est-à-dire que nous avons exécuté les simulations à température ambiante (300 K), ce qui est la valeur par défaut dans Atlas. Cependant, il serait intéressant d'inclure le comportement thermique dans les simulations, c'est-à-dire étudier la distribution de chaleur dans un échantillon de silicium après une impulsion laser.

Annexes

I. Le logiciel de simulation ATLAS de Silvaco

Dans le but d'économiser le temps et le coût de développement, et pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs électriques, des simulateurs TCAD (de l'anglais « Technology CAD » (branche de la CAO : Conception Assistée par Ordinateur)) électroniques tels que SILVACO, ISE, SYNOPSIS... permettent la modélisation du comportement physique et électrique d'un composant électronique.

Le logiciel ATLAS appartient à la famille de logiciels Silvaco, de la société Américaine « Silvaco International » ayant son siège social à Santa Clara. Cette société est un fournisseur de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (*Technology Computer Aided Design*). Ces outils sont utilisés par les compagnies de microélectronique pour la recherche, le développement et la conception de dispositifs à base de semi-conducteurs.

Le logiciel Atlas de Silvaco satisfait à l'exigence de pouvoir travailler en deux dimensions (et même à trois) et donc a été utilisé pour ce travail. Dans ce chapitre, nous présenterons le logiciel de simulation TCAD-SILVACO, son principe de fonctionnement, et son module de simulation : ATLAS pour la simulation du comportement électrique de la cellule EWT à base de silicium multi cristallin.

I.1. Présentation du paquet des programmes Silvaco

Sous Silvaco, l'ensemble des outils de simulation et des outils interactifs permettant la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs semi-conducteurs s'appellent VWF (*Virtual Wafer Fabrication*). Les composants de base de VWF sont :

I.1.1. Les outils de simulation (*VWF core tools*)

Ces outils permettent de simuler les processus de fabrication ou les comportements électriques des dispositifs. Les outils de simulation sont :

- SSUPREM3 : simulateur de procédé 1D avec prolongements simples de simulations des dispositifs.
- ATHENA : simulateur 2D de procédés technologiques qui permet de simuler les différentes étapes effectuées en salles blanches et ainsi d'obtenir la structure du dispositif (couches constitutives, dimensions, géométrie) avec les profils de dopage.
- ATLAS : simulateur 2D ou 3D de dispositifs semi-conducteurs qui permet d'obtenir leurs caractéristiques électriques (statiques ou dynamiques).

I.1.2. Les outils interactifs (*VWF interactive tools*).

Ces outils sont conçus pour être utilisés en mode interactif dans la construction d'un seul fichier d'entrée. En étant basé sur une interface utilisateur qui est graphique (*Graphical User Interface, GUI*), le travail de construction du fichier d'entrée devient plus efficace. Les outils interactifs peuvent être utilisés soit en relation avec un ensemble de fichiers, ou comme des composants intégrés dans l'environnement « *VWF automation tools* ». Les outils interactifs sont :

- TonyPlot : outil de visualisation et d'analyse graphique 1D et 2D des résultats de simulations.
- Manager : outil de gestion des fichiers utilisés et créés par VWF.
- MaskViews : outil de dessin des masques (*layouts*).
- DeckBuild : environnement d'exécution interactif qui permet la simulation des processus et de dispositifs. Il est l'interface avec les outils de simulation.
- DevEdit : outil d'édition de structure qui permet de créer des nouvelles structures ou même de modifier des structures existantes. Cet outil permet de raffiner les maillages existants ou de définir de nouveaux maillages.
- Optimiseur : outil d'optimisation automatique
- SPDB (Semiconductor Process Data Base) est un produit séparé qui peut être utilisé avec DeckBuild. Il a été conçu pour stocker un grand nombre de profils de dopage mesurés expérimentalement avec les données décrivant les conditions expérimentales.

I.1.3. Les outils d'automatisation (*VWF automation tools*)

Ces outils permettent à l'utilisateur d'exécuter sur une grande échelle des études expérimentales pour créer des résultats pour une analyse statistique ultérieure. Ces outils automatiques utilisent la technologie des bases de données et les méthodes des logiciels de transmissions entre processus.

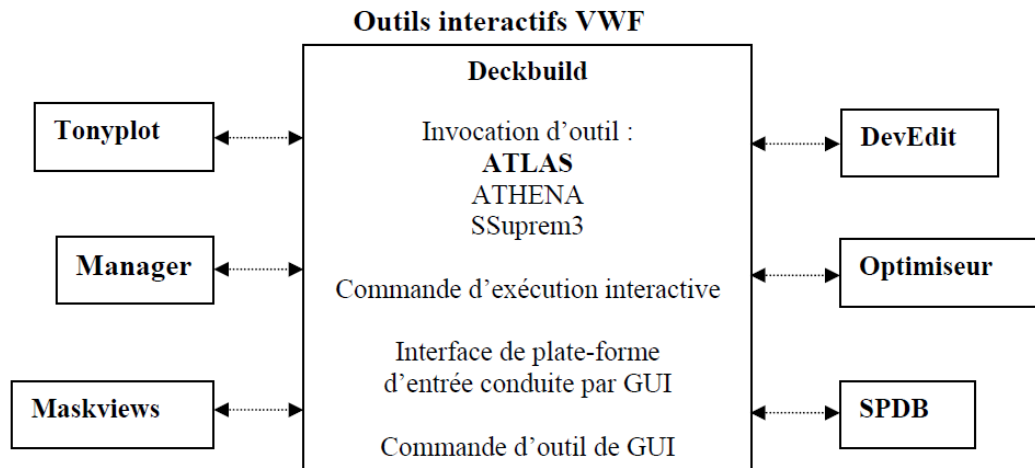


Figure 3.1 : Organigramme de la structure VWF

Dans le paragraphe suivant, l’outil de simulation «ATLAS» que nous avons utilisé principalement pour effectuer les simulations de cellules photovoltaïques interdigitées est décrit.

I.2. Description du simulateur ATLAS

ATLAS est un simulateur 2D ou 3D des dispositifs basés sur la physique de semi-conducteurs. Il prédit le comportement électrique de dispositifs à base de semi-conducteurs et fournit des informations sur les mécanismes physiques internes associés au fonctionnement des dispositifs [3.2]. ATLAS peut être utilisé de façon autonome ou comme noyau dans l’environnement VWF de SILVACO. La figure 3.1 nous donne les différentes interconnexions dans l’environnement VWF de SILVACO.

La figure 3.2 représente les types d’informations qui circulent en entrée et en sortie « d’ATLAS ». Les simulations réalisées par «ATLAS» utilisent en général deux fichiers d’entrée.

- un fichier d’entrée texte (*.in) qui contient les commandes à exécuter et est appelé fichier de commande.
- un fichier structure (*.str) qui définit la structure à simuler qui peut être réalisé avec ATHENA ou avec DevEdit.

DECKBUILD est le logiciel d’environnement utilisé pour construire le fichier de commande (*.in) et pour réaliser la simulation électrique.

Le fichier structure contient des informations concernant principalement : la géométrie de la structure, les matériaux utilisés, les niveaux et profils de dopage, les électrodes et le maillage.

ATLAS fournit trois types de fichiers de sortie.

- les Fichiers de type « .log » qui contiennent les caractéristiques électriques simulées correspondant à la structure et aux conditions de polarisations imposées.
- les fichiers de type « .str » qui contiennent la structure 2D ou 3D et les valeurs de certains paramètres (ex : champ électrique, potentiel, densité de courant.....)
- « runtime output » qui donne les informations sur le déroulement de la simulation.

Les fichiers .log et .str sont traités avec l’outil de visualisation TONYPLOT mais les valeurs numériques peuvent être exportées et traitées avec des logiciels plus connus comme Excel.

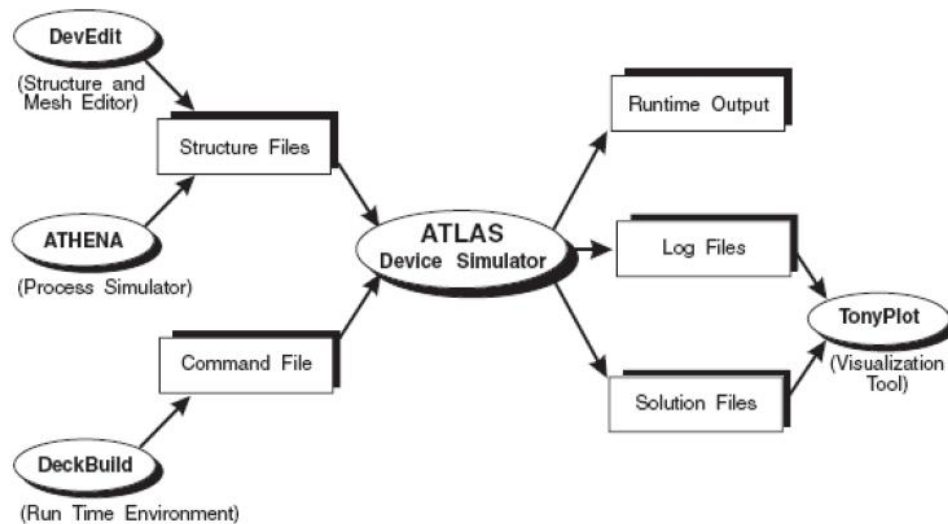


Figure 3.2 : Entrées et sorties d’Atlas

I.3. Modules d’ATLAS

Le logiciel ATLAS comprend plusieurs modules qui permettent de simuler différents dispositifs à base de semi-conducteurs. Ces modules permettent de se mettre dans des conditions optimales en utilisant des modèles physiques adéquats pour chaque cas étudié.

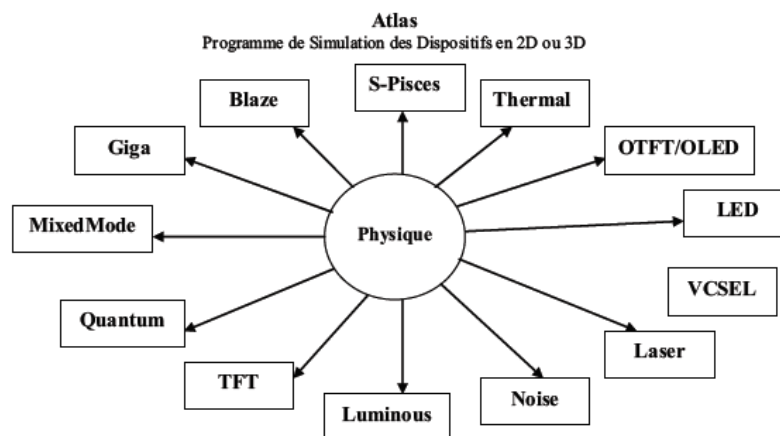


Figure 3.3 : Les composants ou les modules d'Atlas

Une description des différents modules montre les différentes possibilités qu'offre ATLAS :

- **Blaze** est un simulateur de dispositifs 2D ou 3D pour les matériaux III-V, II-VI et de dispositifs avec hétérojonctions. Ce module permet de définir les conditions de mise en contact de deux matériaux différents. Blaze est applicable à une large gamme des dispositifs tels HBT (Heterojonction Bipolar Transistor), HEMT (High Electron Mobility Transistor), LED (Light Emitting Diode), cellules photovoltaïques à hétérojonctions et diodes à hétérojonction.
- **TFT** permet de simuler les matériaux désordonnés. « TFT » nous permet de définir une distribution des états de défauts dans la bande interdite du semi-conducteur. Ce module permet un bon traitement des propriétés électriques des matériaux désordonnés comme le silicium poly cristallin ou le silicium amorphe.
- **Luminous** calcule les profils d'intensités optiques dans les dispositifs à base de semi-conducteurs et les convertit en taux de photo génération. Cela permet de simuler les caractéristiques courant-tension $I(V)$ et connaître les performances des cellules photovoltaïques.
- **S-Pisces** est un programme de simulation des dispositifs 2D ou 3D. Il modélise les caractéristiques électriques des dispositifs à base de silicium en incluant des technologies MOS (*Metal Oxide Semiconductor*), SOI (*Silicon On Insulator*), EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*) et des dispositifs de puissance. S-Pisces calcule les distributions internes des paramètres physiques et prévoit le comportement électrique des dispositifs à l'état d'équilibre, transitoire ou dans les conditions de courant alternatif de petit signal.
- **Mixedmode** emploie des algorithmes numériques avancés qui sont efficaces et robustes pour des simulations en courant continu, en régime transitoire ou en régime alternatif et de l'analyse de réseau de petits signaux. « MixedMode » est typiquement employé pour simuler des circuits qui contiennent des dispositifs à base de semi-conducteur. La logique de programmation pour spécifier les circuits est de type spice.
- **Noise** permet de simuler le bruit produit par les dispositifs. Le bruit électronique a comme conséquence une dégradation inévitable des performances d'un circuit. Il est important de comprendre les propriétés du bruit pour réduire au minimum son effet.

- **Laser** effectue une simulation couplée électrique et optique des lasers à base de semi-conducteurs.
- **VCSEL** «*Vertical Cavity Surface Emitting Lasers*» effectue la simulation électrique, thermique et optique des lasers d'émission surfacique de cavité verticale en utilisant des méthodes numériques robustes, et fiables avec des mailles non uniformes.
- **LED** fournit des possibilités générales pour la simulation des dispositifs de diode électroluminescente.
- **OTFT/OLED** : « OTFT » simule les caractéristiques des dispositifs réalisés en matériaux organiques (caractéristiques électriques et optiques en courant continu ou transitoire de ceux-ci). « OLED » simule des densités d'excitation singlet et triplet.
- **Thermal** résout l'équation de la chaleur à l'équilibre thermodynamique pour trouver la distribution de la température à l'équilibre en structures 3D planaires et non planaires.

Pour notre étude de cellules photovoltaïques type EWT à base de silicium multi cristallin, le module utilisé est « Luminous ».

I.4. Syntaxe d'un programme ATLAS

Pour la structure du programme ATLAS, il faut respecter un ordre propre à la logique de programmation. Le fichier d'entrée « *.in » est constitué d'une succession de commandes qui seront exécutées par le simulateur. Ce fichier peut être construit dans la fenêtre Deckbuild en utilisant éventuellement le menu *Deckbuild Commands*. Une commande en ATLAS a la forme suivante :

<COMMANDE> <paramètre>=<valeur>

Exemple : **DOPING** uniform p.type conc=1e16 num=1

(uniform et p.type étant des paramètres ayant une valeur logique)

L'ordre des commandes dans le fichier d'entrée est très important. Le respect de cet enchaînement est indispensable pour permettre à ATLAS de prendre en compte correctement tous les modèles spécifiés. Il y a cinq groupes de commandes présentés dans le tableau ci-dessous :

Groupe	Commandes
Description de la structure	MESH REGION ELECTRODE DOPING
Matériaux et modèles	CONTACT MATERIAL INTERFACE DEFECTS BEAM MODELS
Sélection de la méthode numérique	METHOD
Obtenir la solution	LOG LOAD SOLVE SAVE
Analyse des résultats	EXTRACT TONYPLOT

Figure 3.3: *Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas*

Le fichier de commandes doit commencer par la description de la structure qu'on veut simuler, c'est-à-dire : le maillage (MESH), l'emplacement de chaque matériau (REGION), les électrodes (ELECTRODE) et le dopage (DOPING).

Par la suite, les modèles physiques qui vont être utilisés durant la simulation (voir la commande MODELS) doivent être spécifiées. Il est également de possible d'imposer des valeurs à certains paramètres qui caractérisent les matériaux (MATERIAL), les contacts (CONTACT) et les interfaces (INTERFACE).

L'étape suivante consiste à choisir les méthodes numériques qui seront utilisées dans la simulation. Pour obtenir les caractéristiques électriques, on utilise la commande SOLVE.

Cette commande SOLVE permet d'imposer des conditions de polarisation sur les différentes électrodes et de calculer les courants à travers les électrodes suivant la polarisation. Les résultats de simulation (courant en fonction des polarisations) seront enregistrés dans des fichiers type « .log » et « .str », en utilisant respectivement les commandes LOG et SAVE.

Les commandes les plus utilisées sont décrites ci-dessous:

- MESH définit un maillage à la structure simulée ou permet de faire appel à un maillage défini précédemment.

Exemple:

```
#x.mesh
```

```
x.mesh loc=0 spac=0.1
```

```
x.mesh loc=0.5 spac=0.1
```

```
#y.mesh
```

```
y.mesh loc=-0.08 spac=0.02
```

```
y.mesh loc=0 spac=0.1
```

- REGION définit chaque région de la structure. Cette commande permet non seulement de définir spatialement une région donnée mais aussi d'indiquer le matériau se trouvant dans cette région donnée.

Exemple:

```
region num=1 x.min=0 x.max=2000 y.min=-0.08 y.max=0 material=SiN
```

```
region num=2 x.min=0 x.max=2000 y.min=0 y.max=0.5 material=silicon
```

- ELECTRODE permet de définir la position d'une électrode et éventuellement le matériau qui la forme.

Exemple:

```
electrode name=cathode material=silver x.min=80 x.max=120 y.min=200 y.max=210
```

```
electrode name=anode material=aluminum x.min=0 x.max=200 y.min=200/  
y.max=210
```

- DOPING permet de définir un type, une concentration et un profil de dopage pour une région donnée de la structure.

Exemple:

```
doping uniform p.type concentration=1e18 x.min=0 x.max=2000 y.min=0.5/  
y.max=200
```

```
doping erfc n.type peak=0 junction=0.5 concentration=2e20 y.min=0 y.max=200
```

- CONTACT spécifie le type de contact. Par défaut le contact est ohmique. Un contact Schottky peut être défini aussi en spécifiant le travail de sortie du métal et en introduisant des modèles de recombinaison de surface adéquates.

Exemple:

```
contact name=anode workfun=5.23
```

```
contact name=cathode workfun=4
```

- MATERIAL permet de définir des paramètres propres associés à chaque matériau tels que le bande interdite, la permittivité, la mobilité des porteurs. Dans ATLAS, les paramètres par défauts de plusieurs matériaux sont déjà implémentés.

Exemple:

material region=1 index.file=c-Si_nk.txt

material region=2 index.file=Ag_nk.txt

material region=3 index.file=Al_nk.txt

- INTERFACE permet de définir les paramètres associés à l'interface de deux régions. Ces paramètres sont appliqués à l'interface.

Exemple:

*interface optical material=SiN ar.index=2.05 ar.thick=0.08 x.min=0 x.max=2000/
y.min=-0.08 y.max=0*

- DEFECTS active le modèle de défauts dans la bande interdite.

Exemple:

Defects DFILE=donors AFILE=acceptors

- BEAM indique un signal d'entrée optique sous forme d'un faisceau de lumière monochromatique ou poly chromatique. Le faisceau ainsi défini est activé avec la commande SOLVE. BEAM est utilisé pour calculer des courants sous lumière ou des réponses spectrales.

Exemple:

*beam num=1 x.origin=2000 y.origin=-30 angle= 90.0 power.file=cdrom.spec/
reflects=1 quantum.eff=1.0*

- MODELS spécifie les modèles physiques utilisés et la température globale de la structure.

Exemple:

models conmob fldmob srh auger

- METHOD permet de choisir les méthodes numériques à employer pour résoudre les équations et aussi de choisir les paramètres liés à ces algorithmes.

Exemple:

method newton

- LOG permet d'enregistrer toutes les caractéristiques électriques calculées par ATLAS dans un fichier de type « .log ». Suivant le régime (continu, alternatif ou transitoire),

toutes les données générées par la commande SOLVE sont enregistrées dans ce fichier.

Exemple:

log outfile=freq-bot.log

- LOAD charge des solutions antérieures qui vont ainsi servir comme valeur initiale pour trouver la solution d'autres points de polarisation.

Exemple:

Load infile=sol.str master

- SOLVE permet d'ordonner à ATLAS de trouver une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.

Exemple:

solve b1=1 lambda=0.25

solve b1=1 lambda=0.3

- SAVE enregistre la structure et les grandeurs internes du dispositif pour tout point dans un fichier de sortie de type « .str ». Les informations sauvées correspondent à un état donné de la structure.

Exemple:

Save outf=sol.str

- EXTRACT permet d'extraire des valeurs numériques à partir des fichiers « .log »

Exemple:

extract name="IV" curve(v."anode",i."cathode") outfile="IVcurveSi.dat"

- TONYPLOT permet de faire appel à l'outil de visualisation du même nom. Cet outil permet de représenter les fichiers « .str » et « .log ».

Exemple:

tonyplot EQint.dat