

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE ABOU BEKR BELKÏD DE TLEMEN
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

**UNITE DE RECHERCHE MATERIAUX
ET ENERGIES RENOUVELABLES (URMER)**

Thèse

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat
en Physique
Spécialité : Physique Energétique et Matériaux

Thème

**MODELISATION DES STRUCTURES
PHOTOVOLTAIQUES : ASPECTS FONDAMENTAUX
ET APPLIQUES**

Présentée par :

M^{me} DIB Wassila Née KAZI-TANI

Soutenue publiquement le :19/12/2010 devant le jury d'examen composé de :

CHABANE-SARI Nesr-Eddine	Professeur	U.Tlemcen	Président
BENYOUCEF Boumédiène	Professeur	U.Tlemcen	Directeur de thèse
ZERGA Abdellatif	Maître de conférences .A	U.Tlemcen	Co-directeur de thèse
SAIDANE Abdelkader	Professeur	ENSET Oran	Examineur
KADOUN Abd-Ed-Daim	Professeur	U.Sidi-Belabbes	Examineur
KADRI Abderrahman	Professeur	U.Oran	Examineur

Année Universitaire : 2010/2011

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été effectué au sein de l'Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables de l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen en Algérie.

Je suis honoré et il m'est agréable d'adresser mes remerciements et ma reconnaissance à Monsieur BENYOUCEF Boumediène, Professeur à l'Université de Tlemcen, d'avoir dirigé ma thèse, pour son soutien, sa confiance et ses précieux conseils.

Je tiens aussi à exprimer mes remerciements les plus sincères à Monsieur ZERGA Abdelatif, Maître de Conférences à l'Université de Tlemcen, pour son aide, ses conseils, sa disponibilité qu'il m'a accordé tout au long de la thèse.

J'exprime ma profonde et respectueuse gratitude à Monsieur CHABANE SARI Nasr-Eddine, Professeur à l'Université de Tlemcen, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse.

Je remercie vivement Monsieur SAIDANE Abdelkader, Professeur à l'Université de l'ENSET Oran, d'avoir accepté d'examiner le présent travail.

Je tiens à remercier Monsieur KADRI Abderrahim, Professeur à l'Université d'Oran d'avoir examiné le présent travail.

Je remercie également Monsieur KADDOUN Abdedaim, Professeur à l'Université de Sidi-Bel -Abbès d'avoir accepté de faire partie du jury de ma thèse.

Je remercie aussi tous les membres de l'Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables de l'Université de Tlemcen.

Enfin mes remerciements s'adressent à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Introduction générale et problématique

L'évolution énergétique mondiale	5
Objectifs du travail de thèse	6
Organisation de la thèse	7
Références bibliographiques	9

Chapitre I : Généralités sur la cellule photovoltaïque

I-1. Introduction	10
I-2. Histoire et motivation.....	10
I-3. L'effet photovoltaïque et le Rayonnement solaire	13
I-3-1. L'effet photovoltaïque	13
I-3-2. Le rayonnement solaire et nombre de masse d'air	13
I-4. Les différentes filières photovoltaïques	15
I-4-1. Cellules photovoltaïques à base de semi-conducteurs	16
a) Filière silicium	16
b) Autres semi-conducteurs	20
I-4-2. Cellules photovoltaïques organiques	22
I-5. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	23
I-5-1. L'interaction photon/semi-conducteur	23
I-5-2. Caractéristique courant tension et schéma équivalent	26
a) cas d'une cellule idéale	27
b) Cas d'une cellule photovoltaïque réelle	28
I-5-3. Paramètre des cellules photovoltaïques	30
a) Courant de court-circuit, I_{cc}	30
b) Tension à circuit ouvert, V_{oc}	30
c) Facteur de forme, ff	30
d) Le rendement, η	31
e) Le rendement quantique, EQE	31

I-5-4. Pertes limitant le rendement de conversion des photopiles	32
a) Pertes physiques	33
b) Pertes technologiques	33
I-6. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque	35
I-6-1. Contacts face avant et arrière	36
I-6-2. La couche anti-reflet	36
I-6-3. La texturation de surface	37
I-6-4. Formation de l'émetteur	38
I-6-5. La région de la base	38
I-6-6. Le champ BSF	38
I-7. Choix du matériau Silicium	39
I-8. Choix de la cellule à contacts arrière inter digités.....	41
I-9. Conclusion.....	44
I-10. Références bibliographiques.....	45

Chapitre II : Revue des modèles physiques utilisés dans la simulation numérique

II-1. Introduction	48
II-2. Equations fondamentales dans les semi-conducteurs	48
II-2-1. Equation de Poisson	49
II-2-2. Equations de continuité	49
II-2-3. Equations de transport	50
II-2-3-1. Diffusion	51
II-2-3-2. Drift	52
II-3. Génération optique	53
II-4. Mécanisme de recombinaison.....	56
II-4-1. Recombinaison SRH (Schokley-Read-Hall)	57
II-4-2. Recombinaison Auger	59
II-4-3. Recombinaison Radiative	62
II-4-4. Recombinaison en surface	62
II-5. Les modèles de Mobilité	64

II-5-1. Modèle de la mobilité « Masetti »	64
II-5-2. Modèle de la mobilité « Caughey et Thomas ».....	66
II-5-3. Modèle de la mobilité « Canali ».....	67
II-6. Rétrécissement de la bande interdite (Band-Gap-Narrowing)	68
II-7. Conclusion	70
II-8. Références bibliographiques	71
Chapitre III : Simulation de la structure à contacts arrière inter digités	
III-1. Introduction	73
III-2. Simulation numérique sous SILVACO-ATLAS	73
III-2-1. Structure à simuler	74
III-2-2. Paramètre de la structure simulée	76
III-3. Présentation du package des programmes SILVACO	77
III-3-1. Les outils de simulation	78
III-3-2. Les outils interactifs	79
III-4. Présentation d'ATLAS	80
III-4-1. Entrées et sorties d'ATLAS	80
III-4-2. Commandes dans un programme ATLAS	81
III-5. Résultats de la simulation	85
III-5-1. Dimensionnement des régions n ⁺ et p ⁺	85
III-5-1-1. L'influence du rapport entre les largeurs des régions dopées n ⁺ et p ⁺	85
III-5-1-2. L'influence de la longueur de diffusion	86
III-5-2. L'influence du dopage	89
III-5-2-1. Dopage du substrat	89
III-5-2-2. Dopage de l'émetteur	90
III-5-2-3. Dopage du BSF	92
III-5-3. L'influence de l'épaisseur du substrat	93
III-5-4. Rendement quantique externe	94
III-5-5. L'Etude de la face avant sur le rendement des cellules à contacts arrières	95
III-5-3-1. Etude de la vitesse de recombinaison	95
III-5-5-2. L'influence du FSF sur la vitesse de recombinaison	96

III-5-5-3. L'influence des couches antireflets	97
a) Le nitrure de silicium SiN	98
b) Le dioxyde de silicium SiO ₂	98
III-5-5-4. L'utilisation d'une double couche antireflet	99
III-7. Conclusion	101
III-8. Références bibliographiques	102
Chapitre IV: Choix du procédé technologique-Comparaison entre la structure à contacts arrière inter digités et la cellule conventionnelle	
IVI-1. Introduction	104
IV-2. Sérigraphie	104
IV-2-1. Avantages de la technologie sérigraphie	104
IV-2-2. Principe de la technique	105
IV-2-3. Pâte de sérigraphie	106
IV-2-4. Recuit des pâtes de sérigraphie	107
IV-2-5. Qualité de la sérigraphie	108
IV-3. Le procédé technologique de réalisation des cellules solaires inter digitées	109
IV-3-1. IBC par diffusion sélective	109
IV-3-2. IBC par gravure	113
IV-3-3. Comparaison entre les deux procédés	114
IV-4. Comparaison entre la structure conventionnelle et la structure à contacts arrière	116
IV-4-1. L'influence du rapport de la longueur de diffusion sur l'épaisseur du substrat	116
IV-4-2. L'influence de l'épaisseur du substrat	118
IV-4-3. L'influence du dopage	119
IV-5. Conclusion	120
IV-6. Références bibliographiques	121
Conclusion générale et perspectives	123

Introduction générale et problématique

L'évolution énergétique mondiale

Selon la majorité des prévisionnistes, la consommation d'énergie primaire commerciale devrait doubler d'ici 2030, puis tripler aux environs de 2050[1]. Cependant, la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables [2] (Fig.1 : Pétrole 34%, Charbon 26.5%, Gaz naturel 20.9%, nucléaire 5.9%). De plus, ce type de production d'électricité est principalement responsable de la production de CO₂ rejet dans l'atmosphère engendrant le phénomène de l'effet de serre qui confronte la planète aux phénomènes de réchauffement climatique [3]. C'est pour cette raison que la production d'énergie est une problématique centrale de notre société.

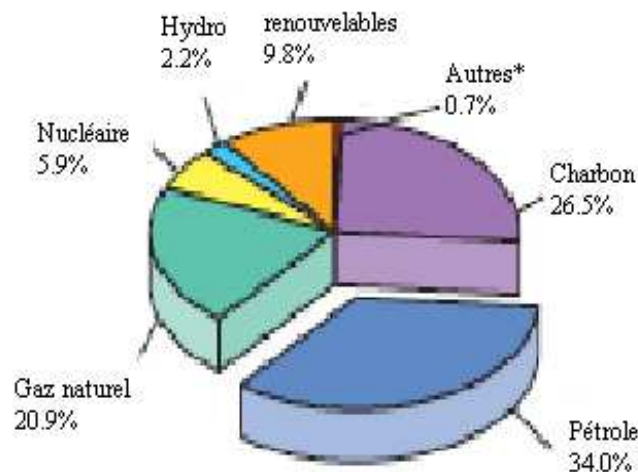


Figure I : Evolution de la production mondiale de l'énergie électrique en 2007[2]

* «Autres» comprend l'énergie géothermique, énergie solaire, éolienne, thermique, etc

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 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 [4].

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
- Permette 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 [5]

Aujourd'hui, la plupart des cellules solaires commercialisées sont produites en utilisant du silicium monocristallin ou polycristallin. Ces cellules solaires peuvent atteindre des rendements photovoltaïques de l'ordre de 24.7 % [6]. 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 [7]. 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.

Objectifs du travail de thèse

L'optimisation des performances des cellules solaires à base de silicium cristallin liée à une réduction des coûts reste un problème clé pour la production industrielle. Afin de parvenir à des rendements élevés, les cellules solaires à base de silicium cristallin doivent présenter une forte absorption de la lumière. Parmi les cellules les plus efficaces destinées à améliorer le rendement, sont les cellules à contacts arrières inter digités. Elles sont constituées notamment d'un substrat de type p ou n et d'un contact arrière présentant une réflexion élevée [8]. L'utilisation de ce genre de cellule résulte en la diffusion de la lumière qui conduit à une augmentation de l'absorption dans la face avant de la cellule. Ceci se traduit par un accroissement du rendement de conversion. Trouver de nouvelles structures et technologies pour améliorer l'efficacité dans les cellules solaires est un véritable défi pour les chercheurs. Dans ce travail, nous proposons d'étudier les structures à contacts arrières inter digités à base de silicium cristallin.

L'objectif principal de cette thèse est non seulement l'étude de la modélisation et l'optimisation des structures à contacts arrières inter digités mais aussi la mise au point d'un procédé technologique directement transférable à l'industrie.

Organisation de la thèse

Le travail de thèse est présenté de la manière suivante :

- Dans le chapitre 1, nous analysons, tout d'abord, la situation actuelle sur le plan énergétique afin de justifier l'importance de l'énergie solaire et nous abordons brièvement l'historique du photovoltaïque. Ensuite, nous présentons les différentes filières et le principe de fonctionnement des cellules solaires et nous définissons les paramètres photovoltaïques à partir desquels nous évaluons les performances de nos cellules. Nous terminons ce chapitre par la présentation des différents constituants de base d'une cellule photovoltaïque conventionnelle et nous définissons les cellules photovoltaïques à contacts arrières inter digités.
- Dans le chapitre 2, nous abordons une présentation des modèles physiques utilisés dans la simulation numérique. Dans une première partie, nous présentons les équations fondamentales dans les semiconducteurs. Dans une seconde partie, nous nous concentrons sur quelques points particulièrement intéressants tels que la recombinaison qui correspond aux mécanismes conduisant à la perte de paires électron-trou et nous exposons les modèles de mobilité des porteurs de charges. Nous terminerons par la description des modèles de rétrécissement de la bande interdite.
- Les résultats de simulations de la structure à contacts arrière inter digités possédant la jonction et les contacts sur la face opposée au rayonnement à base de silicium cristallin, sont illustrés dans le chapitre 3. La première partie de ce chapitre est consacrée à l'exposition du logiciel de simulation de la société SILVACO et sa mise en œuvre dans le cadre de notre travail. Ensuite, nous présentons les résultats obtenus de la simulation numérique de la structure à contacts arrière inter digités. Ces résultats de simulation ont permis d'étudier différents paramètres influant sur les performances de ces cellules. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous étudions l'influence de la double couche antireflet. Cette dernière est constituée de deux couches déposées successivement sur le substrat, une couche de SiN et une couche de SiO₂. Les résultats de la double couche antireflet permettent d'obtenir des rendements de conversion satisfaisant

- Dans la première partie du chapitre 4, nous définissons le principe de la technique sérigraphie. Ensuite, nous présentons les différents procédés technologiques de réalisation des cellules solaires à contacts arrières. Dans la deuxième partie, nous achevons notre travail par des simulations avec une structure conventionnelle. Nous considérons dans cette étude, les performances de l'efficacité entre une cellule à contact arrière avec une simple couche anti reflet (SiN), une cellule à contact arrière avec une double couche antireflet (SiN+SiO₂) et une cellule conventionnelle.
- Ce travail se termine par une conclusion générale des résultats obtenus au cours de la thèse et nous citerons quelques critères s'inscrivant dans la perspective d'une meilleure efficacité des cellules photovoltaïques à contacts arrières inter digités.

Références bibliographiques

- [1] P.PAPET « *Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats mince en silicium cristallin* » Thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007
- [2] www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf
- [3] H.REEVES ; « *Mal de Terre* », science ouverte, éditions du seuil, mars 2003
- [4] OBSERVER. « *Baromètre du Solaire Photovoltaïque* », Système Solaires, Avril 2004, N° 160, pp.68-83.
- [5] J.F.LELIEVRE, « *Elaboration de SiN_x:H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour application photovoltaïques* », thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007
- [6] GREEN M.A., EMERY K., KING D.L., HISHIKAWA Y., WARTA W., « *Solar Cell Efficiency Tables (version 28)* », Progress in Photovoltaics : Research and Applications, vol. 14 (2006) 455-461.
- [7] O. PALAIS « *Cellules photovoltaïques : la filière silicium cristallin aujourd'hui et demain* » Matériaux & Techniques, vol. 97, (2009) 241-245
- [8] SPRINGER J., RECH B., REETZ W., MÜLLER J., VANECEK M., « *Light trapping and optical losses in microcrystalline silicon pin solar cells deposited on surface-textured glass/ZnO substrates* », Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 85 (2005) 1-11.

Chapitre I

Généralités sur la cellule photovoltaïque

I-1. Introduction

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. La première partie de ce chapitre est consacrée à un bref historique qui établit la position des cellules solaires par rapport aux autres systèmes de production d'énergie électrique. Elle est suivie d'une deuxième partie qui donne le principe de l'effet photovoltaïque et la présentation d'une source d'énergie durable : le soleil. La troisième partie présente les différentes technologies de fabrication des photopiles. Ensuite, nous décrivons le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales et les pertes limitant leur rendement de conversion. Nous présentons les paramètres essentiels qui permettent de calculer le rendement d'une cellule solaire à partir de la caractéristique courant-tension. Puis, nous expliquons les différents constituants de base d'une cellule photovoltaïque conventionnelle. Enfin, nous abordons les cellules photovoltaïques à contacts arrières inter digités.

I-2. Histoire et motivation

L'énergie renouvelable peut être utilisée lorsqu'une ressource énergétique se régénère naturellement à une vitesse comparable avec celle de son utilisation. Le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux sont ainsi des sources d'énergie renouvelables. Les énergies pétrolière et nucléaire n'appartiennent pas à cette classe puisque la réserve mondiale en pétrole et en uranium est limitée.

En 1975, K.W. Ford avait reporté que l'énergie du rayonnement solaire à la surface de la terre était 10^4 fois plus grande que la demande d'énergie mondiale [1]. La conversion de cette énergie en électricité peut être effectuée de manière directe ou indirecte (figure I-1). L'utilisation des cellules photovoltaïques pour obtenir cette conversion est une voie prometteuse pour exploiter cette source d'énergie durable.

Le développement des cellules photovoltaïques a commencé en 1839 lorsque Henri Becquerel a mis en évidence l'apparition d'une tension aux bornes de deux électrodes immergées dans une solution électrolytique, lorsque celle-ci était exposée à la lumière naturelle. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas un

caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = hc/\lambda \quad (\text{I-1})$$

où h est la constante de Planck, c est la vitesse de la lumière et λ est sa longueur d'onde. Aussi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

En 1954 Chapin *et al.* [2] des laboratoires Bell Telephone aux États-Unis ont développé la première cellule solaire au silicium, avec un rendement énergétique de 6 %. Depuis, les cellules photovoltaïques ont commencé à faire l'objet de recherches plus intenses et se sont développées à l'échelle industrielle. Deux principales raisons en sont à l'origine :

- Le faible coût de fabrication du silicium qui pouvait en plus être issu en abondance des déchets de la microélectronique. En effet, le recyclage possible permettait alors d'éviter les premières étapes technologiques relativement, chères, notamment la purification.
- Le début du lancement d'importants programmes spatiaux et la nécessité d'avoir des sources d'énergie embarquées performantes.

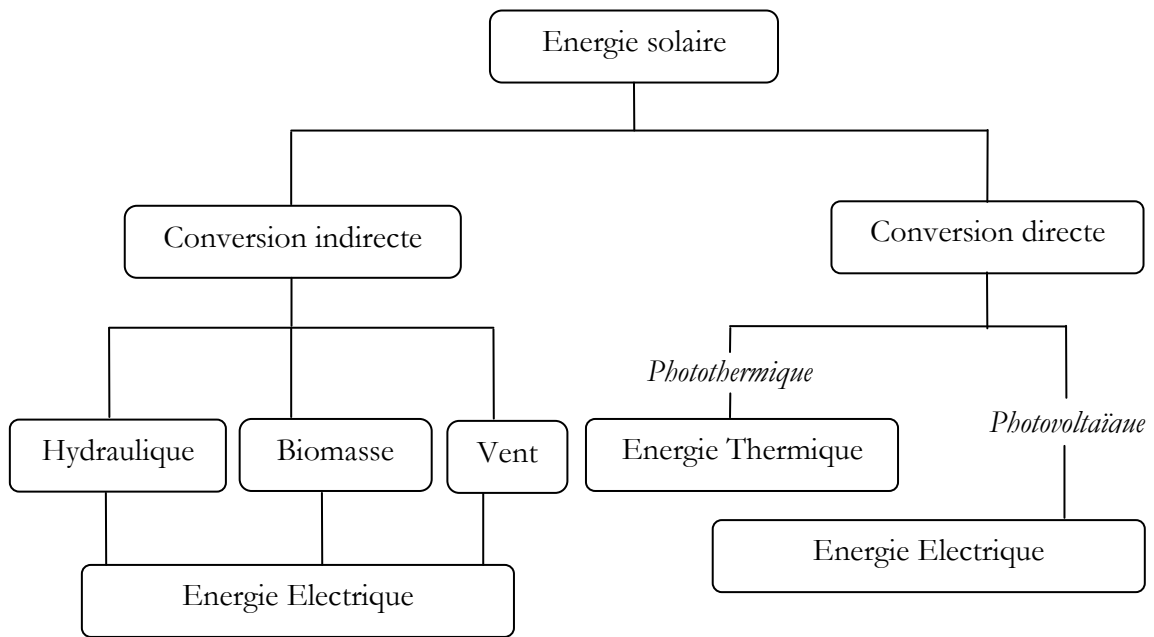


Figure I-1 : Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique

Pour les applications spatiales, répondant aux normes de poids et de durées de vie importantes, les cellules photovoltaïques sont rapidement devenues des cellules multicouches basées sur divers matériaux inorganiques, dont une des couches est souvent en GaAs. Elles présentent des rendements très élevés, une bonne fiabilité et une faible détérioration de leur caractéristique au cours du temps (*sur au moins 20 ans*). Les plus récentes sont formées de quatre couches de matériaux différents. Certaines recherches tendent même vers cinq couches. Bien que leurs performances soient meilleures que celles en Si, ces dernières ne se développent pas pour des applications terrestres en raison de leur prix, 50 à 100 fois plus chères. Pour les applications terrestres, le silicium est devenu le matériau le plus utilisé pour fabriquer des cellules PV en raison de son faible coût.

I-3. L'effet photovoltaïque et le Rayonnement solaire

I-3-1. L'effet photovoltaïque

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semiconducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque. Lors de l'absorption de la lumière, la génération des paires électron-trou ainsi que la séparation de ces porteurs de charges constituent un processus important non seulement pour les mesures et la détection de lumière (photodétecteurs) mais aussi pour la conversion de la lumière en énergie électrique (cellules solaires).

I-3-2. Le rayonnement solaire et nombre de masse d'air

Le développement, l'optimisation et la caractérisation de cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée : le soleil. Celui-ci est une *petite* étoile, une boule de gaz, dont le diamètre est de 139100 Km, et qui est placée à 150000000 Km de nous. Ceci conduit à un éclairement moyen dans l'année de 1,36 KW/m² hors atmosphère.

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0,2µm) à l'infrarouge lointain (2,5µm). Lorsque ce rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption par les molécules des différentes couches atmosphériques, conditions climatiques, la diffusion moléculaire de Rayleigh et les poussières. Aussi le dioxyde de carbone (CO₂) et la vapeur d'eau (H₂O), pour les infrarouges au dessus de 2µm, absorbent les énergies proches de leur énergie de liaison, ce qui conduit à des trous dans le spectre solaire visible au sol. Par ailleurs, les aérosols et les poussières présents dans l'atmosphère conduisent à une absorption répartie quasiment sur toute la gamme spectrale, ce qui conduit à une baisse globale de la puissance incidente.

L'intensité lumineuse issue du soleil normalement incidente sur la surface de la terre est appelée la constante solaire. Cette constante à une valeur approximativement de 1,4KW/m² au dessus de la couche atmosphérique est réduite sur terre à 1KW/m² par réflexion et absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique. Cette perte est appelée la masse d'air (AM_y), elle est utilisée afin de caractériser le spectre solaire en terme d'énergie émise [2], étant défini par :

$$y \approx \frac{1}{\sin(A)} \quad (\text{I-2})$$

A représente l'angle entre la position du soleil et l'horizon (Figure I-2). On définit ainsi les conditions :

- AM0 correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au dessus de notre atmosphère à incidence normale ;
- AM1 correspond à une même lumière arrivant à la surface terrestre ;
- AM1,5 désigne la masse d'air rencontrée pour la lumière arrivant à $48,2^\circ$ sur la surface de la terre, soit une lumière plus faible du fait que l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée est plus grande.

L'intensité reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule suivante [4] :

$$I_D = 1,353(0,7^{AM})^{0,678} \quad (\text{I-3})$$

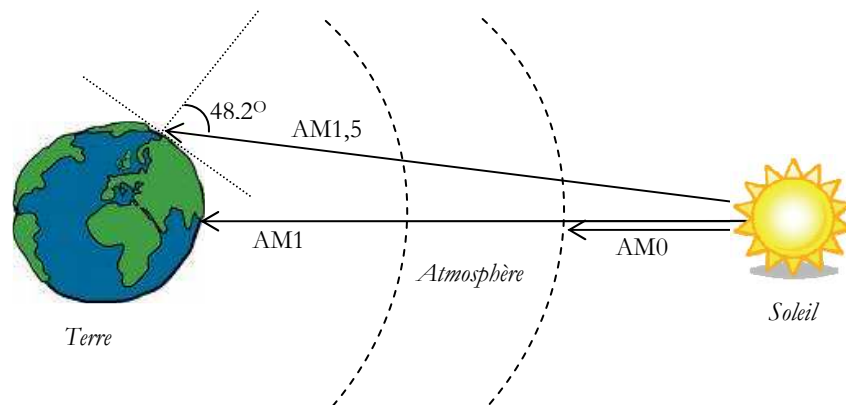


Figure I-2 : différentes constantes d'illumination

Les spectres de définitions AM1,5 sont référencés dans un document ASTM G-173-03[5]. Au cours de ces dernières années, ce spectre a été homologué par l'organisation Internationale de

Standardisation (ISO 9845-1 : 1992) et l'American Society for Testing and Materials (ASTM E892-87 :1992). Le flux de standardisation a été corrigé à 1000 W/m^2 .

Le spectre AM0, ou spectre extraterrestre, utilisé pour générer le spectre de référence terrestre a été développé par Gueyamard [6]. En 2000, l'American Society for testing and Materials développa un spectre de référence AM0 (ASTM E-490) pour l'usage de la communauté de l'aérospatial. Ce spectre est basé sur les données recueillies par des satellites des missions spatiales, des télescopes terrestres et des modélisations. L'intégrale du spectre est conforme à la valeur de la constante solaire acceptée par la communauté spatiale de $1366,1 \text{ W/m}^2$.

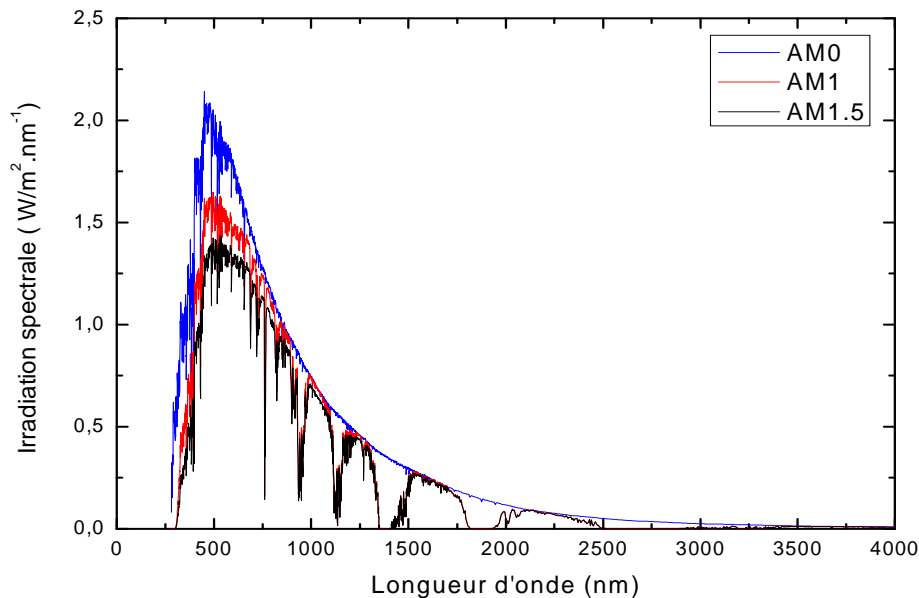


Figure I-3: Irradiance en fonction de la longueur d'onde AM. [5].

I-4. Les différentes filières photovoltaïques

Les panneaux solaires ne sont pas constitués de la même manière. En effet, il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et de développement. Parmi les technologies de cellules photovoltaïques existantes, deux grandes filières sont à distinguer en fonction du procédé de fabrication utilisé :

I-4-1. Cellules photovoltaïques à base de semiconducteurs

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semiconducteurs, principalement à base de silicium et plus rarement d'autres semiconducteurs.

a) Filière silicium

Le silicium est l'élément le plus abondant sur terre après l'oxygène, il apparaît sous forme de dioxyde (SiO_2), appelé plus communément silice. Le silicium est extrait à l'échelle industrielle par un mécanisme d'oxydoréduction, de la silice à faible teneur en oxyde de fer est mise en contact de composés carbonés, le tout étant porté à très haute température (3000°C) dans des fours électriques à arc. On obtient du silicium de qualité métallurgique, pur à 98%, qui devient de qualité dite « électronique » après des opérations supplémentaires de purification.

Le silicium occupe une place prédominante au sein de l'industrie photovoltaïque grâce à ces nombreux avantages : disponibilité, qualités photovoltaïques assurant au final un bon rendement de conversion, non toxique. Enfin, il est aisé de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice cristalline des atomes dopants tels que le Bore (induisant un dopage de type P) ou le Phosphore (induisant un dopage de type N).

D'un point de vue photovoltaïque, le seul inconvénient du silicium réside dans sa structure électronique qui présente un gap indirect, gap à $1,12\text{eV}$ ne correspondant donc pas exactement au maximum d'intensité du spectre solaire. Par conséquent, l'absorption du rayonnement solaire par le silicium sera plus faible que celle d'un semiconducteur à gap direct comme l'arséniure de gallium GaAs.

Le silicium se présente sous différentes formes (figure I-4) dont les plus répandues sont le silicium polycristallin, le silicium monocristallin et le silicium amorphe.

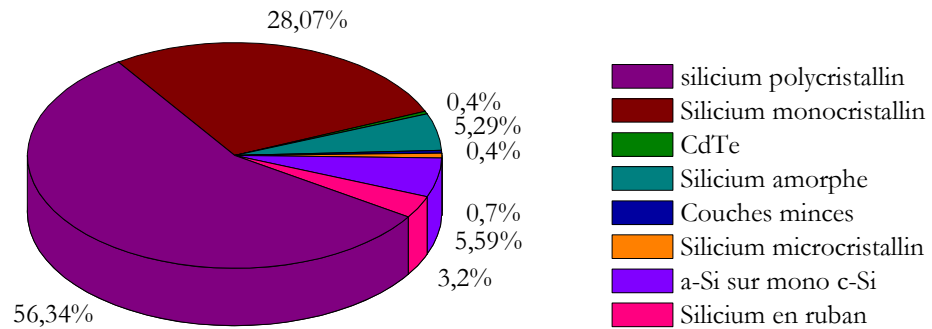


Figure I-4 : répartition des différents matériaux sur le marché photovoltaïque [7]

Nous allons maintenant décrire les différentes formes sous lesquelles est employé le silicium dans l'industrie photovoltaïque.

✓ *Cellules à base de silicium monocristallin*

Un contrôle rigoureux de la température de refroidissement du silicium fondu permet d'obtenir un monocristal. Le silicium obtenu est appelé Cz (*méthode Czochralski*) ou FZ (Floated Zone). Conditionné en barreaux ou lingots, il est découpé en tranches d'épaisseur souhaitée (wafers), d'où une source de perte importante de matière première car les déchets ne peuvent pas être réutilisés. Son procédé de fabrication est long et énergivore ; plus coûteux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Le rendement moyen des cellules est relativement élevé : entre 12% et 18% (version commerciale) et environ 24,7% pour le meilleur rendement obtenu en laboratoire (UNSW Australie). Les inconvénients de cette technologie sont les faibles rendements obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériaux.

✓ *Cellules à base de silicium polycristallin*

Ce type de cellules est produit à partir d'un bloc de silicium cristallisé, refroidi axialement, découpé en plaquettes minces par des scies à fil. Elles ont un rendement de 11% à 15% (version commerciale) et d'environ 18% en laboratoire, mais leur coût de production est moins élevé que

les cellules monocristallines. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication.

✓ ***Cellules à base de silicium multicristallin***

Le silicium monocristallin comporte peu de défauts recombinants et permet d'obtenir les meilleurs rendements. Cependant, son élaboration est très coûteuse, ce qui constitue un frein à son développement industriel pour les applications photovoltaïques. Le silicium multicristallin, moins onéreux que le silicium monocristallin, a été introduit dans l'industrie photovoltaïque à partir des années 1970. Il se présente sous forme de lingots de silicium constitués de grains d'une taille variant entre le millimètre et quelques centimètres. Les techniques de production du silicium multicristallin sont beaucoup plus simples à mettre en œuvre. Néanmoins, du fait de la méthode d'élaboration, la concentration en impuretés est supérieure à celle du silicium monocristallin et la structure granulaire induit des recombinaisons. En conséquence le rendement de conversion photovoltaïque est limité.

✓ ***Cellules à base de silicium amorphe***

Ce type de cellules, de structure moléculaire non cristalline, nécessite moins d'énergie pour leur production que les cellules cristallines, car il est composé de couches minces. Leur rendement actuel atteint 9% en industrie et environ 11% en laboratoire. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à faible coût en utilisant peu de matière première. La technologie du silicium amorphe permet de fabriquer des cellules semi transparentes qui laissent passer 10% à 20% du rayonnement solaire incident. En effet, la grande densité de défauts du silicium amorphe (liaisons pendantes, états d'interface, structure multicristalline) limite son rendement de conversion.

✓ ***Cellules tandem***

L'amélioration du rendement des cellules peut passer par une meilleure utilisation du spectre lumineux, en combinant une couche mince de silicium amorphe à une couche de silicium microcristallin (cellules tandem) [9,10]. Il s'agit comme pour les multi-jonctions d'empiler deux cellules photovoltaïques qui absorbent des photons de longueurs d'onde différentes. Les avantages de cette technologie sont multiples : un fort potentiel d'augmentation de rendement, une fabrication à faible budget thermique ($T < 250^{\circ}\text{C}$), une meilleure tenue en température et une

application adaptée au substrat mince. Par ce mécanisme l'ensemble tandem composé de l'association de deux cellules, permet d'absorber un plus large spectre lumineux et ainsi produire plus d'énergie qu'une cellule simple jonction. La première couche en silicium amorphe absorbe une partie du spectre alors que l'autre partie, qui la traverse, est absorbée par la seconde couche en silicium microcristallin. Les différentes couches qui composent la cellule sont déposées par plasma (PECVD Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) sur un substrat de verre.

✓ *Cellules à base de silicium en ruban*

Une troisième technologie utilise directement le tirage de rubans à partir de bains fondus [11]. Un ruban servant de substrat passe à travers un bain de silicium en fusion, une fine couche de silicium se dépose alors sur le substrat. Cette technique permet de réaliser des wafers plus minces ($120\mu\text{m}$) et évite essentiellement les pertes liées au sciage. Malgré la lenteur de déposition (quelques cm/min), la technologie ruban est un candidat prometteur à la réduction du prix du watt crête photovoltaïque.

✓ *Cellules à base de silicium en couches minces*

Un rendement maximal de 21,5% des cellules en couches minces a été obtenu par Zhaho et al [12] sur cellules de $47\mu\text{m}$ d'épaisseur. Ce résultat est proche du rendement de conversion record obtenu avec la même technologie sur des plaques de silicium plus épaisses [13].

Cependant, la structure d'une cellule photovoltaïque à haut rendement PERL (Passivated Emitter with Rear Locally diffused) est de 24,7% a été obtenue [14]. Cette structure nécessite un très grand nombre d'étapes technologiques empêchant toute industrialisation. La voie du report de couches minces sur substrats économiques a donc été envisagée et de nombreuses solutions sont aujourd'hui proposées de part le monde.

L'ensemble de la filière du silicium (monocristallin, polycristallin et amorphe) représente à l'heure actuelle plus de 90% des parts du marché photovoltaïque. Le Tableau I-1 représente un récapitulatif des différentes filières silicium présentant actuellement sur le marché

Technologie	Rendement Typique	Influence Température	Taux de dégradation	Prix d'un module (2008)
Monocristallin	12 à 16%	-0.442% par °C	-0.38% par an	3.13 €/Wc
Polycristallin	11 à 14%	-0.416% par °C	-0.35% par an	2.95 €/Wc
Amorphe	6 à 7%	+0.175% par °C	-1.15% par an	2.35 €/Wc

Tableau I-1 : Performance de la filière Silicium simple jonction [8]

b) Autres semiconducteurs

✓ Cellules CIS (CuInSe₂ or cuivre-indium-sélénium)

Matériau polycristallin à couches minces, qui atteint une efficacité de 10,2% sur un module prototype et 17,7% en laboratoire. La fabrication se réalise dans un long tunnel sous vide où les dépôts de couches et les connexions par laser se réalisent automatiquement. Une tendance est aux multicouches associant deux semiconducteurs de sensibilité spectrale complémentaire pour augmenter le rendement. La difficulté de cette technologie est liée au procédé de fabrication permettant d'obtenir des couches très uniformes et d'éviter l'apparition de défauts lors de la phase de déposition du disélénium de cuivre.

✓ Cellules CdTe (tellure de Cadmium)

Cette filière a été une des premières étudiées en 1960, du fait de ses propriétés optiques optimales, c'est-à-dire une bande interdite directe de l'ordre de 1,5eV et une grande absorption dans tout le spectre solaire. Ce matériau polycristallin à couche minces (1 à 2µm), réalisé par électro-déposition, brumérization et évaporation, tient la promesse d'une production à faible coût. L'efficacité de ces modules a été mesurée entre 6% et 8,5% (16,5% en laboratoire). Les hétérojonctions CdTe/CdS/SnO₂/verre sont apparues en 1964 et le premier module CdS/CdTe date de 1972. Malgré les remarquables rendements obtenus et excédant les 16% [15], des problèmes freinent encore cette filière à savoir :

- la difficulté de réaliser des contacts électriques stables,
- la sensibilité de cette cellule à la vapeur d'eau (problème de moisissure),
- l'agressivité pour l'environnement, du fait de la présence du Cadmium qui est toxique et polluant.

✓ **Cellules CIGS (CuInGaSe₂)**

La filière CIGS (cuivre indium gallium sélénium), utilisée sous forme d'une couche mince polycristalline. A la différence des cellules issues du silicium utilisant le principe de la jonction p-n, la structure du CIGS forme une jonction complexe appelée hétéro-jonction. Les meilleurs rendements obtenus étaient de 19,9% en laboratoire [16]. Au vu du potentiel d'évolution de cette technologie de grandes entreprises se sont lancées dans la fabrication de ce type de cellules, les procédés de dépôt en couches minces étant particulièrement bien adaptés à la production en grandes séries. Il faut toutefois noter que le rendement des cellules industrielles atteint 14% dans le meilleur des cas et leur part de marché reste encore très marginale (environ 1%). Cependant il reste un grand nombre de points à améliorer afin de réduire le prix de ces cellules. Le principal challenge de la technologie CIGS couche mince est la réduction du prix des matériaux. Divers pistes existent pour essayer de remplacer les matériaux chers comme l'InGa par l'Al. De plus il est nécessaire de trouver des solutions pour moins gaspiller la matière première active pendant la fabrication.

Autre composé quaternaire envisageable : CuInAlSe₂ qui atteint en laboratoire un rendement de 16,9%.

✓ **Cellules GaAs (arséniure de Gallium)**

Ce composé III-V est fait pour des cellules photovoltaïques à très haut rendement 25% à 28%. Elles présentent l'inconvénient de recourir à des procédés et des matériaux fort coûteux se révélant de surcroît très toxiques pour l'environnement. Ces restrictions interdisent actuellement toute production de masse. Ce type de cellule est souvent réservé au domaine spatiale ou pour les systèmes à concentrateurs. Le procédé de multi jonction III-V du GaAs permet de dépasser une efficacité de 30%.

I-4-2. Cellules photovoltaïques organiques

Si le marché des cellules photovoltaïques est aujourd'hui dominé à plus de 90% par le silicium cristallin, les composites organiques, encore au stade de l'étude de la faisabilité d'introduction sur le marché en termes de rendement et de fiabilité. Bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre. Comme les semiconducteurs, ces cellules possèdent des niveaux d'énergies susceptibles d'absorber les photons en créant des paires électron-trou utilisables grâce à des transitions entre les niveaux dits HOMO (Highest occupied molecular orbital) et des niveaux dits LUMO (Lowest unoccupied molecular orbital). En l'absence de séparation, les paires électron-trou peuvent se recombiner en émettant des photons de la longueur d'onde correspondante plutôt que se convertir en chaleur comme vu précédemment pour les filières inorganiques. La séparation des charges reste encore aujourd'hui un des points bloquants pour être effectuée efficacement.

Cependant, les cellules photovoltaïques organiques restent des cellules souples et économiques en grandes quantités (films). Parmi ces cellules, on distingue deux types :

✓ *Cellules de Grätzel*

Depuis les années 2000, plusieurs laboratoires dans le monde étudient ce type de cellules. Nous utilisons, entre autre, le colorant naturel des plantes pour convertir l'énergie solaire en électricité tout comme le feraient les plantes lors de la photosynthèse. Les cellules Grätzel ont un rendement de l'ordre de 10%, cellules encore fragiles par rapport au silicium.

✓ *Cellules polymères*

Les matériaux organiques polymères, faciles à mettre en œuvre, sont en passe de s'imposer à côté du silicium pour la fabrication des cellules solaires, même si des verrous technologiques restent à lever. Les organiques, autrement dit les plastiques, moins onéreux, apparaissent en effet de plus en plus comme une voie d'avenir complémentaire, séduisante et crédible. Ces cellules ont un rendement de l'ordre de 5%, mais leurs durées de vie restent encore limitées.

Les cellules solaires organiques avec leurs faibles coûts de matière première, leurs faibles besoins énergétiques de production et leurs capacités à être fabriquées à grande échelle sont des sérieux candidats et à fort potentiel pour un développement photovoltaïque à long terme.

Ce bilan rappelle les avantages et les inconvénients de chacune des technologies qui doivent être pris en compte dans la réalisation d'un projet photovoltaïque.

La Figure I-5 montre l'évolution des rendements record des principales filières photovoltaïques actuelles. On y retrouve les différentes cellules au silicium monocristallin et polycristallin, les cellules au silicium amorphe, les cellules CIGS, les cellules CdTe, mais aussi les cellules à base de composés III-V qui appartiennent à la catégorie des cellules multi-jonctions. A côté des filières bien établies, sont apparues les nouvelles filières, basées sur l'utilisation de colorants ou de matériaux organiques, qui n'en sont qu'à leurs balbutiements.

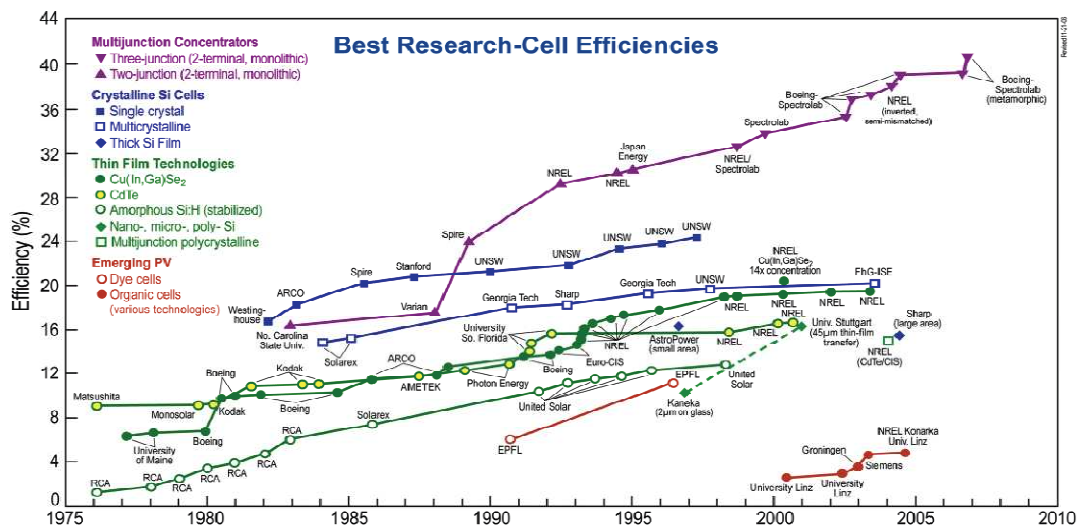


Figure I-5 : Rendements record de cellules photovoltaïques obtenus en Laboratoire [17].

I-5. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I-5-1. L'interaction photon/semiconducteur [18] [19] [20]

La cellule photovoltaïque ou photopile est composée d'un matériau semiconducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semiconducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un

semiconducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction), c'est l'énergie du gap. La figure I-6 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des k , il s'agit d'un gap direct (figure I-6-a). Le cas contraire correspond à un semiconducteur à gap indirect (figure I-6-b). Cette valeur « seuil » est propre à chaque matériau semiconducteur et varie de 1.0eV à 1.8eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.12eV pour le silicium cristallin, 1.7eV pour le silicium amorphe et de 1.43eV pour l'arséniure de gallium.

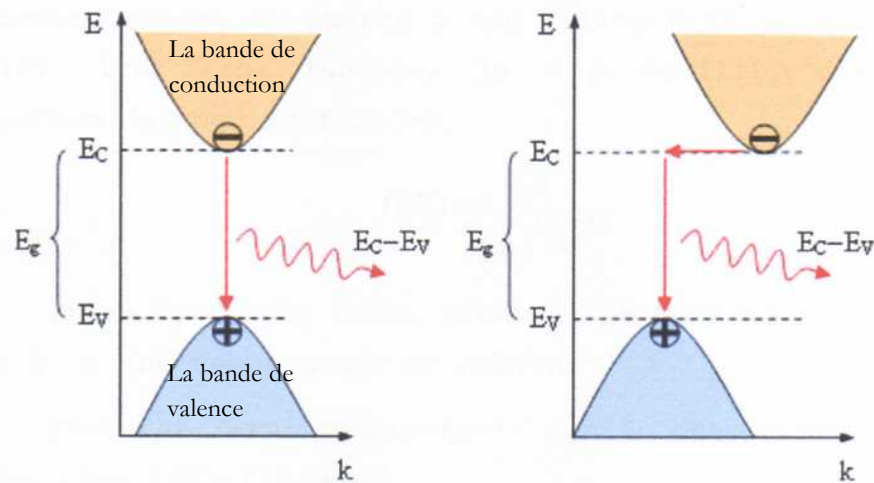


Figure I-6 : a) semi-conducteur à gap direct

b) semi-conducteur à gap indirect. [20]

Les cellules solaires sont généralement décrites comme des jonctions p-n obtenues en variant le type de dopage dans un semiconducteur (figure I-7). La conversion de l'énergie est le résultat de l'absorption de photons donnant lieu à la création des paires électrons trous. Pour séparer cette paire de charges électriques de signe opposé et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique permanent au sein du matériau. Ce dernier, assure une séparation rapide de ces porteurs pour éviter des phénomènes de recombinaison [22]. La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du dopage par des impuretés. Deux natures de dopage sont possibles :

Le dopage de type n (négatif), qui consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire, libre de se mouvoir dans le cristal (ex : le phosphore dans le cas du silicium).

Le dopage de type p (positif), qui utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. (ex : le bore dans le cas du silicium).

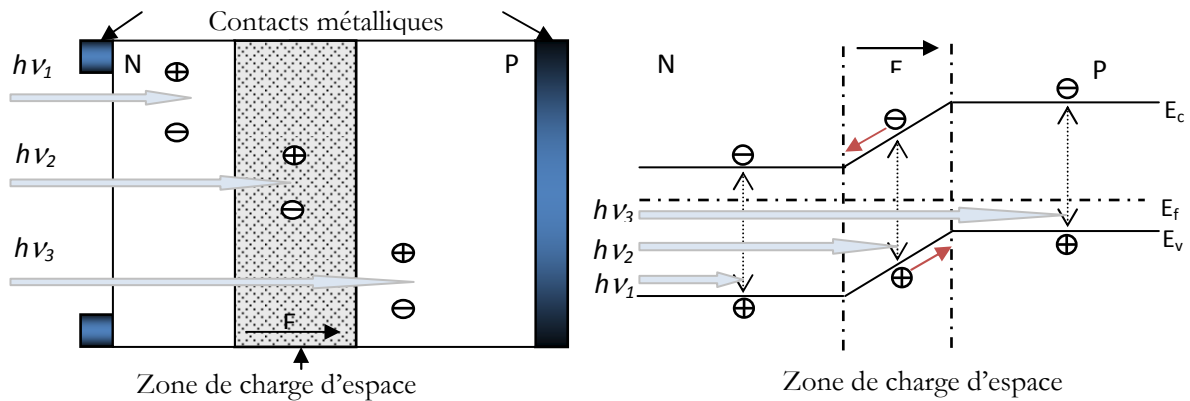


Figure I-7 : structure et diagramme de bandes pour une jonction p-n

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous dans la zone p. Une jonction p-n a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes. Chacun fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction en laissant aussi un trou capable de se mouvoir et en engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule (figure I-8).

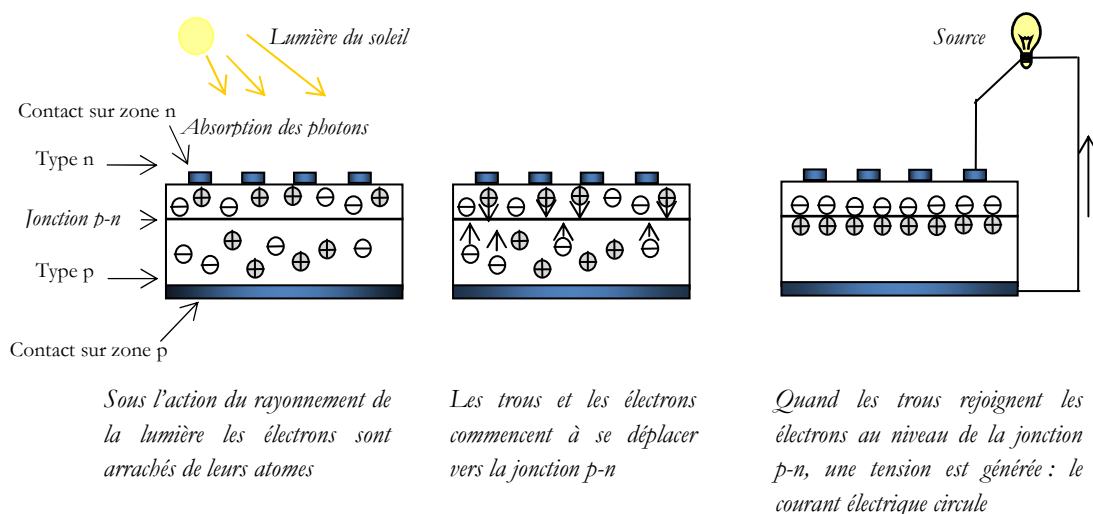


Figure I-8 : principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques

I-5-2. Caractéristique courant tension et schéma équivalent

La figure I-9 représente une caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sous obscurité et sous éclairage. Cette jonction polarisée par une tension V et non éclairée est le siège d'un courant de densité :

$$J = j_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (\text{I-4})$$

Avec : j_s est le courant des porteurs minoritaires, il reste inchangé

Dans l'obscurité et dans le cas idéal, la courbe obéit à l'équation de Shockley suivante :

$$I = JA = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (\text{I-5})$$

Où A est la surface de la diode, I_s est le courant de saturation, q est la charge de l'électron, k est la constante de Boltzman, T est la température et n est le facteur d'idéalité de la diode. Ce dernier tient compte des recombinaisons.

Cette même jonction polarisée sous une tension V et soumise à un rayonnement, elle est alors le siège d'un courant supplémentaire inverse I_{ph}

On obtient alors l'équation suivante :

$$I = i - I_{ph} = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - I_{ph} \quad (\text{I-6})$$

I_{pb} : un courant inverse proportionnel à la lumière incidente

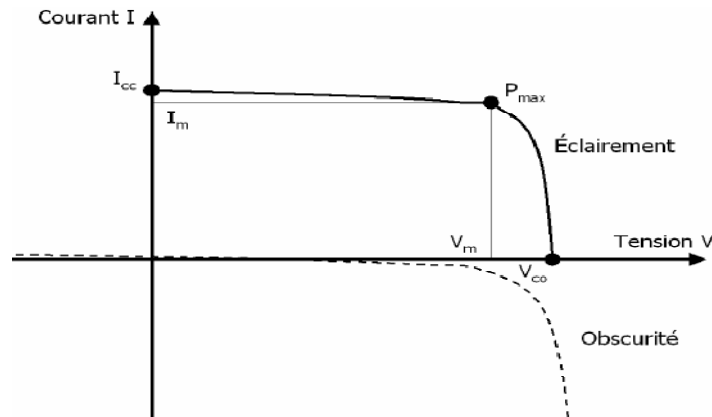


Figure I-9 : caractéristique I - V d'une cellule solaire sous obscurité et sous éclairement

Le courant délivré par une cellule photovoltaïque éclairée et traversant une charge R s'écrit :

$$I = I_{pb} - I_{obsc} \quad (I-7)$$

Avec I_{obsc} : densité de courant d'obscurité.

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant d'éclairément et le courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant.

a) cas d'une cellule idéale :

La jonction p-n sous éclairément peut être schématisée par un générateur de courant I_{pb} en parallèle avec une diode délivrant un courant i dans l'obscurité.

Le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale est présenté dans la figure I-10

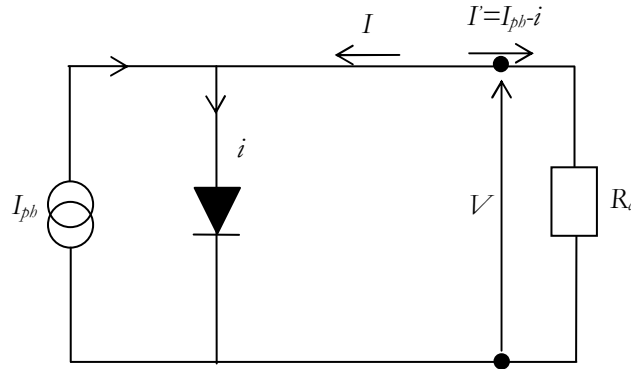


Figure I-10 : circuit électrique d'une jonction p-n idéale sous illumination
connecté à une résistance de charge

Lorsque la jonction p-n est reliée à une résistance de charge R_c , la tension V apparaît par la chute ohmique du courant à travers R_c (en circuit ouvert, R_c tend vers l'infini et V tend vers V_{oc}). L'orientation de I_{pb} vers R_c produit une tension induisant une polarisation directe à travers la jonction si bien que le courant i est de sens opposé à I_{pb} . D'un autre point de vue, nous pouvons considérer que la direction du photocourant dans la résistance de charge induit une tension à travers la jonction qui génère le courant direct i dans la direction opposée à I_{pb} . Si bien que globalement nous n'observons pas le photocourant entier I_{pb} , mais seulement :

$$I' = I_{pb} - i \quad (\text{I-8})$$

b) Cas d'une cellule photovoltaïque réelle :

Lorsque les résistances de contacts (résistivité des électrodes et des interfaces métal-semiconducteur) et les pertes ohmiques (dues à la résistivité des différentes couches de la cellule et de la surface latérale de la jonction) génèrent une résistance non négligeable par rapport à la résistance de charge, nous devons associer au schéma équivalent une résistance série R_s , voir figure I-11. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal-semiconducteur et en

diminuant la résistivité du matériau utilisé. Ce pendant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs.

Si on note V_j la tension à travers la jonction, la tension V à travers la cellule est réduite à :

$$V = V_j - R_s I' \tag{I-9}$$

Dans le premier quadrant nous avons :

$$I' = I_{pb} - I_s \left[\exp\left(\frac{qV_j}{nkT}\right) - 1 \right] = I_{pb} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I')}{nkT}\right) - 1 \right] \tag{I-10}$$

La pente de la courbe courant-tension au point V_{oc} représente l'inverse de la résistance série ($1/R_s$)

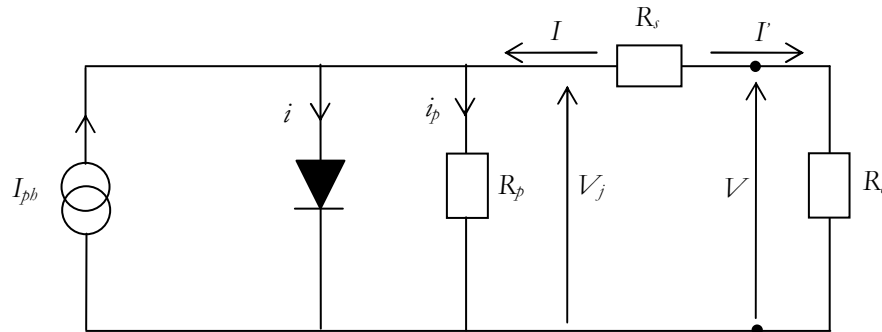


Figure I-11 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque avec résistance série et Shunt

De plus, lorsque des courants de fuite (des courants de court-circuit) apparaissent à travers la cellule, nous pouvons prendre en compte cette nouvelle composante en insérant une résistance parallèle R_p (résistance Shunt). R_p tend vers l'infini lorsque $i_p \approx 0$ (courants de fuite). Cette valeur devra être la plus élevée possible. Nous obtenons ainsi :

$$I' = I_{pb} - i - i_p = I_{pb} - I_s \left[\exp\left(\frac{qV_j}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V_j}{R_p} \tag{I-11}$$

En remplaçant V_j par $V_j = V + R_s I'$ nous avons :

$$I' = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I')}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I'}{R_p} \quad (\text{I-12})$$

La pente de la courbe courant-tension au point I_c représente l'inverse de la résistance Shunt ($1/R_p$). En général, la valeur de R_p est plus grande que R_s d'au moins un ordre de grandeur. Pour minimiser les pertes, il faut diminuer R_s et augmenter R_p . Le cas idéal est représenté par R_p égal à l'infini et R_s égale à zéro.

I-5-3. Paramètres des cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par un rendement de conversion η , une tension à circuit ouvert V_{OC} , un courant de court circuit I_{CC} et un facteur de forme ff . Les caractéristiques courant-tension sont utilisées pour déterminer ces paramètres.

a) Courant de court-circuit, I_{cc}

Le courant de court-circuit exprimé en mA, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage et sans application de tension (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température.

b) Tension à circuit ouvert, V_{oc}

La tension de circuit ouvert exprimée en millivolts, est mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans la cellule. Elle dépend de la différence des travaux de sortie des électrodes et de la résistance Shunt. Elle décroît avec la température et varie avec l'intensité lumineuse.

c) Facteur de forme, ff

Les valeurs V_{max} et I_{max} sont définies de telle sorte que le produit $|V_{max} \cdot I_{max}|$ soit maximal (figure 6). Ce produit correspond à la puissance maximale P_{max} pouvant être délivrée par la cellule photovoltaïque. Ce point P_{max} est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes Ox , Oy et les droites $x=I_m$ et $y=V_m$ passe par un maximum.

Le nom facteur de forme (fill factor) dérive de la représentation graphique. Il est égal au rapport de la surface du rectangle P_{max} sur celle du rectangle dont les côtés mesurent V_{oc} et I_{cc} . Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (I-13)$$

Plus ce paramètre est élevé, l'efficacité de conversion est meilleure. En dehors de ce point de fonctionnement P_m particulier, la diminution du courant par recombinaison intervient à des points de fonctionnement ayant V_x supérieur à V_m et des pertes par chauffage (effet joule) des résistances séries apparaissent dans le cas $I > I_m$.

d) Le rendement, η

Le rendement de conversion (efficiency) exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{inc} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{oc}}{P_{inc}} \quad (I-14)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

e) Le rendement quantique, EQE

Le rendement quantique, noté EQE (external quantum efficiency), appelé aussi IPCE (incident photon to current conversion efficiency), est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Ce rendement ne prend pas en considération les photons réfléchis et transmis. Il est donné par la relation suivante :

$$EQE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \cdot \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{hc}{e} \cdot \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda) \cdot \lambda} = 1,24 \cdot \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda) \cdot \lambda} \quad (I-15)$$

Où J_{cc} est la densité de courant de Court-circuit ($A.cm^{-2}$), φ est l'éclairement reçu par l'échantillon ($w.cm^{-2}$), λ est la longueur d'onde monochromatique (nm), h est la constante de Planck (J.s), c est la vitesse de la lumière (μms^{-1}), e la charge électronique et E_{pb} l'énergie du photon.

Le rapport $J_{cc}(\lambda)/\varphi(\lambda)$ est appelé réponse spectrale, noté $SR(\lambda)$. Cette dernière représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde. Elle est souvent utilisée dans le marché de l'électronique comme caractéristique des photodiodes. EQE peut s'écrire selon l'expression :

(I-16)

$$EQE = SR(\lambda) \cdot \frac{hc}{e\lambda}$$

Le rendement quantique dépend du coefficient d'absorption des matériaux utilisés, de l'énergie d'ionisation, de la largeur de la zone de déplétion et de l'efficacité de collecte. Il est mesuré en fonction de la longueur d'onde émise par une source monochromatique. Le rendement de 100% dans le cas idéal (sans pertes) correspond à la récolte par les électrodes d'une paire électron-trou par photon incident. Des valeurs de 50% et 80% on été reportées pour les matériaux organiques et inorganiques respectivement [23],[24].

I-5-4. Pertes limitant le rendement de conversion des photopiles

Le rendement de conversion photovoltaïque peut être exprimé en tenant compte des facteurs de pertes [25] :

$$\eta = \underbrace{\frac{\int_0^{\lambda_g} p(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} p(\lambda)d\lambda} \cdot \frac{E_g \int_0^{\lambda_g} N(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} p(\lambda)d\lambda}}_{\text{Pertres Physiques}} \cdot \underbrace{\frac{qV_{oc}}{E_g} \cdot FF \cdot (1 - R) \cdot \frac{S_t - S_{m\acute{e}tal}}{S_t} \eta_d \cdot \eta_{col}}_{\text{Pertres technologiques}}} \quad (I-17)$$

Les différents facteurs de pertes sont dus soit aux restrictions purement physiques liés au matériau, soit aux limitations technologiques induites par le processus de fabrication et peuvent être optimisés. Les détails de ces pertes sont :

a) Pertes physiques

$$* \text{ Pertes par les photons de grandes longueurs d'onde} = \frac{\int_0^{\lambda_s} p(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} p(\lambda) d\lambda}$$

Tous les photons dont l'énergie est inférieure à $E_g - E_{\text{photon}}$ ne peuvent contribuer à la création de paires électron-trou et ils sont perdus. Ces pertes sont évaluées à 23,5% dans le cas du silicium, sous un éclaircissement AM1.5 [26].

$$* \text{ Pertes due à l'énergie excédentaire des photons} = \frac{E_g \int_0^{\lambda_s} N(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} p(\lambda) d\lambda}$$

Un photon génère seulement une paire électron-trou. Le reste de l'énergie, supérieur à la largeur de bande interdite, est principalement dissipé en chaleur. Dans le cas du silicium et sous un éclaircissement AM1.5, ces pertes sont évaluées à 33% de la puissance totale [26].

$$* \text{ Facteur de tension} = \frac{qV_{oc}}{E_g}$$

Le facteur de tension est le rapport de la tension maximale développée par la cellule (V_{oc}) par la tension correspondant au gap (E_g/q). Pour les cellules à haut rendement, les meilleures valeurs obtenues de V_{oc} sont de l'ordre de 740 mV, avec un facteur de tension de 0,65.

b) Pertes technologiques

$$* \text{ Facteur de forme} = FF$$

Le facteur de forme ne peut dépasser 0.89 [25]. Ce terme dépend fortement des paramètres technologiques modélisés par les résistances série et parallèle.

$$* \text{Réflexion} = (1 - R)$$

Une partie de l'énergie incidente est réfléchiée par la surface non métallisée de la cellule. Les pertes par réflexion sont considérées comme un problème technologique qui peut être résolu par la mise en œuvre de traitements de surface spéciaux : texturisation et couche antireflet.

$$* \text{Taux d'ombrage (Couverture du contact en face avant)} = \frac{S_t - S_{\text{métal}}}{S_t}$$

$S_t - S_{\text{métal}}$ est la superficie de la face avant non couverte par le contact métallique et S_t est l'aire totale. Le taux d'ombrage est un compromis entre les pertes de puissance dues à la couverture partielle de l'émetteur par les contacts et les pertes de facteur de forme provoquées par la résistance série, liée à la largeur de la métallisation.

$$* \text{Absorption partielle (Absorption incomplète due à l'épaisseur limitée de la cellule)} = \eta_d$$

Des techniques de piégeage par réflexion sur la face arrière peuvent augmenter de manière significative l'absorption, particulièrement dans le cas des cellules très fines.

$$* \text{Collection partielle} = \eta_{\text{col}}$$

C'est le rapport entre le nombre de porteurs effectivement collectés et le nombre total de porteurs photogénérés. En effet, certains porteurs se recombinent dans le volume ou à la surface de la cellule, ce phénomène dépendant directement de la durée de vie des porteurs minoritaires. Des procédés de croissance du silicium et de réalisation des cellules peuvent réduire ces recombinaisons à un minimum fondamental.

I-6. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches, l'élément de base de ses structures est la jonction pn qui joue le rôle principal dans le dispositif solaire. Elle est le siège de la génération des porteurs et de leurs séparations.

Les progrès réalisés en termes de rendement des cellules conventionnelles fabriquées dans l'industrie ont permis de passer d'un rendement de conversion moyen de 10% en 1979 à 18% en 2008 grâce à l'implémentation de nouvelles technologies.

La plupart des cellules solaires industrielles ont aujourd'hui un rendement compris entre 13% et 18%, tandis que les technologies utilisés en laboratoire permettent d'atteindre des rendements entre 20% et 24% en limitant les pertes optiques, les pertes par recombinaison et celles par résistance (Figure 1-12).

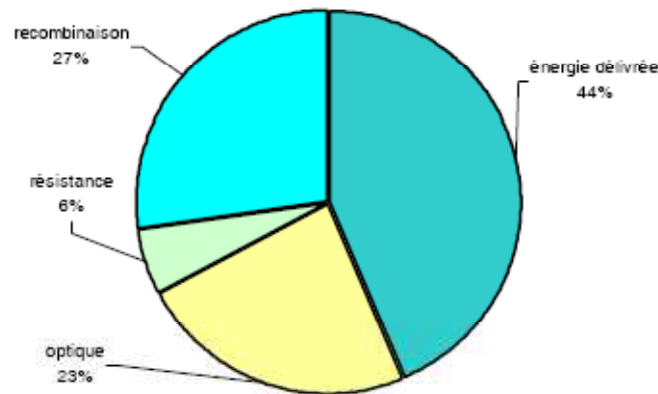


Figure I-12 : Impact relatif des pertes optiques, résistives et par recombinaison pour une cellule mc-Si industrielle [27]

Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentées dans chaque composant. La structure d'une cellule photovoltaïque standard industrielle est présentée sur la figure I-13

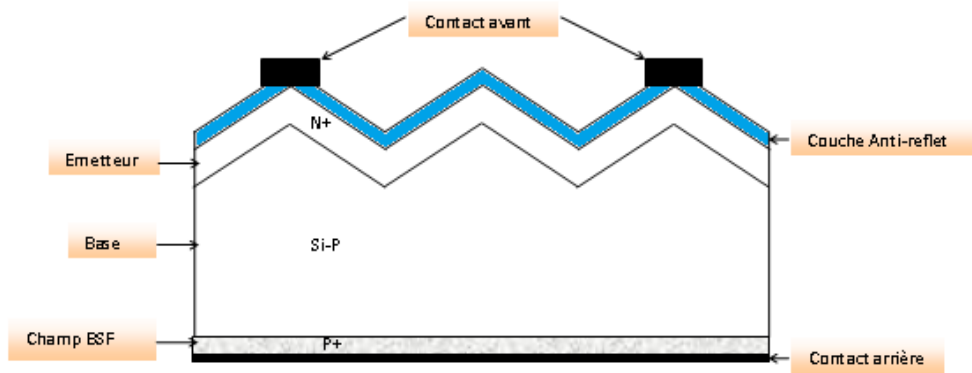


Figure I-13 : Représentation simplifiée d'une cellule photovoltaïque standard

I-6-1. Contacts face avant et arrière

Les contacts métalliques de l'émetteur et du 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 ainsi que le rendement [28].

Les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie [29]. Les doigts de sérigraphie possèdent une largeur minimale de $100\mu\text{m}$ et une épaisseur de $10\mu\text{m}$ à $30\mu\text{m}$ permettant de conduire une forte densité de courant [30]. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées. La qualité de contact sur la surface avant dépend fortement du niveau de dopage en surface et du type de texturisation.

Les contacts avant sont déposés avec une pâte contenant essentiellement de l'argent à travers d'une grille. Puis, la pâte est séchée dans une étuve à air à 150°C pendant un quart d'heure. Ensuite, de même pour la métallisation arrière une pâte en aluminium est déposée sur la quasi-totalité de cette face.

I-6-2. La couche anti-reflet

La qualité de photons pénétrant la cellule photovoltaïque dépend de la réflectivité de sa surface. La réflectivité caractérise la quantité de photons réfléchi par la surface, soit une perte du rayonnement incident. Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface, cette dernière est

recouverte d'une couche anti-réfléchissante (Anti-Reflective Coatings ARC). Le rôle de la couche anti-réfléchissante est de réduire la réflectivité de la cellule au niveau de la face avant. Sans couches anti-réfléchissantes, la pile solaire agit comme un miroir et reflète jusqu'à 33% de la lumière incidente sur la cellule. Cette couche réduit au minimum cette réflexion, en ramenant les pertes de réflexion à moins de 5% de sorte que la lumière du soleil va atteindre la surface de la cellule et diminuer les pertes optiques. Différentes couches anti réfléchissantes sont utilisées en photovoltaïque [31], elles peuvent être isolantes comme le TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 et SiN_x ou conductrice comme le ZnO ou ITO .

La réflectivité dépend de l'indice de réfraction du matériau de l'épaisseur de la couche déposée, de l'angle d'incidence et de l'état de polarisation du rayon incident. Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{(2N + 1)\lambda}{4.n_{CAR}} \quad (\text{I-18})$$

Avec : $N = \text{entier} = 0, 1, 2, 3, \dots$

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/couche anti réfléchissante et couche anti réfléchissante/semiconducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche anti-reflet est utilisée avec deux diélectriques différents.

I-6-3. La texturation de surface

La texturation est utilisée pour diminuer la réflectivité. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale (directe ou inverse). Différents procédés sont utilisés pour texturer la surface du matériau : alcaline [32], acide [33], plasma [34], mécanique [35], laser [36] ou par utilisation de silicium poreux [37]. Le type de texturation isotropique (indépendant de l'orientation cristalline) ou anisotropique (dépendant de l'orientation cristalline) suppose l'utilisation de techniques chimiques différentes. La texturation par plasma utilise des réactifs à base de chlore (BCl_3 , Cl_2) ou de fluor (SF_6 , CF_4). Cette technique présente actuellement un intérêt de plus en plus important car elle limite la consommation de

produits chimiques et d'eau dé ionisée très coûteuse. Elle peut prétendre à des qualités de texturisation excellentes (texturisation isotropique), à des diminutions du taux de casse (contraintes mécaniques réduites) et à une plus grande flexibilité du procédé de fabrication.

I-6-4. Formation de l'émetteur

L'émetteur est en général formé par diffusion des dopants à partir d'un verre de phosphore obtenu suite à une oxydation thermique de la surface du Si sous une atmosphère de POCl_3 et d'oxygène.

Pour favoriser le contact entre le métal et la surface, la concentration de dopants en surface doit être élevée. Ce fort dopage entraîne des recombinaisons par mécanisme Auger à la surface faisant augmenter le courant de saturation de l'émetteur I_c [38]. L'épaisseur de l'émetteur dépend de la technique choisie pour réaliser les contacts. Sa valeur est de quelques dixièmes de microns. Si la technique de réalisation des contacts métalliques impose un émetteur épais (cas d'une métallisation par sérigraphie), là serait logiquement une mauvaise conversion de la lumière bleue. Pour obtenir une bonne réponse bleue, il faut réaliser un émetteur d'épaisseur variable, mince loin des métallisations mais épais au voisinage de celles-ci.

I-6-5. La région de la base

Cette couche de la cellule est composée de silicium dopée P. Elle possède donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à une couche de silicium pur, les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous, positifs.

I-6-6. Le champ BSF

Un BSF (Back Surface Field) est une couche fortement dopée sur la face arrière de la cellule. Cette zone a le même type de dopage que celui de la base, conduisant à une structure p-p⁺. Ce dernier consiste à créer une barrière de potentiel sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence du niveau de dopage entre la base et

le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Donc le but du champ arrière est de diminuer la vitesse de recombinaison.

Le BSF le plus utilisé dans l'industrie photovoltaïque consiste en une couche d'aluminium déposée sur la face arrière, suivie d'un traitement thermique conduisant à un alliage de silicium et d'aluminium. La largeur du BSF va de quelques micromètres à plus de $10\mu\text{m}$ [39].

L'effet d'un BSF est souvent modélisé par l'utilisation d'une vitesse de recombinaison de surface effective, qui est définie à la frontière de la région quasi-neutre de la base. Les valeurs typiques de ces vitesses obtenues avec un BSF en aluminium vont de 200 à 1000 cm/s, avec des variations selon le profil de dopage et la profondeur du BSF [39].

Le principe de la formation d'un BSF est comme suit :

Quand le substrat de silicium recouvert d'une couche d'aluminium est porté à une température supérieure à celle de l'eutectique (577°C), un liquide est formé, mettant en jeu tout l'aluminium déposé et la quantité de silicium nécessaire. Lorsque le substrat est refroidi, la concentration de silicium dans la phase liquide diminue. Le silicium en excès est épitaxié à l'interface Si/liquide. La couche de silicium recristallisée est dopée à l'aluminium jusqu'à la solubilité limite propre à cette température. Quand la température eutectique est atteinte, le liquide restant est solidifié sans croissance supplémentaire de silicium.

I-7. Choix du matériau Silicium

Nous abordons dans ce paragraphe quelques notions élémentaires relatives à ce matériau qui est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel.

Le silicium a un gap de 1.12 eV à température ambiante et pression atmosphérique, correspondant à une longueur d'onde de 1107 nm. C'est un semiconducteur à gap indirect. Le minimum énergétique le plus bas de la bande de conduction n'est pas, au même moment \vec{k} , à la valeur maximale la plus haute de la bande de valence. Pour des transitions directes d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, les énergies des photons doivent être beaucoup plus grandes que celles de la bande interdite. Les transitions peuvent aussi se produire à des

énergies plus basses par un processus à deux étapes faisant intervenir non seulement des photons et des électrons mais aussi des phonons (vibration du réseau cristallin). Une conséquence du gap indirect est que l'absorption optique est réduite de manière significative dans le visible car l'absorption de photons implique des phonons afin de respecter la conservation de la quantité de mouvement.

L'interaction entre les photons et un semiconducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde (figure I-14). Nous constatons que pour le silicium, la majorité des photons incidents de longueur d'onde inférieure à 365 nm est absorbée dans les 10 premiers nanomètres du matériau. Ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'onde plus importantes. Il faut alors qu'un ou plusieurs phonons viennent assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction, réduisant ainsi la probabilité de transition. Le coefficient d'absorption diminue donc pour des longueurs d'onde croissantes. Pour les photons d'énergie inférieure au gap, la transition n'est plus possible et le photon n'est plus absorbé.

L'interaction photon/électron au sein du semiconducteur se traduit finalement par le taux de génération optique, d'une paire électron, qui modifie localement la conductivité du matériau. Les porteurs minoritaires sont métastables et n'existent, en moyenne, que pour un temps égal à la durée de vie des porteurs minoritaires. Cette grandeur définit la durée de vie moyenne avant que les porteurs ne se recombinent et elle est liée à la longueur et au coefficient de diffusion du matériau par la relation :

$$L_D = \sqrt{D_{n,p} \cdot \tau} = \sqrt{\frac{kT}{q} \mu_{n,p} \cdot \tau} \quad (\text{I-19})$$

avec : L_D : longueur de diffusion, $D_{n,p}$: coefficient de diffusion des électrons ou des trous ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), k : constante de Boltzmann, T : température en Kelvin, q : charge électrique, τ : durée de vie des porteurs dans le matériau (s), $\mu_{n,p}$: mobilité des porteurs (électrons ou trous) ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$).

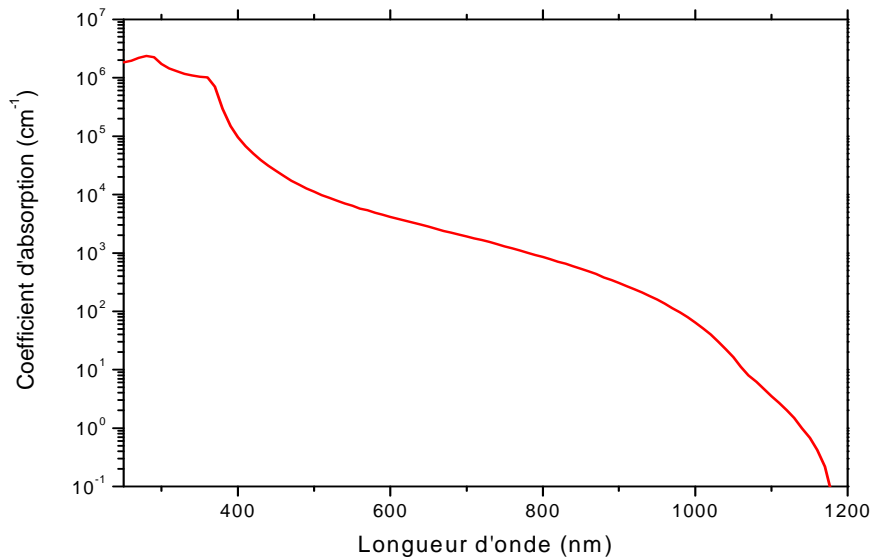


Figure I-14 : Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde [40]

L'utilisation du silicium pour la fabrication de modules photovoltaïques se justifie par l'excellente connaissance physique de ce matériau, son abondance sur la croûte terrestre, sa non toxicité et sa stabilité dans le temps, la maîtrise de sa technologie, la présence des plateaux techniques légués par l'industrie micro-électroniques et aussi par des qualités photovoltaïques assurant au final un bon rendement de conversion.

I-8. Choix de la cellule à contacts arrière inter digités

Le coût élevé de la production industrielle photovoltaïque reste une question majeure. Afin de réduire le coût de production il est essentiel de trouver un équilibre entre une technologie efficace et un prix raisonnable, tout en contrôlant l'impact environnemental du procédé de fabrication. Parmi les différentes cellules solaires destinées à améliorer l'efficacité, les cellules à contacts arrière inter digités (Interdigitated Back Contact) ou IBC (Rear Contact Cell) figure I-15. Cette cellule représente une option prometteuse pour compléter le champ d'application des cellules photovoltaïques. Les principaux avantages de cette structure sont :

- La jonction et les contacts se trouvent sur la face opposée au rayonnement
- L'absence de contacts sur la face avant permettant de réduire le taux d'ombrage estimé en moyenne à 7% sur des cellules conventionnelles
- La cellule à contacts arrière inter digités peut avoir une faible résistance série et améliore le confinement optique, car les contacts sur la face arrière sont réalisées par deux grilles inter digités (collecte des trous et des électrons) et peuvent être librement optimisés en largeur et en hauteur.
- L'absence de jonction fortement dopée à l'avant permet d'atteindre une excellente qualité de surface en terme de passivation et donc de fortes tensions en circuit ouvert grâce à la réduction de courant de saturation.
- L'absence de contacts à l'avant de la cellule permet de réduire la réflectivité donnant lieu à un plus grand courant de court circuit.
- La surface de la jonction p-n est plus petite que celles des cellules conventionnelles ce qui réduit le courant d'obscurité de la cellule.
- Dans l'émetteur la recombinaison est diminuée parce qu'il est situé sur la face non illuminée.
- L'émetteur à faible recombinaison peut être fortement dopé, ce qui augmente la barrière de potentiel de la jonction p-n, donc la tension du circuit ouvert augmente.
- L'assemblage des cellules photovoltaïques à contacts arrière est simplifié car tous les contacts sont situés sur une face de la cellule.
- La libre géométrie de courant à l'arrière permet d'obtenir d'excellentes valeurs de facteur de forme
- L'esthétique des cellules à contacts arrières inter digités entraîne un intérêt supplémentaire pour l'intégration au bâtiment [41].

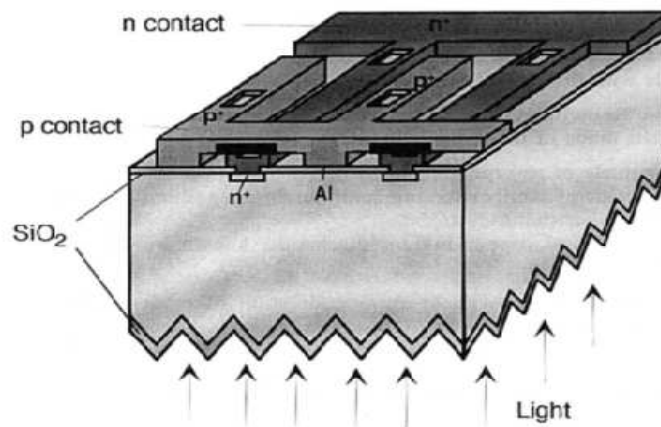


Figure I-15 : Structure d'une cellule photovoltaïque à contact arrière interdigités [42]

Des rendements de 17% ont été obtenus pour la première fois par Schwartz en 1975 [43] sur des cellules cristallines avec deux grilles interdigitées sur la face arrière. Ensuite, une étude théorique a été proposée par Lammert en 1977 [44] sur les cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités du fait de la faible résistance série de cette structure. Swanson fut à la base de l'amélioration d'un point important du concept de la structure à contacts arrière interdigités grâce à la technologie « point contact solar cell ». En 1983, Verlinder [45] a utilisé un modèle analytique pour calculer l'épaisseur optimale du substrat en fonction de la longueur de diffusion et de la vitesse de recombinaison. L'institut Fraunhofer a également développé des cellules à contacts arrière interdigités atteignant un rendement de 22,1% en utilisant une technologie de pointe avec plusieurs étapes de photolithographie [46]. D'autres groupes ont développé des procédés adaptés à cette structure dont l'institut national des sciences appliquées de Lyon pour application sur substrat mince [47].

La première ligne pilote de production des cellules à contacts arrière interdigités a commencé chez Sunpower Corporation en 1993 [48]. Sunpower a démontré la possibilité de fabriquer ce type de cellules avec un rendement moyen de 21,5% et un taux de production de 90%. Aussi en 2001, les cellules MAXIS BC+ sur silicium multicristallin avec contacts arrière sérigraphiés industrialisés à photovoltech en Belgique [49]. Les structures Pegassus et A300 qui est représentée sur la figure I-16 de Sunpower sont aujourd'hui les meilleurs exemples de cellules à contacts arrière interdigités.

Les deux principaux désavantages des cellules à contacts arrière interdigités sont :

- la complexité de la structure nécessitant de nombreuses étapes de photolithographie, difficilement adaptées à une application industrielle,
- la qualité du substrat doit être " bonne ", pour que la longueur de diffusion des porteurs minoritaires représente 2 à 4 fois l'épaisseur de la cellule.

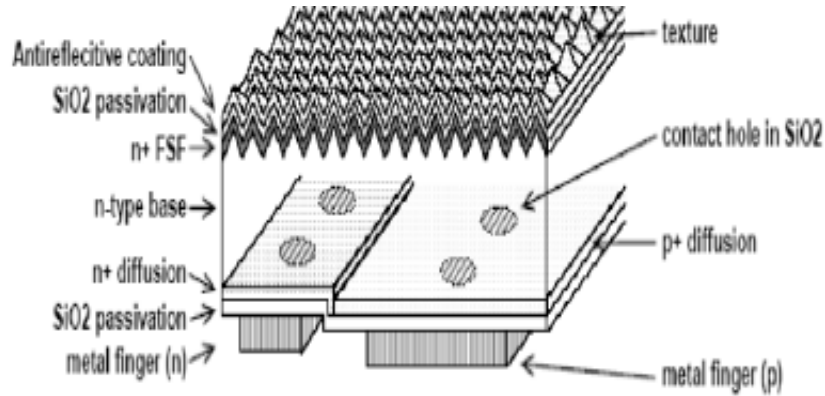


Figure I-16 : Structure d'une cellule inter digité A300 développée par Sunpower Corp

I-9. Conclusion :

Le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau industriel, connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Ce chapitre servira de base théorique pour la suite de notre thèse. Il nous a permis d'aborder le principe de la conversion et les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir. La description des pertes principales ont permis de justifier en partie les valeurs limites de rendements obtenues actuellement. Les différentes régions de la cellule conventionnelle ainsi que les technologies utilisées par l'industrie ont été présentées. Enfin, nous avons montré l'intérêt de la technologie des cellules solaires à contacts arrières inter digités.

Dans le deuxième chapitre nous aborderons les modèles physiques utilisés dans la simulation numérique.

I-9. Références bibliographiques

- [1] K.W.FORD, « *Studies on the more efficient use of energy* ». Editor APS New York (1975)
- [2] D.M. CHAPIN, C.S. Fuller et G.L. Pearson, *Journal of Applied Physics Vol.25* (1954), p.676
- [3] <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>
- [4] C. HONSBURG, S.BOWDEN, « *Photovoltaics Devices, systems and Applications* » (PVCDROM). Sydney: univ. of New South Wales, 1998.
- [5] ASTM D 3565, « *Standard Test Method for Tableware Pattern Removal by Mechanical Dishwasher Detergents* », ASTM international
- [6] GUEYMARD.C, « *The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models*», Solar Energy, volume 76, issue 4, (2004), P 423-453
- [7] *le baromètre du photovoltaïque*. Systèmes solaires n°154, (2003), pp. 41-52.
- [8] PETIBON.S: « *Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques*, Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2009.
- [9] PLATZ, R.; VAUCHER, N.P.; FISCHER, D.; MEIER, J.; SHAH, A.; « *Improved micromorph tandem cell performance through enhanced top cell currents* », Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE, 29 Sept.-3 Oct. 1997, pp.691 – 694
- [10] GOYA, S.; NAKANO, Y.; YAMASHITA, N.; MORITA, S.; YONEKURA, Y.; «*Development of amorphous silicon/microcrystalline silicon tandem solar cells* », Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference on, Volume 2, 12-16 May 2003 pp.:1570 - 1573 Vol.2
- [11] HAHN, G.; SEREN, S.; KAES, M.; SCHONECKER, A.; KALEJS, J.P.; DUBE, C.; GRENKO, C.; BELOUET, C. « *Review on Ribbon Silicon Techniques for Cost Reduction in PV Photovoltaic Energy Conversion*», Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Volume 1, May 2006 PP.972 – 975 Digital Object Identifier 10.1109
- [12] ZHAOJ., WANGA., WENHAM S.R. « *21,5% efficient 47µm thin layer silicon cells*». Proceeding of the 13th European PV solar Energy Conference, Nice, France, 1995, pp. 1566-1569.
- [13] GREEN M.A. « *Progress and outlook for high efficiency crystalline silicon solar cells*». Proceeding of the 11th PV Solar Energy Conference, Sapporo, Hokkaido, Japan, 1999, pp. 21-24.
- [14] ZHAOJ., WANGA., GREEN M.A « *High efficiency PERL and PERT silicon solar cell on FZ and MCZ substrates*», proceeding 11th Internat. Photovolt.Sience and Engineering Conf. Sapporo, Japan, 1999, pp. 557
- [15] LIYUAN HAN; FUKUI, A.; FUKU, N.; KOIDE, N.; YAMANAKA, R.; « *High Efficiency of Dye- Sensitized Solar Cell and Module* », Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Volume 1, May 2006 PP.179 – 182 Digital Object Identifier 10.1109/WCPEC.2006.279411

- [16] Communiqué de presse du NREL, 24 mars 2008, « Record Makes Thin-Film Solar Cell Competitive with Silicon Efficiency». www.nrel.gov/news/press/2008/574.html
- [17] http://www.nrel.gov/pv/thin_film/.../kaz_best_research_cells.ppt
- [18] CLAVERIE.A, « *Etat de l'art mondial de la technique photovoltaïque et politiques de promotion* ». Séminaire sur l'Electricité Photovoltaïque, Nice, 1994, p.13
- [19] MATHIEU.H, « *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques* ». Paris : Ed.Masson, 1990, p.458-473
- [20] ORGERET.M, « *Les piles solaires, le composant et ses applications* ». Paris : Ed. Masson, 1985, p.247
- [21] BALDOMERO GARCIA « *Indium Gallium Nitride Multijunction Solar Cell Simulation using Silvaco Atlas* » these de Magister Monterey California, June 2007.
- [22] GREEN.M.A. « *Solar cell* », Ed, University of New South Wales, 1992, p.336
- [23] C. J. BRABEC, N. SEDAR SARICIFTCI, J. C. HUMMELEN, *Adv. Funct. Mater.* 11, 15 (2001)
- [24] A. GOETZBERGER, C.HEBLING, Hans-Werner Schock, *Materials Science and Engineering R*, 40, 1 (2003)
- [25] SZLUFCHIK J. ET AL « *Low-cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells*». Proc. of the IEEE, vol. 85, No.5, 1997, pp. 711-729.
- [26] RICAUD A. « *Photopiles solaires. Lausanne, Suisse : Presse polytechniques et universitaires romandes*», 1997, PP.332
- [27] PHD , D.H. MCDONALD : « *recombination and trapping in multicrystalline silicon solar cells* », Australian National University, Canberra, Australia, May 2001.
- [28] M.BASHAHU, A.HABYARIMANA. « *Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance* ». Renewable Energy, 1995, vol.6, p.129-138
- [29] A.DZIEDZIC, J.NIJS, J.SZLUFCHIK: « *Thick film fine line fabrication techniques- Application to front metallization of solar cells* », Hybrid circuits, No30, January 1993.
- [30] YANNICK VESCHETTI « *modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince* ». Thèse de doctorat octobre 2005.
- [31] JIAANHUA ZHAO, AIHUA WANG, PIETRO P.ALTERMATT, STUART R.WENHAM AND MARTIN A.GREEN « *24% efficient perl silicon solar cell :Recent improvements in high efficiency silicon cell Research* ». Solar En.Mat.&Sol.cells, Vol.41-42,1996, p.87-99.
- [32] K.SOONWOO, Y.JONGHEOP, Y.SEWANG, S.L.JOHN, K.DONGHWAN
« *Effects of textured morphology on the short circuit current of single crystalline silicon solar cells: Evaluation of alkaline wet-texture processes* ». Current Applied Physics, Vol.9, 2009, p. 1310-1314.
- [33] M. J. STOCKS, A.J. CARR AND A.WWBLAKERS. « *Texturing of polycrystalline silicon* ». Solar En.Mat.&Sol.Cells, 1996, vol. 40, p. 33-42.

- [34] G.KUMARAVELU, M.M.ALKAISSI, D.MACDONALD, J.ZHAO, B.RONG, A.BITTAR « *Minority carrier lifetime in plasma-textured silicon wafers for solar cell* » Solar Energy Materials & Solar Sell, Vol. 87, 2005, p.99-106.
- [35] P.FATH, C.BORST ET AL. « *Progress in a novel high-throughput mechanical texturisation technology for highly efficient multicrystalline silicon solar cells*». Solar En.Mat.&Sol. Cells, 1997, Vol.48, p.229-236.
- [36] L.A.DOBRZANSKI, A.DRYGALA « *Laser processing of multicrystalline silicon for texturization of solar cell* ». Journal of Materials Processing Technology, Vol.191, 2007, p.228-231.
- [37] M.LIPINSKI, P.PANEK, E.BELTOWSKA, R.CIARCH « *Double porous silicon layer on multicrystalline Si for photovoltaic application* » Solar En.Mat.&Sol. Cells, Vol.72, 2002, p.271-276.
- [38] R.R KING, R.A. SINTON, R.M. SWANSON: « *Studies of diffused phosphorous emitters: saturation current, surface recombination velocity and quantum efficiency*, IEEE Transactions on electron devise, vol. 37, No.2 Feb 1990.
- [39] LÖLGEN PETER « *Surface and volume recombination in silicon solar cells*. These, Pays Bas: Universiteit Utrecht, Faculteit Natuur en Sterrenkunde, 1995, P.152
- [40] SZE S.M., Semiconductor devices. New York : John Wiley, 1981, p.867
- [41] J. JÜRGENS, P.ASHENBRENNER, V.DESAI, C.ERBAN : « *Back Contact Solar Cells in BIPV applications – A new dimension of architectural PV design* », proceeding of the 20st European PV Solar Energy Conference, Barcelona, June 2005.
- [42] SPRINGER.BERLIN « *Photovoltaic Solar Energy Generation* », Vol. 112,2005, p.36
- [43] SCHWARTZ. R.J, LAMMERT. M.D « *Silicon solar cells for high concentration applications*» Internat. Electron Devices Meeting, Washington DC, 1975, P.350
- [44] LAMMERT M.D, SCHWARTZ. R.J « *The interdigitated Back Contact Solar Cell: A silicon solar cell for use in concentrated sunlight*». IEEE Trans. Electron . Device, 1977, Vol. ED-24, P.337
- [45] VERLINDER.P, VAN DER WIELE.F « *Optimization of substrate thickness for interdigitated back contact silicon solar cells* » Elsevier, Solar Sells, 1983 Vol. 9, P.247
- [46] GLUNZ. S.W, KNOBLOCH. J, HEBLING. C WETTING. W «*The range of high efficiency silicon solar cell fabricated at Fraunhofer ISE* » proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Conference, Anaheim, California, USA, 1997, p. 231, 234
- [47] NICHIPORUK. O « *Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigitées* », thèse de Doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [48] Sun Power Corporation : <http://sunpowercorp.com/html/Products/Solar/solarcells.html>
- [49] Photovoltech : MAXIS BC+ : http://www.be/html/UK/downloads/MaxisBC_UK.pdf

Chapitre II

*Revue des modèles physiques utilisés dans la
simulation numérique*

II-1. Introduction

Le choix des modèles physiques est important pour améliorer la précision des résultats de simulation numérique. Pour cela, le logiciel SILVACO met à notre disposition une grande variété de modèles physiques. La première difficulté de l'utilisateur va donc être de choisir certains modèles par rapport à d'autres qui pourtant décrivent les mêmes phénomènes physiques. L'autre difficulté sera de choisir les modèles en adéquation avec les mécanismes physiques mise en jeu pour les conditions d'utilisation du dispositif.

Ce chapitre met en évidence l'importance du choix des modèles physiques afin d'introduire le lecteur à la logique du processus de simulation. Dans une première partie nous présentons les équations fondamentales dans les semiconducteurs. Dans une seconde partie, nous focalisons sur quelques points particulièrement intéressants tels que la recombinaison qui correspond aux mécanismes conduisant à la perte de paires électron-trou, avec l'énergie excédentaire émise sous forme de phonons ou de photons. Ensuite, nous exposons les modèles de mobilité des porteurs de charges. Les électrons et les trous ont des valeurs de mobilité différentes qui dépendent principalement de nombreux paramètres tels que la température, le dopage, ou encore les collisions des porteurs entre eux ou avec les impuretés. Au final, nous abordons les modèles de rétrécissement de la bande interdite. Quand le niveau de dopage augmente, quelques changements marquent la structure de bande telle que la diminution de la largeur de la bande interdite et l'apparition des *queues* dans les limites des bandes de conduction et de valence. Ces changements sont complexes si le dopage dépend de la position structurée des bandes, par conséquent la structure de bande devient dépendante de la position.

II-2. Equations fondamentales dans les semiconducteurs

Des années de recherche dans la physique des dispositifs à la base des semiconducteurs ont conduit à la réalisation d'un modèle mathématique [1]. Ce modèle est capable d'opérer dans quasiment n'importe quel dispositif à base de semiconducteurs. Il consiste en un ensemble fondamental d'équations qui rassemblent le potentiel électrostatique et les densités de porteurs de

charge dans un domaine de simulation bien précis. Ces équations, qui sont résolues via des logiciels spécifiques de simulation des dispositifs à la base de semiconducteurs, sont dérivées des équations de Maxwell. Elles sont principalement : L'équation de Poisson, les équations de continuité et les équations de transport. L'équation de Poisson lie les variations dans le potentiel électrostatique aux densités locales de charge. Les équations de continuité ou de transport décrivent le mode par lequel les densités d'électrons et des trous se comportent en fonction des processus de transport, de génération et de recombinaison.

Pour que les équations que nous allons présenter dans la suite de ce chapitre soient résolues, une discrétisation a dû être réalisée afin de les appliquer à une grille d'éléments finis utilisés pour représenter le domaine de simulation.

II-2-1. Equation de Poisson

L'équation de Poisson s'exprime par :

$$\operatorname{div}(\varepsilon \nabla \psi) = -\rho \quad (\text{II-1})$$

Où ψ représente le potentiel électrostatique, ε la permittivité électrique ($\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$, ε_0 est la permittivité du vide et ε_r est la permittivité relative du matériau), ρ est la densité volumique nette de charges libres.

Le champ électrique est donné par la relation :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\operatorname{grad}}(\psi) \quad (\text{II-2})$$

II-2-2. Equations de continuité

Les équations de continuité décrivent la vitesse de variation en fonction du temps des concentrations des porteurs. Les causes de la variation des concentrations des trous ou des électrons sont :

- les générations dues aux agents externes (qui sont souvent la création de paires électron-trou) ;
- les générations-recombinaisons internes ;

- les phénomènes de transport (par la présence des courants de conduction ou diffusion).

L'équation de continuité s'exprime par :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \quad \text{pour les électrons} \quad (\text{II-3})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad \text{pour les trous} \quad (\text{II-4})$$

G_n et G_p sont les taux de génération pour les électrons et les trous par des agents externe, R_n et R_p sont respectivement les taux de recombinaisons (internes) pour les électrons et les trous, J_n et J_p sont les densités des courants des électrons et des trous.

II-2-3. Equations de transport

Dans le cas des hypothèses de base des équations de la physique des semiconducteurs (le champ magnétique extérieur est nul, la température est uniforme dans toute la structure) les causes de l'apparition des courants électriques sont le champ électrique et le gradient des concentrations des porteurs de charge. Les courants déterminés par le champ électrique s'appellent *courant du champ* ou *courant de drift*. Et les courants déterminés par le gradient de concentration des porteurs s'appellent *courant de diffusion*.

Dans le cas hors équilibre thermodynamique, nous définissons deux quasi-niveaux de Fermi, un pour les électrons et un pour les trous, Φ_n et Φ_p , qui expriment la modification de la probabilité d'occupation des états.

Ainsi les densités des courants des équations de continuité peuvent être approximées à l'aide de la théorie de transport de Boltzmann par le modèle de *drift-diffusion* [2] (modèle isothermique de transport). Dans ce modèle, les densités de courants sont exprimées en fonction des quasi-niveaux de Fermi par les expressions :

$$\vec{J}_n = -q\mu_n n \nabla \Phi_n \quad (\text{II-5})$$

$$\vec{J}_p = -q\mu_p p \nabla \Phi_p \quad (\text{II-6})$$

Avec q est la charge électrique, μ_n et μ_p sont les mobilités des électrons et des trous.

Les expressions pour les concentrations des électrons et des trous sont:

$$n = n_{ie} \exp\left[\frac{q(\psi - \varphi_n)}{kT_L}\right] \quad (\text{II-7})$$

$$p = n_{ie} \exp\left[\frac{q(\psi - \varphi_p)}{kT_L}\right] \quad (\text{II-8})$$

Avec n_{ie} la densité effective intrinsèque

En introduisant ces équations dans les expressions de densité de courant, on obtient:

$$\vec{J}_n = qD_n \nabla n - qn\mu_n \nabla \psi - \mu_n n (kT_L \nabla(Ln n_{ie})) \quad (\text{II-9})$$

$$\vec{J}_p = -qD_p \nabla p - qp\mu_p \nabla \psi + \mu_p p (kT_L \nabla(Ln n_{ie})) \quad (\text{II-10})$$

Avec D_n et D_p sont les coefficients d'Einstein qui ont pour expression :

$$D_n = \frac{k_B T}{q} \mu_n \quad (\text{II-11})$$

$$D_p = \frac{k_B T}{q} \mu_p \quad (\text{II-12})$$

II-2-3-1. Diffusion

Les courants de diffusion sont générés par l'existence d'une concentration non uniforme des électrons ou des trous dans le semiconducteur. 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 quantitativement par la première loi de Fick qui montre la proportionnalité entre le flux de particules \vec{F} et le gradient de leur concentration $\vec{\nabla}C$ selon la relation :

$$\vec{F} = -D \cdot \vec{\nabla}C \quad (\text{II-13})$$

Le facteur de proportionnalité D s'appelle *coefficient de diffusion*. En appliquant la relation (II-13) pour les électrons ($C=n, D=D_n$) et les trous ($C=p, D=D_p$) nous trouvons les densités des courants de diffusion :

$$J_{n,diff} = -q\vec{F}_n = qD_n \nabla n \quad (\text{II-14})$$

$$J_{p,diff} = q\vec{F}_p = -qD_p \nabla p \quad (\text{II-16})$$

qui représente en pratique le premier terme des équations (II-9) et (II-10).

Notons que le troisième terme des équations (II-9) et (II-10) est aussi un courant de diffusion. Mais il est dû au gradient des densités effectives d'états n_{ie} .

II-2-3-2. 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 par :

$$\vec{v}_n = -\mu_n \vec{E} \quad \text{pour les électrons} \quad (\text{II-17})$$

$$\vec{v}_p = \mu_p \vec{E} \quad \text{pour les trous} \quad (\text{II-18})$$

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

Le courant de drift est donné par :

$$\vec{J}_{n,drift} = -qn\vec{v}_n \quad (\text{II-19})$$

$$\vec{J}_{p,drift} = qp\vec{v}_p \quad (\text{II-20})$$

Ainsi le courant de drift est représenté dans le second terme des équations (II - 9) et (II - 10).

II-3. Génération optique

La génération introduite dans les équations de continuité (II-3) et (II-4) est due aux facteurs externes. Dans notre cas, le facteur externe est la lumière, donc nous avons une génération optique. Sous l'effet de la lumière, des porteurs de charge peuvent être générés dans le semiconducteur par des transitions d'une bande à l'autre (cas des semiconducteurs intrinsèques) ou par des transitions qui impliquent des états dans le gap (cas des semiconducteurs 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 photons $n_0 = \frac{P}{h\nu}$. Au temps t et à l'interface avec la surface du semiconducteur, une partie de la lumière incidente est transmise une autre réfléchiée et une autre absorbée à la surface (figureII-1).

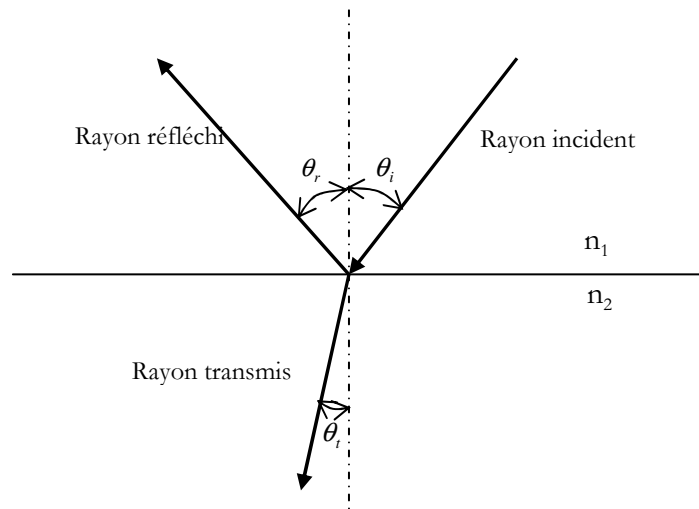


Figure II-1 : les angles d'incidence, de réflexion et de transmission d'un rayon incident de lumière.

Les coefficients de réflexion R , et de transmission T , sont calculés ainsi :

$$R = \left(\frac{E_r}{E_i} \right)^2 \quad (\text{II-21})$$

$$T = \left(\frac{E_r}{E_i} \right)^2 \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \quad (\text{II-22})$$

où E_i est l'intensité du rayon incident sous l'angle d'incidence θ_i par rapport à la normale à la surface d'incidence, E_r est l'intensité du rayon réfléchi, E_t est l'intensité du rayon transmis, n_1 représente l'indice de réfraction du milieu dans lequel se trouve la source de lumière et n_2 représente l'indice de réfraction du semiconducteur. En fonction de la polarisation de la lumière, nous avons pour E_r et E_t les expressions suivantes:

$$\begin{cases} E_r = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} E_i \\ E_t = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} E_i \end{cases} \quad \text{polarisation parallèle} \quad (\text{II-23})$$

$$\begin{cases} E_r = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} E_i \\ E_t = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} E_i \end{cases} \quad \text{polarisation perpendiculaire} \quad (\text{II-24})$$

Notons aussi la relation suivante entre le coefficient d'extinction et l'indice de réfraction :

$$N = n + ik \quad (\text{II-25})$$

où N représente l'indice optique complexe, k est le coefficient d'extinction du matériau traduisant l'absorption du rayonnement par le matériau, n est l'indice de réfraction. C'est le rapport entre la vitesse de propagation de la lumière dans le vide et la vitesse dans le milieu étudié. Le coefficient d'extinction k est lié au coefficient d'absorption α , pour chaque longueur d'onde λ , par la relation :

$$a = \frac{4\pi}{\lambda} k \quad (\text{II-26})$$

La figure (II-2) représente l'évolution de l'indice de réfraction n et le coefficient d'extinction k du silicium en fonction de la longueur d'onde.

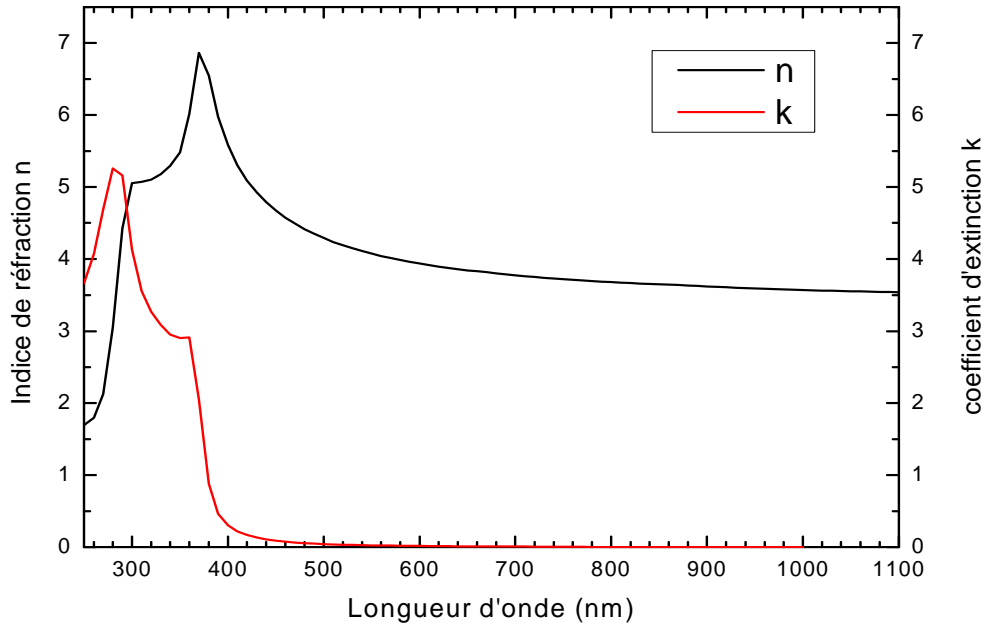


Figure II- 2: L'évolution de l'indice de réfraction n et le coefficient d'extinction k du silicium en fonction de la longueur d'onde [3]

On constate dans la figure (II-2) que le coefficient d'extinction devient négligeable pour des longueurs d'ondes supérieures à 400nm. Dans ce cas, on peut alors considérer que l'indice de réfraction seulement.

La déviation de l'onde entre un milieu d'indice n_1 et un milieu d'indice n_2 est calculé selon les lois de Snell-Descartes :

$$\theta_r = \theta_i \quad \text{et} \quad n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (\text{II-27})$$

θ_i est l'angle d'incidence (et de réflexion), θ_t est l'angle de réfraction.

Cette équation caractérise le chemin optique de l'onde transmise dans le deuxième milieu, pour le quel on définit le coefficient de transmission T . Le coefficient de transmission est le rapport entre les intensités transmise et incidente, il est compris entre 0 et 1. De manière analogue, la part de l'onde réfléchie est définie par le coefficient de réflexion R . On a donc à l'interface :

$$R + T = 1 \quad (\text{II-28})$$

Si chaque photon absorbé donne naissance à η_0 paires électrons-trou, on peut admettre que le taux de génération optique est donné par la relation :

$$G = \eta_0 \frac{P\lambda}{hc} ae^{-ay} \quad (\text{II-29})$$

y est une distance relative pour le rayon en question, h est la constante de Planck's, λ est la longueur d'onde, c est la vitesse de la lumière.

Cette loi exponentielle d'absorption sera utilisée pour calculer le taux de génération optique. Mais cette méthode a quelques désavantages, par exemple les pertes optiques dues au piégeage de la lumière par diffusion et transmission ne sont pas prises en compte. Ils existent d'autres méthodes qui peuvent calculer la génération optique correctement. Ainsi avec la formule (II-26) s'achève la présentation de la physique de semiconducteurs utilisé pour réaliser nos simulations.

II-4. Mécanismes de recombinaison

La génération dans les semiconducteurs est un processus où des paires électron-trou sont créées. Cependant, la recombinaison est à l'opposé de la génération. Elle correspond aux mécanismes conduisant à la perte de paires électron-trou, avec l'énergie excédentaire émise sous forme de phonons ou de photons. Expérimentalement, elle correspond à une durée de vie des porteurs minoritaires τ capable d'être mesurée. Celle-ci correspond au temps moyen au bout duquel une paire électron-trou générée se recombine. La valeur de ce paramètre peut être déterminée, pour le silicium de type p ou n, à partir du taux de recombinaison U [4]:

$$\tau = \frac{\Delta n}{U} \quad (\text{II-30})$$

Où Δn (Δp) est la densité d'électrons (de trous) en excès.

L'interprétation de la durée de vie n'est pas simple car il existe différents mécanismes de recombinaison intervenant simultanément en surface et en volume d'un échantillon. On définit donc une durée de vie effective, qui tient compte de l'ensemble de ces mécanismes. En générale, c'est cette grandeur qui est mesurée. Nous allons aborder maintenant les trois mécanismes de recombinaisons fondamentaux que sont la recombinaison par piège SRH, la recombinaison Auger et la recombinaison radiative.

II-4-1. Recombinaison SRH (Schokley-Read-Hall)

Le processus de recombinaison Schokley-Read-Hall est schématisé sur la figure II-3. Il fut pour la première fois explicité par Schokley, Read [3] et Hall [5]. Ce processus fait appel à des niveaux d'énergie voisins du milieu du gap (niveaux appelés pièges, dus à certains défauts cristallins ou à la présence de certaines impuretés dans le cristal) qui facilitent la recombinaison des porteurs par un mécanisme en deux étapes. Un électron de la bande de conduction va d'abord se relaxer sur un niveau d'énergie intermédiaire lié à un défaut. Ensuite, une deuxième relaxation va lui permettre de se recombiner avec un trou de la bande de valence. L'efficacité de ce processus dépend de la densité des niveaux profonds et par suite, de la qualité du matériau utilisé et de sa technologie d'élaboration. La recombinaison Schokley-Read-Hall est modélisée par :

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\tau_{po} \left[n + n_{ie} \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT_L}\right) \right] + \tau_{no} \left[p + n_{ie} \exp\left(\frac{-(E_t - E_i)}{kT_L}\right) \right]} \quad (\text{II-31})$$

Où E_t est la position énergétique des états de piège, E_i est le niveau de Fermi dans le semiconducteur intrinsèque, τ_{no} , τ_{po} sont respectivement la durée de vie pour les électrons et les trous, n_{ie} est la concentration intrinsèque, k est la constante de Boltzmann et T_L la température en Kelvin.

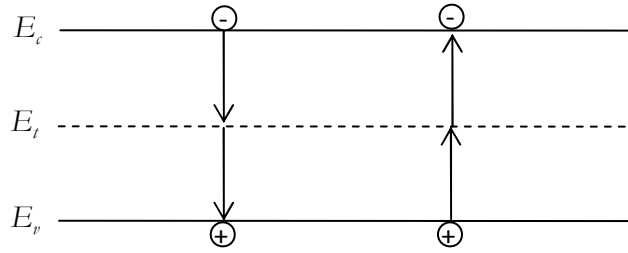


Figure II-3 : Mécanisme de recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH)

Le tableau II-1 représente les paramètres par défaut du modèle de recombinaison Shockley-Read-Hall utilisé dans le logiciel Silvaco.

Tableau I-1 : Paramètres par défaut du modèle de recombinaison Shockley Read Hall dans SILVACO

$(E_t - E_j)$ (eV)	τ_{no} (s)	τ_{po} (s)
0.0	$1.0 \cdot 10^{-7}$	$1.0 \cdot 10^{-7}$

La dépendance de la durée de vie du modèle SRH avec la température est donnée par les deux relations de Klaassen's [6]:

$$\tau_{no}^{-1} = \left(\tau_{ksrhn}^{-1} + C_{ksrhn} \cdot n \right) \left(\frac{300}{T_L} \right)^{G_{ksrhn}} \quad (\text{II-32})$$

$$\tau_{po}^{-1} = \left(\tau_{ksrhp}^{-1} + C_{ksrhp} \cdot n \right) \left(\frac{300}{T_L} \right)^{G_{ksrhp}} \quad (\text{II-33})$$

où n est la concentration d'impureté totale, les autres paramètres des relations (II-32) et (II-33) sont définis par défaut dans le tableau II-2.

Tableau II-2 : Paramètres par défaut des équations (II-32) et (II-33) dans SILVACO

τ_{ksrlm}^{-1} (s)	τ_{ksrlp}^{-1} (s)	C_{ksrlm} (cm ³ /s)	C_{ksrlp} (cm ³ /s)	G_{ksrlm}	G_{ksrlp}
$2.5 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$3.0 \cdot 10^{-13}$	$11.76 \cdot 10^{-13}$	1.77	0.57

Aussi la dépendance de la durée de vie avec le dopage est donnée par les relations de Scharfetter [7] :

$$\tau_n(N) = \tau_{n.min} + \frac{\tau_{n.max} - \tau_{n.min}}{1 + \left(\frac{N}{N_{n.ref}}\right)^\gamma} \quad (II-34)$$

$$\tau_p(N) = \tau_{p.min} + \frac{\tau_{p.max} - \tau_{p.min}}{1 + \left(\frac{N}{N_{p.ref}}\right)^\gamma} \quad (II-35)$$

Où $\tau_{n.max}$, $\tau_{n.min}$, $\tau_{p.max}$, $\tau_{p.min}$ sont les valeurs maximales et minimales de la durée de vie des électrons et des trous respectivement, $N_{n.ref}$, $N_{p.ref}$ est le niveau de référence du dopage pour lequel $\tau(N_{n.ref}) = (\tau_{n.max} + \tau_{n.min})/2$ et $\tau(N_{p.ref}) = (\tau_{p.max} + \tau_{p.min})/2$, γ est l'exposant. Le tableau (II-3) représente les paramètres par défaut :

Tableau II-3 : Paramètres par défaut des équations (II-34) et (II-35) dans SILVACO

$\tau_{n.min}$ (s)	$\tau_{p.min}$ (s)	$\tau_{n.max}$ (s)	$\tau_{p.max}$ (s)	$N_{n.ref}$ (cm ⁻³)	$N_{p.ref}$ (cm ⁻³)	γ (s)
0.0	0.0	$1.0 \cdot 10^{-5}$	$3.0 \cdot 10^{-6}$	$1.0 \cdot 10^{16}$	$1.0 \cdot 10^{16}$	1.0

II-4-2. Recombinaison Auger

Le processus de recombinaison Auger est représenté sur la figure (II-4). L'excès d'énergie issu de la recombinaison d'un électron de la bande de conduction et d'un trou de la bande de valence peut être transféré à une troisième particule libre, électron ou trou. Ces charges sont

considérées comme des particules quasi libres, n'interagissant pas entre elles. La recombinaison Auger est modélisée en utilisant l'expression suivante [8]:

$$R_{Auger} = C_{Aug,n} (pn^2 - nn_{ie}^2) + C_{Aug,p} (np^2 - pn_{ie}^2) \quad (II-36)$$

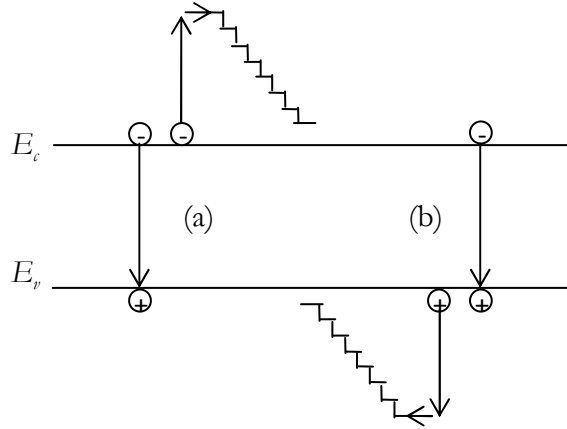


Figure II-4 : Mécanisme de recombinaison Auger. L'excès d'énergie issu de la recombinaison peut être transféré à un électron (a) ou à un trou (b)

Où $C_{Aug,n}$ et $C_{Aug,p}$ sont les coefficients Auger pour les électrons et les trous. Les valeurs par défaut de ces coefficients sont données dans le tableau II-4 :

Tableau II-4 : Paramètres par défaut du modèle de recombinaison AUGER dans SILVACO

$C_{Aug,n}$ (cm ⁶ /s)	$C_{Aug,p}$ (cm ⁶ /s)
$8.3 \cdot 10^{-32}$	$1.8 \cdot 10^{-31}$

Aussi la dépendance du modèle Auger en fonction de la température et du niveau de dopage [9] est donnée par la relation suivante :

$$R_{Auger} = C_n (pn^2 - nn_{ie}^2) + C_p (np^2 - pn_{ie}^2) \quad (II-37)$$

Avec

$$C_n = \left(A_{Aug,n} + B_{Aug,n} \frac{T}{300} + C_{Aug,n} \left(\frac{T}{300} \right)^2 \right) \left(1 + H_{Aug,n} \exp \left(- \frac{n}{N_{0,n}} \right) \right) \quad (II-38)$$

$$C_p = \left(A_{Aug,p} + B_{Aug,p} \frac{T}{300} + C_{Aug,p} \left(\frac{T}{300} \right)^2 \right) \left(1 + H_{Aug,p} \exp\left(\frac{p}{N_{0,p}} \right) \right) \quad (\text{II-39})$$

Les paramètres des relations (II-38) et (II-39) sont définis par défaut dans les tableaux II-5 et II-6:

Tableau II-5 : Paramètres par défaut des équations (II-38) et (II-39) dans SILVACO

$A_{Aug,n}$ (cm ⁶ /s)	$B_{Aug,n}$ (cm ⁶ /s)	$C_{Aug,n}$ (cm ⁶ /s)	$H_{Aug,n}$	$N_{0,n}$ (cm ⁻³)
$6.7 \cdot 10^{-32}$	$2.45 \cdot 10^{-31}$	$-2.2 \cdot 10^{-32}$	3.4667	$1.0 \cdot 10^{18}$

Tableau II-6 : Paramètres par défaut des équations (II-38) et (II-39) dans SILVACO

$A_{Aug,p}$ (cm ⁶ /s)	$B_{Aug,p}$ (cm ⁶ /s)	$C_{Aug,p}$ (cm ⁶ /s)	$H_{Aug,p}$	$N_{0,p}$ (cm ⁻³)
$7.2 \cdot 10^{-32}$	$4.5 \cdot 10^{-33}$	$2.63 \cdot 10^{-32}$	8.25688	$1.1 \cdot 10^{18}$

Ce mode de recombinaison va donc prédominer pour les forts niveaux d'injection (cas des cellules solaire à concentration) ou pour les dopages importants dépassant 10^{17} cm^{-3} [10] (cas des émetteurs fortement dopés). En effet, comme illustre la figure II-5, le mécanisme de recombinaison Auger est proportionnel au carré du dopage et il intervient surtout dans les régions fortement dopées de la cellule photovoltaïque comme celle située en surface de l'émetteur (n^+) ou à la zone de champ de surface arrière (p^+).

Aux faibles niveaux de dopage (inférieur à 10^{16} cm^{-3}), la durée de vie est limitée par la recombinaison SRH et elle varie linéairement avec l'inverse du niveau de dopage.

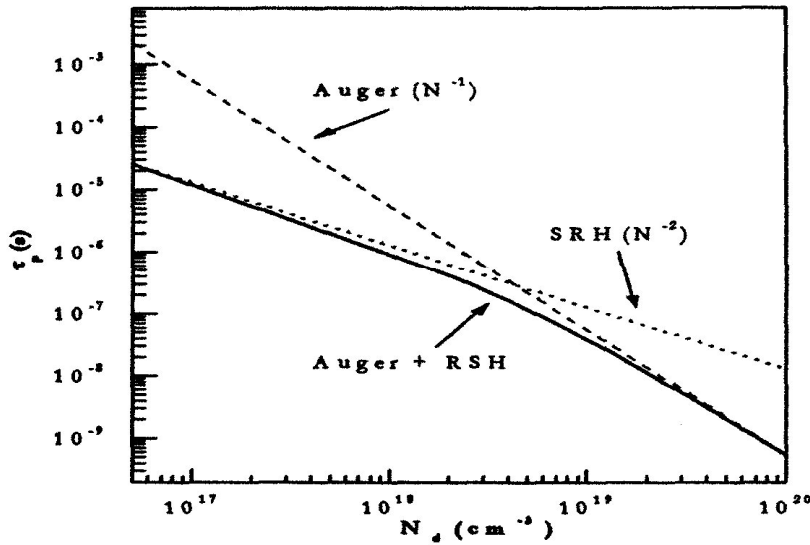


Figure II-5 : Influence du dopage sur les durées de vie Auger et SRH dans le volume du silicium [11]

II-4-3. Recombinaison Radiative

La recombinaison radiative 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 d'énergie proche de celle du gap du matériau (processus inverse de la photogénération). Le mécanisme de recombinaison radiative est un processus dominant dans les semiconducteurs à gap direct comme le GaAs. Pour silicium à gap indirect, ce mécanisme est relativement rare du fait que cette transition ne peut avoir lieu qu'avec l'assistance d'un photon. Ainsi, dans le cadre de notre étude, ce type de recombinaison est négligé devant les autres mécanismes.

II-4-4. Recombinaison en surface

L'ensemble des mécanismes précédents constitue des recombinaisons ayant lieu en volume du matériau. Il faut également considérer les recombinaisons en surface dont le mécanisme est représenté sur la figure (II-6). Le formalisme du mécanisme de recombinaison SRH peut être reformulé dans ce cas, avec des recombinaisons par unité de surface plutôt que par unité de volume. Le taux de recombinaison en surface est donné par l'expression suivante :

$$R_{Surf} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\tau_p^{eff} \left[n + n_{ie} \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT_L}\right) \right] + \tau_n^{eff} \left[p + n_{ie} \exp\left(\frac{-(E_t - E_i)}{kT_L}\right) \right]} \quad (\text{II-40})$$

Où :

$$\frac{1}{\tau_n^{eff}} = \frac{1}{\tau_n^i} + \frac{d_i}{A_i} S_n \quad (\text{II-41})$$

$$\frac{1}{\tau_p^{eff}} = \frac{1}{\tau_p^i} + \frac{d_i}{A_i} S_p \quad (\text{II-42})$$

τ_n^{eff} est la durée de vie effective, les paramètres d_i et A_i sont la longueur et l'épaisseur de l'interface. S_n et S_p sont les vitesses de recombinaison pour les électrons et les trous respectivement par défaut, $S_n = S_p = 0 \text{ cm/s}$.

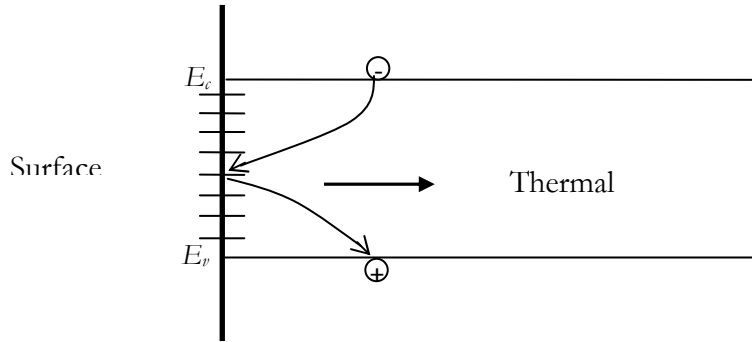


Figure II-6 : Mécanisme de recombinaison en surface

Pour des surfaces fortement dopées, le mécanisme de recombinaison Auger domine la vitesse de recombinaison en surface. Un modèle développé par Cuevas et al [12] permet de déterminer la vitesse de recombinaison effective (figure II-7)

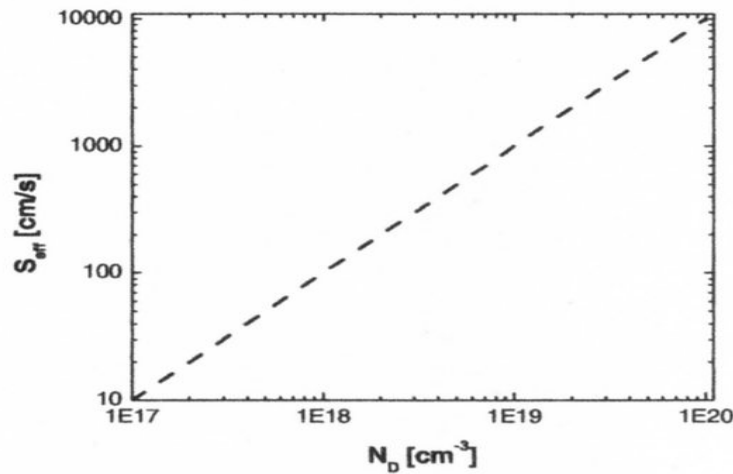


Figure II-7 : *Vitesse de recombinaison effective de surface en fonction du niveau de dopage [12].*

A partir de cette figure, nous constatons que plus le dopage est important et plus la vitesse de recombinaison en surface est grande. Ainsi, il est difficile de prétendre à une passivation de surface.

II-5. Les modèles de Mobilité

La mobilité des porteurs de charge dépend de nombreux paramètres tels que la température, le dopage, ou encore les collisions des porteurs entre eux ou avec les impuretés. Dans ce paragraphe, nous présentons les modèles physiques de mobilité.

II-5-1. Modèle de la mobilité « Masetti »

Dans un semiconducteur dopé, la nature de ce dernier ainsi que la valeur de son dopage influe sur la mobilité. Cela est dû à la dispersion des porteurs par collision avec les impuretés fixes qui a pour conséquence la dégradation de la mobilité. Le calcul de la mobilité μ_n ou μ_p prend en compte cette dégradation dans le modèle de la mobilité. Pour le Silicium, il convient d'utiliser le modèle de Masetti [13].

L'expression de la mobilité des électrons est donnée par :

$$\mu_n = \mu_{min1,n} \exp\left(\frac{-P_{c,n}}{N}\right) + \frac{\mu_{max,n} - \mu_{min2,n}}{1 + \left(\frac{N}{C_{r,n}}\right)^{a,n}} - \frac{\mu_{1,n}}{1 + \left(\frac{C_{s,n}}{N}\right)^{\beta,n}} \quad (\text{II-43})$$

L'expression de la mobilité des trous est donnée par :

$$\mu_p = \mu_{min1,p} \exp\left(\frac{-P_{c,p}}{N}\right) + \frac{\mu_{max,p} - \mu_{min2,p}}{1 + \left(\frac{N}{C_{r,p}}\right)^{a,p}} - \frac{\mu_{1,p}}{1 + \left(\frac{C_{s,p}}{N}\right)^{\beta,p}} \quad (\text{II-44})$$

Où N est la concentration totale des impuretés ionisées ; $\mu_{max,n}$ et $\mu_{min,p}$ sont les mobilités qui tiennent compte des interactions électrons-photons ; $\mu_{min1,n}$, $\mu_{min2,n}$, $\mu_{min1,p}$, $\mu_{min2,p}$ sont les mobilités de référence ; $P_{c,n}$, $C_{r,n}$, $C_{s,n}$, $P_{c,p}$, $C_{r,p}$, $C_{s,p}$ sont les niveaux de référence du dopage ; a,n , β,n , a,p , β,p sont des coefficients de l'exposant.

Les tableaux (II-7) et (II-8) indiquent les paramètres utilisés par défaut dans SILVACO pour le modèle de la mobilité des électrons (en introduisant le phosphore dans le silicium *type N*) et des trous (en introduisant le Bore dans le silicium *type P*).

Tableau II-7 : paramètres utilisés par défaut dans SILVACO pour le modèle de mobilité (Masetti) des électrons en introduisant le phosphore dans le silicium

$\mu_{min1,n}$	$\mu_{min2,n}$	$\mu_{max,n}$	$\mu_{1,n}$	$P_{c,n}$	$C_{r,n}$	$C_{s,n}$	a,n	β,n
cm ² /(Vs)	cm ² /(Vs)	cm ² /(Vs)	cm ² /(Vs)	cm ⁻³	cm ⁻³	cm ⁻³		
68.5	68.5	1414	56.1	0.0	9.2*10 ¹⁶	3.41*10 ²⁰	0.711	1.98

Tableau II-8 : paramètres utilisés par défaut dans SILVACO pour le modèle de mobilité (masetti) des trous en introduisant le bore dans le silicium

$\mu_{min1,p}$	$\mu_{min2,p}$	$\mu_{max,p}$	$\mu_{1,p}$	$P_{c,p}$	$C_{r,p}$	$C_{s,p}$	a,p	β,p
cm ² /(Vs)	cm ² /(Vs)	cm ² /(Vs)	cm ² /(Vs)	cm ⁻³	cm ⁻³	cm ⁻³		
44.9	0.0	470.5	29.0	9.23*10 ¹⁶	2.23*10 ¹⁷	6.1*10 ²⁰	0.719	2.0

II-5-2. Modèle de la mobilité « Caughey et Thomas »

Sous fort champ électrique (par exemple dans la zone de charge d'espace de la jonction p-n) la vitesse de dérive des porteurs n'augmente pas de façon linéaire en fonction du champ électrique. Ce phénomène de saturation de la vitesse des porteurs peut être décrit comme la dégradation de la mobilité. L'expression de Caughey et Thomas [14] implémentée dans SILVACO met en évidence la dépendance de la mobilité en fonction d'un fort champ électrique.

L'expression de la mobilité des électrons est donnée par :

$$\mu_n(E) = \mu_{n0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{n0} E}{v_{sat,n}} \right)^{\beta,n}} \right]^{1/\beta,n} \quad (\text{II-45})$$

L'expression de la mobilité des trous est donnée par :

$$\mu_p(E) = \mu_{p0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{p0} E}{v_{sat,p}} \right)^{\beta,p}} \right]^{1/\beta,p} \quad (\text{II-46})$$

Où E est le champ électrique parallèle ; μ_{n0} et μ_{p0} sont les mobilités des électrons et des trous dans un faible champ électrique respectivement ; $v_{sat,n}$ et $v_{sat,p}$ sont les vitesses de saturation des électrons et des trous ; β,n et β,p sont les coefficients de l'exposant.

Les vitesses de saturation sont calculées par défaut à partir des modèles qui dépendent de la température [15]. Elles sont données par :

$$v_{sat,n} = \frac{a_{fld,n}}{1 + \theta_{fld,n} \exp\left(\frac{T_L}{T_{fld,n}}\right)} \quad (\text{II-47})$$

$$v_{sat,p} = \frac{a_{fld,p}}{1 + \theta_{fld,p} \exp\left(\frac{T_L}{T_{fld,p}}\right)} \quad (\text{II-48})$$

Les valeurs des paramètres par défaut sont données dans le tableau suivant :

Tableau II-9 : paramètres utilisés par défaut dans SILVACO pour le modèle de mobilité qui dépend du champ électrique

$\beta.n$	$\beta.p$	$a_{fld,n}$ (cm /s)	$a_{fld,p}$ (cm/s)	$\theta_{fld,n}$	$\theta_{fld,p}$	$T_{fld,n}$ (K)	$T_{fld,p}$ (K)
2.0	1.0	$2.4 \cdot 10^7$	$2.4 \cdot 10^7$	0.8	0.8	600	600

II-5-3. Modèle de la mobilité « Canali »

Le modèle de Canali a été implémenté en fixant les valeurs de $\beta.n$ et $\beta.p$ dans le modèle de Caughey-Thomes[16]. Les expressions sont données par :

$$\beta.n = \beta_{0,n} \left(\frac{T_L}{300}\right)^{\beta_{exp,n}} \quad (\text{II-49})$$

$$\beta.p = \beta_{0,p} \left(\frac{T_L}{300}\right)^{\beta_{exp,p}} \quad (\text{II-50})$$

Le modèle de Canali peut être employé pour le silicium jusqu'à 430 K.

Le tableau II-10 indique les paramètres utilisés par défaut dans SILVACO pour le modèle de Canali.

Tableau II-10 : paramètres utilisés par défaut dans SILVACO

pour le modèle de Canali.

$\beta_{0,n}$	$\beta_{0,p}$	$\beta_{exp,n}$	$\beta_{exp,p}$
1.109	1.213	0.66	0.17

II-6. Rétrécissement de la bande interdite (Bandgap-Narrowing)

Le mécanisme physique associé à la distorsion des limites des bandes d'énergies résulte principalement d'une interaction atomes donneurs – porteurs libres. Ces interactions provoquent ainsi un élargissement du niveau initialement discret des impuretés, ce qui conduit à la réunion de cette bande d'énergie des impuretés ionisées en excès avec la bande la plus proche (la bande de conduction ou de valence selon le type de dopage).

Dans les semiconducteurs fortement dopés (supérieur à 10^{17}cm^{-3}), le mécanisme physique associé à la distorsion des limites des bandes d'énergies se présente selon trois cas différents [17] [18]:

1. Les limites des bandes de valence et de conduction développent des *queues* et pénètrent dans la bande interdite.
2. Si la concentration des impuretés donneurs est élevée, les niveaux énergétiques de ces impuretés s'élargissent en une bande d'impuretés qui chevauche avec la bande de conduction.
3. Une concentration d'atomes donneurs très élevée provoque une variation spatiale de la largeur de la bande interdite, résultat d'une déformation du réseau cristallin.

En conséquence, toutes ces modifications entraînent une réduction apparente de la largeur de bande interdite. Ce phénomène est plus connu sous le nom de « *Bandgap-Narrowing* ».

Dans Silvaco, cet effet est implémenté par les deux modèles de Bennett-Wilson et Del-Alamo.

La formule de Bennett-Wilson [19] est donnée par :

$$\Delta E_g(N) = \begin{cases} -E_{bg} \left[\log \left(\frac{N}{N_{bg}} \right) \right]^2 & \text{si } N \geq N_{bg} \\ 0 & \text{si } N < N_{bg} \end{cases} \quad (\text{II-51})$$

et la formule de Del-Alamo [20-21] est donnée par :

$$\Delta E_g(N) = \begin{cases} -E_{bg} \left[\log \left(\frac{N}{N_{bg}} \right) \right] & \text{si } N \geq N_{bg} \\ 0 & \text{si } N < N_{bg} \end{cases} \quad (\text{II-52})$$

Où ΔE_g est la diminution de la bande interdite, E_{bg} est un paramètre du matériau qui caractérise la variation du gap, N_{bg} est le niveau de référence du dopage. Donc la diminution de la bande interdite a lieu si le dopage est supérieur à N_{bg} .

Le tableau II-11 représente les paramètres utilisés par défaut des modèles de Bennett-Wilson et Del-Alamo pour le silicium.

Tableau II-11: Paramètres utilisés par défaut dans SILVACO

pour les modèles de Bennett-Wilson et Del-Alamo

Modèle	E_{bg} (cm ⁻³)	N_{bg} (cm ⁻³)
Bennett-Wilson	6.84*10 ⁻³	3.162*10 ¹⁸
Del-Alamo	1.87*10 ⁻²	7.0*10 ¹⁷

II-7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la physique des semiconducteurs qui se trouve à la base de la conception et de la modélisation de notre cellule à contacts arrière inter digités.

A la base de la modélisation physique se trouvent cinq équations aux dérivées partielles qui sont l'équation de Poisson, deux équations de continuités et deux équations de transport.

L'intégration de la lumière dans le système des équations est réalisée via une génération optique dans les deux équations de transport, celle des électrons et des trous.

Pour améliorer la précision des résultats de la simulation numérique et approcher au maximum la réalité physique de certains phénomènes, nous avons exposé les différents modèles physiques utilisés dans cette étude.

L'incorporation du rétrécissement de la largeur de la bande interdite et du changement du taux de transition inter bande dans les équations de transport des porteurs minoritaires dans les régions fortement dopées, permet de prévoir avec exactitude les performances des cellules solaires à base de silicium cristallin.

II-8. Références bibliographiques

- [1] PINTO M.R., Conor S. Rafferty, and Robert W. Dutton, “*PISCES2 - Poisson and Continuity Equation Solver*”, Stanford Electronics Laboratory Technical Report, Stanford University, September 1984.
- [2] SELBERHERR, S. *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*. Wien, New York: Springer-Verlag, 1984.
- [3] CRISTIANE HONSBURG, STUARTBOWDEN, « *Photovoltaics Devices, systems and Applications* » (PVCROM). Sydney: univ. of New South Wales, 1999.
- [4] SHOCKLEY.W, READ.W.T, “*Statistics of the recombinations of holes and electrons*”. Physical Review, 1952, vol. 87, n°5, p. 835-842.
- [5] HALL. R.N., “*Electron Hole Recombination in Germanium*”, Physical Review, 1952, vol. 87, n°2, p.387.
- [6] KLAASSEN, D.B.M., “*A Unified Mobility Model for Device Simulation - II. Temperature Dependence of Carrier Mobility and Lifetime*”, Solid-State Elect., 1992, Vol. 35, N°7 p. 961-967.
- [7] J.G.FOSSUM, D.S.LEE. “*A physical model for the dependence of carrier lifetime on doping density in nondegenerate Silicon*” Solid State Electronics, 1982, Vol.25, N°8, p.741-747.
- [8] DZIEWIOR J. AND W. SCHMID, “*Auger Coefficient for Highly Doped and Highly Excited Silicon*”, Appl. Phys. Lett., 1977, Vol. 31, p. 346-348.
- [9] HULDT, L., N. G. NILSSON AND K.G.SVANTESSON, “*The temperature dependence of band-to-band Auger recombination in Silicon*”, Applied Physics Letters, 1979, Vol. 35 p.776-777.
- [10] KERR.M.J, CUEVAS.A, “*General parameterisation of Auger recombination in crystalline silicon*”, 2002, Vol.91, p.2473-2480.
- [11] ACEDEVO.A, “*Limits of the maximum efficiency of silicon solar cells-Effects due to Auger Generation and to deep levels*” Revista Mexicana de Fisica, 1996, Vol.42-3
- [12] CUEVAS.A, GIROULT-MATLAKOWSKI, BASORE.G, BASORE.A, DUBOIS.P.A, KING.R.R, Proceedings of the first world conference WCPEC, Hawaii, 1994, p.1446-1449
- [13] MASETTI G., M.SEVERI, AND S.SOLMI, “*Modeling of Carrier Mobility Against Carrier Concentration in Arsenic , Phosphorous and Boron doped Silicon*”, IEEE Trans. Elec. Dev. ED-30, (1983): 764-769.
- [14] CAUGHEY, D.M., AND R.E. THOMAS. “*Carrier Mobilities in Silicon Empirically Related to Doping and Field.*” Proc. IEEE 55, (1967): 2192-2193.
- [15] SCHWARZ, S.A., AND S.E. RUSSE, “*Semi-Empirical Equations for Electron Velocity in Silicon: Part II — MOS Inversion Layer*”, IEEE Trans. Electron Devices Vol. 30, No. 12 (1983): 1634-1639.

- [16] CANALI, C., G.MAGNI, R. MINDER AND G. OTTAVIANI, “*Electron and Hole drift velocity measurements in Silicon and their empirical relation to electric field and temperature*”, IEEE Trans. Electron Devices ED-22 (1975): 1045-1047.
- [17] F.A.LINDHOLM, S.S.LI, AND C.TSAH, “*Fundamental limitations imposed by high doping on the performance of PN junction silicon solar cells*”, 11th IEEE Photovoltage specialists conference (1975), pp. 3-12
- [18] J. DEL ALAMO, R.M. SWANSON AND S. SWIRHUN, “*Measuring and modelling minority carrier transport in heavily doped silicon*” Solid-state electronics, Vol.28 N°12, (1985), PP. 47-54
- [19] BENNETT, H.S., AND C.L. WILSON, “*Statistical comparisons of data on band-gap narrowing in heavily doped Silicon: Electrical and Optical measurements*”, J. Appl. Phys. Vol 55, No. 10, (1984): 3582-3587.
- [20] J. DEL ALAMO, AND R.M. SWANSON, “*Simultaneous measuring of hole lifetime, hole mobility and bandgap narrowing in heavily doped n-type silicon*”, IEDM Technical Digest, (December 1985): 290-293.
- [21] SWIRHUN, S., Y.H. KAWARK AND R.M. SWANSON, “*Simultaneous measuring of hole lifetime, hole mobility and bandgap narrowing in heavily doped p-type silicon*”, IEDM Technical Digest, (December 1986): 24-27.

Chapitre III

*Simulation de la structure à contacts arrière
inter digités*

III-1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude de la structure à contacts arrière inter digités possédant la jonction et les contacts sur la face opposée à l'incidence du rayonnement à base de silicium cristallin. Dans une première partie, nous définissons la structure à simuler ainsi que les paramètres utilisés. Ces paramètres sont choisis selon les moyens technologiques utilisés dans la réalisation des cellules photovoltaïques à contacts arrières inter digités. Nous présentons ensuite, un descriptif du logiciel de simulation de la société SILVACO et sa mise en œuvre dans le cadre de notre travail.

Dans une deuxième partie, Nous décrivons une étude de simulation à deux dimensions effectuées sous SILVACO/ATLAS et nous exposons les résultats obtenus de la simulation numérique de la structure à contacts arrière inter digités. Par ailleurs, les résultats de la simulation ont permis d'étudier différents paramètres influant sur les performances des cellules. Parmi ces paramètres nous avons retenu la longueur de diffusion, la géométrie des régions dopées n^+ et p^+ à l'arrière de la cellule, la recombinaison sur la face avant et l'épaisseur du substrat et le dopage.

En fin, nous étudions l'influence de la double couche antireflet. Cette dernière est constituée de deux couches déposées successivement sur le substrat, une couche de SiN et une couche de SiO₂. Les résultats de la double couche antireflet permettent d'obtenir des rendements de conversion supérieurs par rapport à la simple couche antireflet (couche de SiN).

III-2. Simulation numérique sous SILVACO-ATLAS

De nombreux travaux sont consacrés à la simulation des cellules à contacts arrières inter digités. En référence à [1], P. Verlinder et *al.* utilisent un modèle analytique pour calculer l'épaisseur optimale du substrat en fonction de la longueur de diffusion et la vitesse de recombinaison. D'autres groupes ont développé des procédés adaptés à cette structure dont l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon pour le substrat mince [2].

Plus récemment, en référence à [3], S.M Yang et *al.* ont présenté une analyse détaillée sur les différentes contributions à la résistance série d'une cellule solaire à contacts arrière à base de silicium cristallin.

En référence à [4] [5], Martinuzzi et Sven Kluska ont développé des cellules à jonction arrière en utilisant du silicium de type n. Dans le silicium de type n, la durée de vie des porteurs minoritaires ainsi que la longueur de diffusion sont plus grandes que dans le silicium de type p.

Aussi, dans les travaux publiés par Tucci et Diouf [6] [7], des tentatives d'utilisation de la technologie de l'hétérojonction à base de silicium amorphe/silicium cristallin ont été mises en œuvre. La structure à hétérojonction et contacts en face arrière à un rendement supérieur car elle permet la réduction des pertes optiques tout en diminuant les recombinaisons. I. Jozwik et al. [8] utilisent une double couche antireflet (SiN et SiO_2) déposées sur le substrat. Cette structure présente une réflectivité plus faible que celle obtenue avec une simple couche de SiN .

III-2-1. Structure à simuler

La simulation numérique de la structure photovoltaïque a été effectuée en utilisant le logiciel SILVACO/ATLAS. Les paramètres sont choisis selon les moyens technologiques utilisés dans la réalisation des cellules photovoltaïques à contacts arrières inter digités sérigraphies.

Pour simuler l'influence des différents paramètres de la cellule à contacts arrière inter digités, nous définissons une cellule solaire de référence avec un ensemble de paramètres fixés, puis nous varions les paramètres afin d'analyser leur influence sur le rendement de la cellule solaire. Ainsi, plusieurs paramètres sont retenus :

- la distance entre les régions dopées p^+ et les régions dopées n^+ ,
- le rapport entre les largeurs des régions dopées p^+ et n^+ ,
- la longueur de diffusion,
- recombinaison sur la face avant,
- l'utilisation d'une double couche antireflet
- l'épaisseur et le dopage du substrat,
- le dopage de l'émetteur,
- le dopage du BSF et du FSF,

La simulation numérique par SILVACO [9] est basée sur la résolution numérique des trois équations fondamentales de transport de charges dans les semiconducteurs qui sont respectivement l'équation de Poisson et l'équation de continuité pour les électrons et les trous. Après le maillage de la structure étudiée, le simulateur évalue numériquement la résolution de ces équations à chaque nœud du maillage. Les densités des porteurs sont calculées par le modèle

drift-diffusion. Les modèles utilisés dans le cadre de cette simulation (détails dans le chapitre II) sont :

- La recombinaison Shockley Read Hall,
- La recombinaison Auger,
- recombinaison en surface,
- le modèle de mobilité
- le modèle de rétrécissement de la bande interdite (BGN)

Cependant, la caractéristique courant-tension (I-V) est simulée sous les conditions standards d'éclairement (AM1.5G).

En raison de la structure périodique des cellules inter digitées, nous simulons uniquement une partie élémentaire de la cellule. La figure III-1 représente la structure et les paramètres de la cellule de référence utilisée pendant la simulation. Les distances fixées sont conformes aux spécificités technologiques liées essentiellement à la sérigraphie.

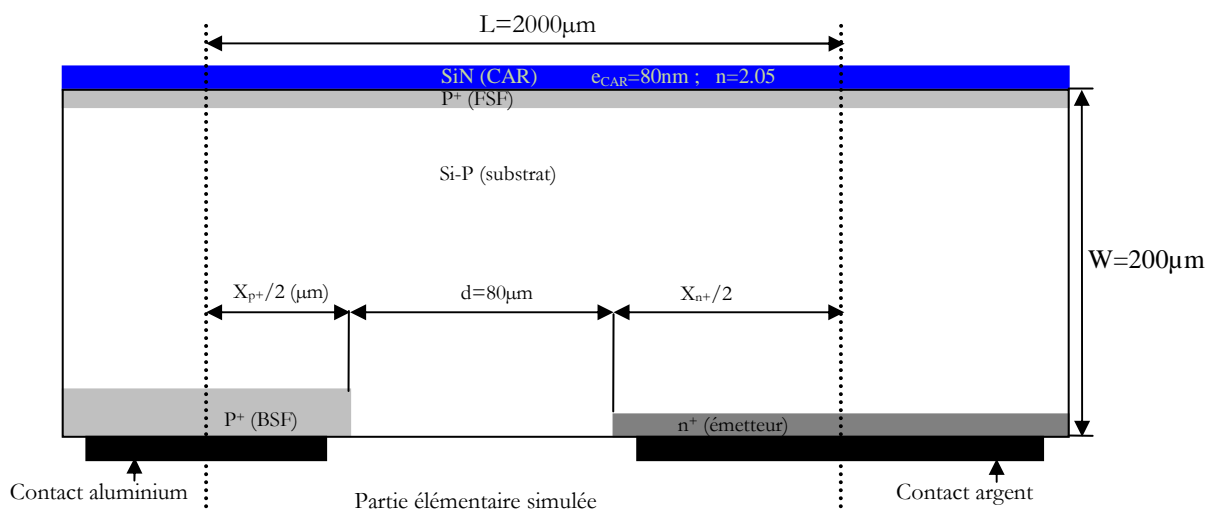


Figure III-1: Structure de la cellule de référence IBC simulée sous SILVACO/ATLAS

III-2-2. Paramètre de la structure simulée

Les paramètres de la cellule sont donnés dans le tableau 1 :

Substrat

Epaisseur	$W = 200\mu\text{m}$
Distance entre les zones dopées n^+ et p^+	$d = 80\mu\text{m}$
Largeur de la structure	$L = 2000\mu\text{m}$
Dopage	$N = 10^{17}\text{cm}^{-3}$
Profil du dopage	uniforme
Vitesse de recombinaison en face avant	$S_{\text{FAV}} = 10^2\text{cm/s}$
Epaisseur de la couche antireflet	$e_{\text{ARC}} = 80\text{nm}$
Indice de réfraction	$n = 2.05$
Longueur de diffusion	$L_D = 400\mu\text{m}$

Emetteur

Epaisseur	$W_n^+ = 0.5\mu\text{m}$
Demi-largeur du plot n^+	$X_n^+/2 = 1750\mu\text{m}$
Dopage	$N_n^+ = 2 \cdot 10^{21}\text{cm}^{-3}$
Profil du dopage	Fonction erreur complémentaire (erfc)
Vitesse de recombinaison au contact	$S_e = S_h = 10^5\text{cm/s}$

BSF

Epaisseur	$W_p^+ = 5\mu\text{m}$
Demi-largeur du plot p^+	$X_p^+/2 = 170\mu\text{m}$
Dopage	$N_p^+ = 10^{19}\text{cm}^{-3}$
Profil du dopage	Uniforme
Vitesse de recombinaison au contact	$S_e = S_h = 10^7\text{cm/s}$

FSF

Epaisseur	$W_{\text{FSF}} = 0.2\mu\text{m}$
largeur	$X_{\text{FSF}} = 2000\mu\text{m}$
dopage	$N_{\text{FSF}} = 10^{19}\text{cm}^{-3}$
Profil du dopage	Uniforme

Tableau 1 : Paramètres de la structure à contacts arrière inter digités

III-3. Présentation du package des programmes SILVACO

SILVACO est une société internationale Américaine, ayant son siège à Santa Clara en Californie. Elle est un des principaux fournisseurs de chaînes professionnelles 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 employés par les compagnies de microélectronique dans le domaine de la recherche, du développement et de la conception de dispositifs.

SILVACO présente un ensemble des outils de simulation interactifs permettant la conception et l'analyse de la plus part des dispositifs à semiconducteurs VWF (Virtual Wafer Fab) [10]. Les composants de base de VWF (Figure III-2) sont :

1. *Les outils de simulation* (VWF CORE TOOLS). Ces outils simulent soit leurs processus de fabrication ou soit leurs comportements électriques. Les outils de simulation sont ATHENA, ATLAS et SDUPEM3.
2. *Les outils interactifs* (VWF INTERACTIVE TOOLS). Ces outils sont désignés 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). Ainsi 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 des outils d'automatisation.
3. *Les outils d'automatisation* (VWF AUTOMATION TOOLS). Ces outils permettent à l'utilisateur d'exécuter sur une grande échelle des études expérimentales afin de créer des résultats pour l'analyse statistique suivante. Les outils automatiques se servent de la technologie de base de données réparties et des méthodes de logiciels de développement d'interprocessus.

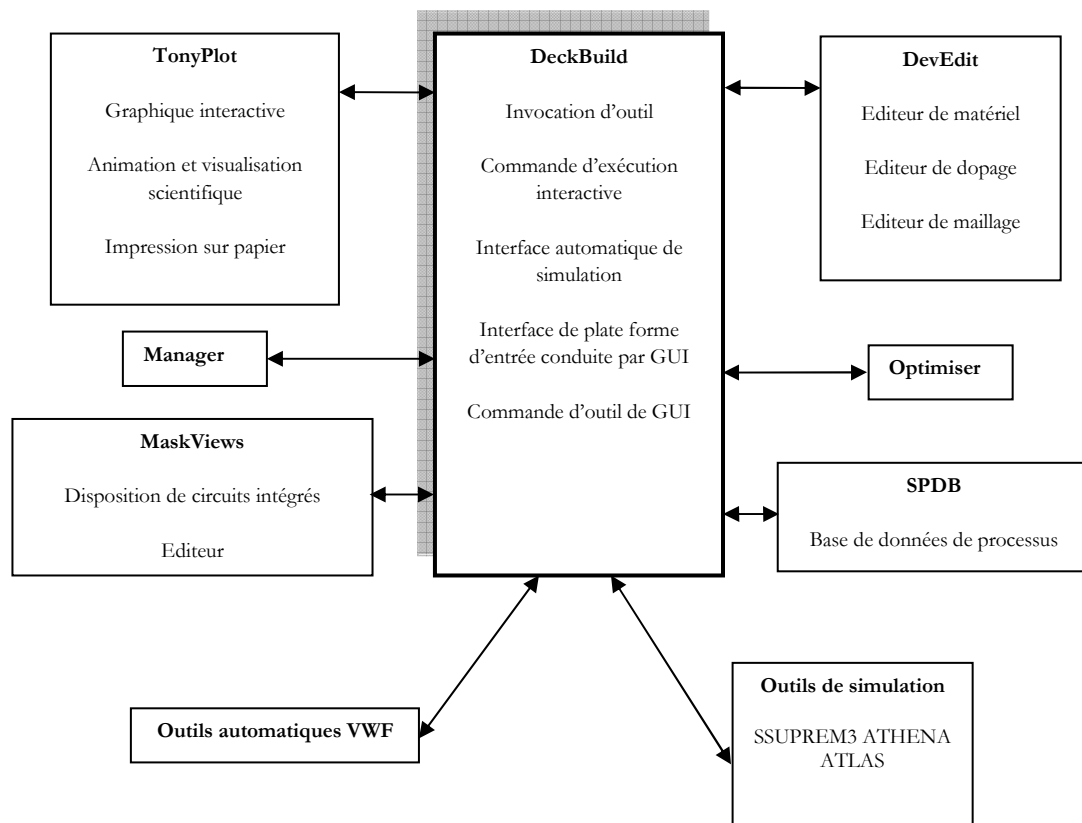


Figure III-2 : Organigramme de la structure VWF

III-3-1. Les outils de simulation

- **ATLAS** : simulateur physique de dispositifs à semiconducteur 2D ou 3D qui permet de simuler le comportement électrique de structures spécifiées des dispositifs à semiconducteur.
- **ATHENA** : simulateur 2D de procédés technologiques qui permet de développer et optimiser des processus de fabrication de semiconducteur (les différentes étapes effectuées en Salle Blanche). Il fournit une plate-forme pour simuler l'implantation ionique, la diffusion, gravure à l'eau-forte, le dépôt, la lithographie, l'oxydation, et la silicidation des matériaux semiconducteur. Il remplace des expériences coûteuses par des simulations.
- **SSUPREMS3** : simulateur de procédé 1D avec prolongements simples de simulations des dispositifs.

III-3-2. Les outils interactifs

- **DECKBUILD** : environnement où est défini le programme de simulation. DeckBuild offre une aide et une prise en charge qui permet d'éviter l'apprentissage d'une syntaxe de commande généralement très complexe. Il permet aussi une exécution automatique et très pratique des programmes et des sauvegardes systématiques des étapes intermédiaires d'exécution.
- **TONYPLOT** : environnement où sont visualisés les résultats des simulations (structure du composant, distribution de grandeurs divers dans celui-ci, caractéristiques électriques...).
- **DEVEDIT** : environnement où est destinée la structure. On peut créer des nouvelles structures ou même modifier des structures existantes. On peut aussi définir des maillages ou raffiner les maillages existants.
- **MASKVIEWS** : outil de dessin des masques (éditeur de layout).
- **OPTIMIZER** : optimise les paramètres de la structure de façon à obtenir en final la valeur du paramètre que nous lui avons définie au préalable.
- **MANAGER** : outil de gestion des fichiers utilisés et créés par VWF.
- **SPDB** : (Semiconductor Process Data Base), c'est un produit séparé, il n'est pas un outil interactif, mais il peut être utilisé avec DeckBuild. Il a été conçu pour stocker un grand nombre de profils de dopage mesurés expérimentalement ainsi que les données qui décrivent les conditions des expériences.

Le projet réalisé dans le cadre de ce travail de thèse, a été basé principalement sur l'outil de simulation « Atlas » et sur l'environnement où est défini le programme de simulation « DeckBuild ». Une fois la simulation effectuée sous « ATLAS », la visualisation des résultats se fait via le logiciel « TonyPlot ».

Par la suite nous allons développer la présentation de l'outil de simulation « ATLAS » que nous avons utilisé principalement pour effectuer la simulation de notre structure.

III-4. Présentation d'ATLAS

ATLAS est un simulateur physique 2D ou 3D des dispositifs basés sur la physique de semiconducteur. Il prédit le comportement électrique des structures semiconductrices spécifiées et fournit des aperçus de mécanismes physiques internes associés au fonctionnement des dispositifs. Atlas peut être utilisé autonome ou comme un outil noyau dans le milieu de simulation VWF de SILVACO.

Ce simulateur est composé de deux parties :

- une partie de traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...)
- une partie formée des modèles physiques des composants semiconducteurs (modèles de recombinaisons, de mobilités, ...).

III-4-1. Entrées et sorties d'ATLAS

La figure III-3 montre les entrées et sorties d'atlas. La plupart des simulations réalisées par ATLAS utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier est représenté par « Fichier de commande », c'est un fichier script contenant les commandes pour que ATLAS s'exécute. Le second fichier est un « Fichier de structure » qui définit la structure à simuler. A la sortie d'Atlas, nous avons trois types de fichier. Le premier de ces fichiers est la sortie « Runtime » qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation. Le deuxième type de fichier est le « fichier log » qui stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé. Le troisième fichier de sortie est le « fichier de solution », ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné. Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation « TonyPlot ».

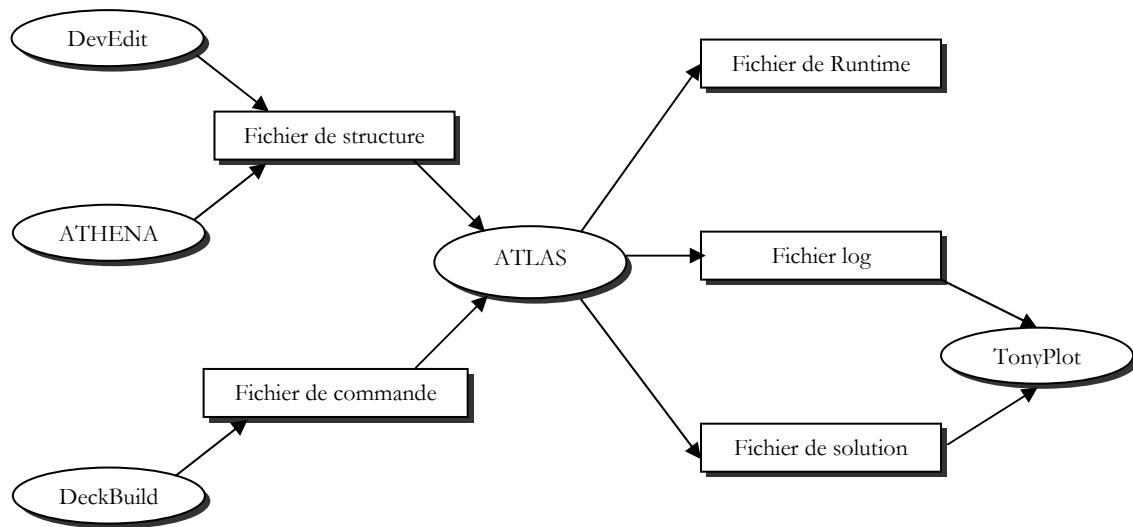


Figure III-3 : Entrées et sorties d'ATLAS

III-4-2. Commandes dans un programme ATLAS

Nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes fondamentales dans un programme ATLAS (Figure III-4). Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement. Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte.

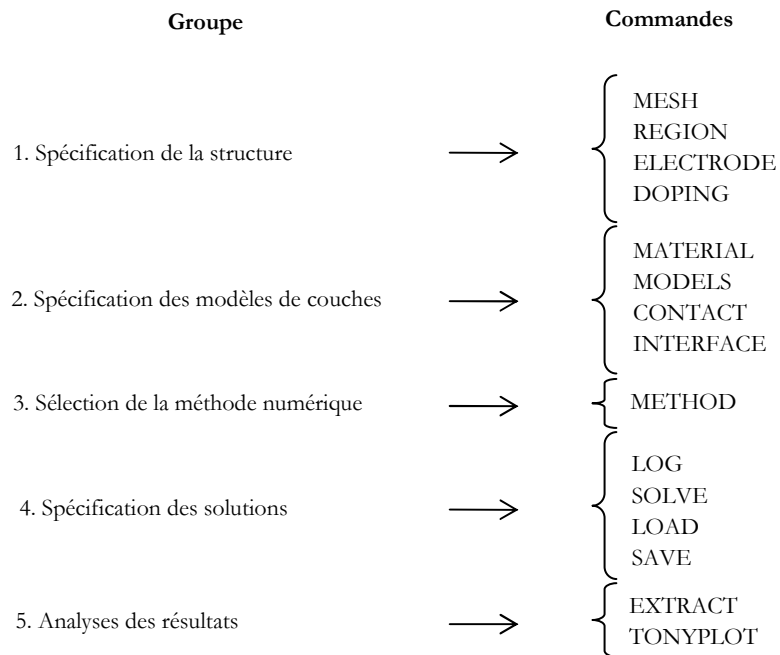


Figure III-4 : Les commandes fondamentales dans un programme *ATLAS*

Les commandes fondamentales sont :

1. Spécification de la structure

Il s'agit de définir la structure la plus réaliste. La construction de la structure consiste en quatre étapes : définition du maillage, définition des régions, définition des électrodes et définition des dopages.

MESH (définition du maillage) : Le maillage divise la structure simulée en petites cellules pour pouvoir résoudre les équations fondamentales numériquement. L'élément de maille utilisé est le triangle. Pour assurer une bonne précision lors de la simulation, il faut avoir le maillage le plus fin possible. Par contre si le maillage est très fin, le temps de calcul est très élevé, car il y a plus d'éléments à calculer. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre le temps et la précision de calcul.

REGION (définition des régions) : Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions. Dans cette partie nous définissons des régions rectangulaires, par exemple la région n°1 est définie comme un matériau de type silicium et la région n° 2 comme de l'oxyde (SiO_2), etc.. . Ainsi que les différentes dimensions sont définies en micromètre.

ELECTRODE (définition des électrodes) : La définition des électrodes permet de réaliser les contacts Grille, Anode et Cathode.

DOPING (définition des dopages) : Le dernier aspect de la construction de la structure est le dopage. Le dopage peut être de type n ou p, aussi la distribution peut être uniforme, gaussien, etc...

2. Spécification des modèles physiques

Après la construction de la structure, il est nécessaire de préciser les modèles physiques et de définir les matériaux. La spécification de modèles et matériaux comporte quatre étapes:

MATERIAL : associe des paramètres physiques aux matériaux dans la maille. Le logiciel a des paramètres de matériau définis par défaut pour les semiconducteurs standard.

MODELS : Ils indiquent les inclusions de différents mécanismes physiques (recombinaison, mobilité, etc...). Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation.

CONTACT : indique les attributs physiques d'une électrode (résistivité, travail de sortie,...).

INTERFACE : indique les paramètres d'interface aux frontières des semiconducteurs ou des isolants. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux nœuds de frontière exceptés la où ils sont déjà indiqués.

3. Sélection de la méthode numérique

METHOD : Dans ATLAS, il existe essentiellement deux méthodes numériques pour la résolution des équations : les méthodes dites de Newton et de Gummel. La méthode de Newton correspond à la résolution itérative d'un système regroupant les trois équations différentielles régissant le fonctionnement de la structure. La méthode de Gummel 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 globale des solutions. L'intérêt potentiel de cet algorithme par rapport à celui de Newton réside dans la réduction des dimensions des systèmes matriciels à résoudre, ce qui permet a priori de diminuer le temps de calcul.

4. Spécification des solutions

Après avoir sélectionné la méthode numérique il est nécessaire de déterminer les solutions. La spécification de solution est donnée par les déclarations : LOG, SOLVE, LOAD, et SAVE.

LOG : permet à toutes les caractéristiques finales de simulation d'être sauvées dans un fichier (ouvre un fichier de type log). Notons que log en minuscule veut dire le type de fichier et LOG en majuscule veut dire la commande dans le programme. Les informations sauvées sont de type électrique. Aussi n'importe quel paramètre spécifié par la commande PROBRE¹ est stocké dans le fichier de type log. Si dans le programme, il y a plusieurs commandes LOG, chaque fois le fichier log qui a été ouvert avant est fermé et un nouveau fichier log est ouvert.

SOLVE : La déclaration SOLVE fait suite à la déclaration LOG. SOLVE effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.

LOAD : charge des solutions précédentes à partir de fichiers en tant que conjectures initiales à d'autres points de polarisation.

SAVE : sauve toutes les informations d'un point nœud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvées correspondent à un état électrique bien précis.

5. Analyse des résultats

Une fois la solution a été trouvée pour un problème de dispositif à semiconducteurs, les informations peuvent être affichées graphiquement.

EXTRACT : les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou structure.

TONYPLOT : démarre le programme « TonyPlot » permettant une représentation graphique des données.

Une autre commande importante est BEAM, sa position est au niveau 4 des groupes de commande. BEAM indique un signal d'entrée optique sous forme d'un faisceau de lumière (mono ou multi-spectrale). Le faisceau ainsi déclaré est allumé et utilisé par la commande SOLVE, dans ce cas le module luminous² est activé. Donc BEAM est utilisé pour simuler des courants sous lumière ou des réponses spectrales.

¹ PROBE permet de sortir la valeur minimale, maximale ou une valeur quelconque à un endroit indiqué de n'importe laquelle de plusieurs quantités distribuées dans le fichier de type log.

² Luminous : trace des rayons et programme tout usage d'absorption de la lumière. Luminous calcul les profils d'intensités optiques dans les dispositifs semiconducteurs, et convertit ces profils dans des taux de photogénération. Ceci nous permet de simuler des réponses électroniques à des signaux optiques pour une large gamme de détecteurs optiques.

III-5. Résultats de la simulation

III-5-1. Dimensionnement des régions n^+ et p^+

La détermination du dimensionnement des régions n^+ et p^+ à l'arrière de la cellule est compliqué car elle dépend des paramètres suivants :

- La qualité électronique du silicium utilisé
- le dopage et la profondeur des régions n^+ et p^+
- La distance entre les régions dopées n^+ et p^+ et la longueur de diffusion

A partir d'une approche théorique et une étude de simulation avec le logiciel SILVACO, il est possible de comprendre l'influence de ces paramètres pour évaluer la géométrie optimale de la structure à contacts arrière.

III-5-1-1. L'influence du rapport entre les largeurs des régions dopées n^+ et p^+

La figure (III-5) montre la variation du rapport entre les largeurs des régions dopées n^+ (émetteur) et les largeurs des régions dopées p^+ (BSF). Nous considérons le rendement de conversion en fonction des différentes distances séparant l'émetteur et le BSF.

Dans cette étude nous considérons un niveau de dopage du substrat de 10^{17}cm^{-3} et une longueur de diffusion de $400 \mu\text{m}$.

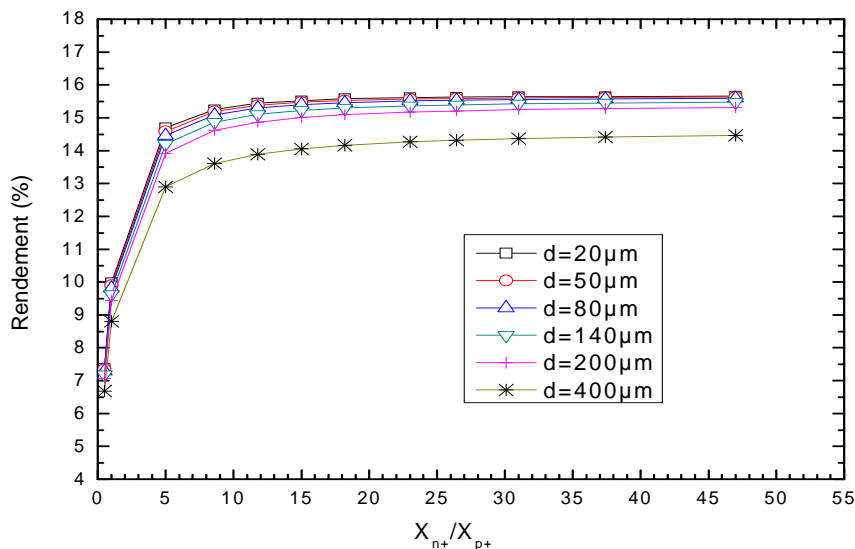


Figure III-5 : Evolution du rendement de la cellule en fonction du rapport des régions X_{n^+}/X_{p^+} pour différentes distances entre l'émetteur et le BSF.

Sur cette courbe on voit une décroissance du rendement pour une augmentation de l'espacement entre les plots. En augmentant la largeur entre les zones dopées n^+ et p^+ , on a une recombinaison plus importante sur la face arrière. Pour la structure de référence, nous avons fixé une distance d égale à $80\mu\text{m}$ pour quelle soit réalisable expérimentalement par sérigraphie. Donc l'espacement entre les plots doit être le moins large possible. On constate aussi, que le rendement de conversion augmente jusqu'à un rapport égal à 10, puis la courbe commence à saturer (pour un rapport supérieur à 10), alors le rapport optimal X_{n^+}/X_{p^+} sera égal à 10.

Pour une largeur du plot n^+ largement supérieure à celle du plot p^+ , les porteurs photogénérés pourront plus aisément rejoindre l'émetteur. Par conséquent, il est préférable d'augmenter la largeur de jonction pour augmenter le photocourant de la cellule.

III-5-1-2. L'influence de la longueur de diffusion

Dans cette étude, nous considérons les trois paramètres de la structure à contact arrière (le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert et le rendement de conversion).

La figure (III-6) montre l'influence de la variation du rapport entre les largeurs des régions dopées n^+ et les largeurs des régions dopées p^+ sur les trois paramètres de la structure en fonction des longueurs de diffusion. Sur ces figures, nous considérons deux distances entre les zones dopées n^+ et p^+ ($d=80\mu\text{m}$ et $d=400\mu\text{m}$) et trois longueurs de diffusion ($L_d=60\mu\text{m}$, $L_d=120\mu\text{m}$ et $L_d=400\mu\text{m}$), afin de comprendre l'influence de la longueur de diffusion sur l'efficacité de la structure à contacts arrière.

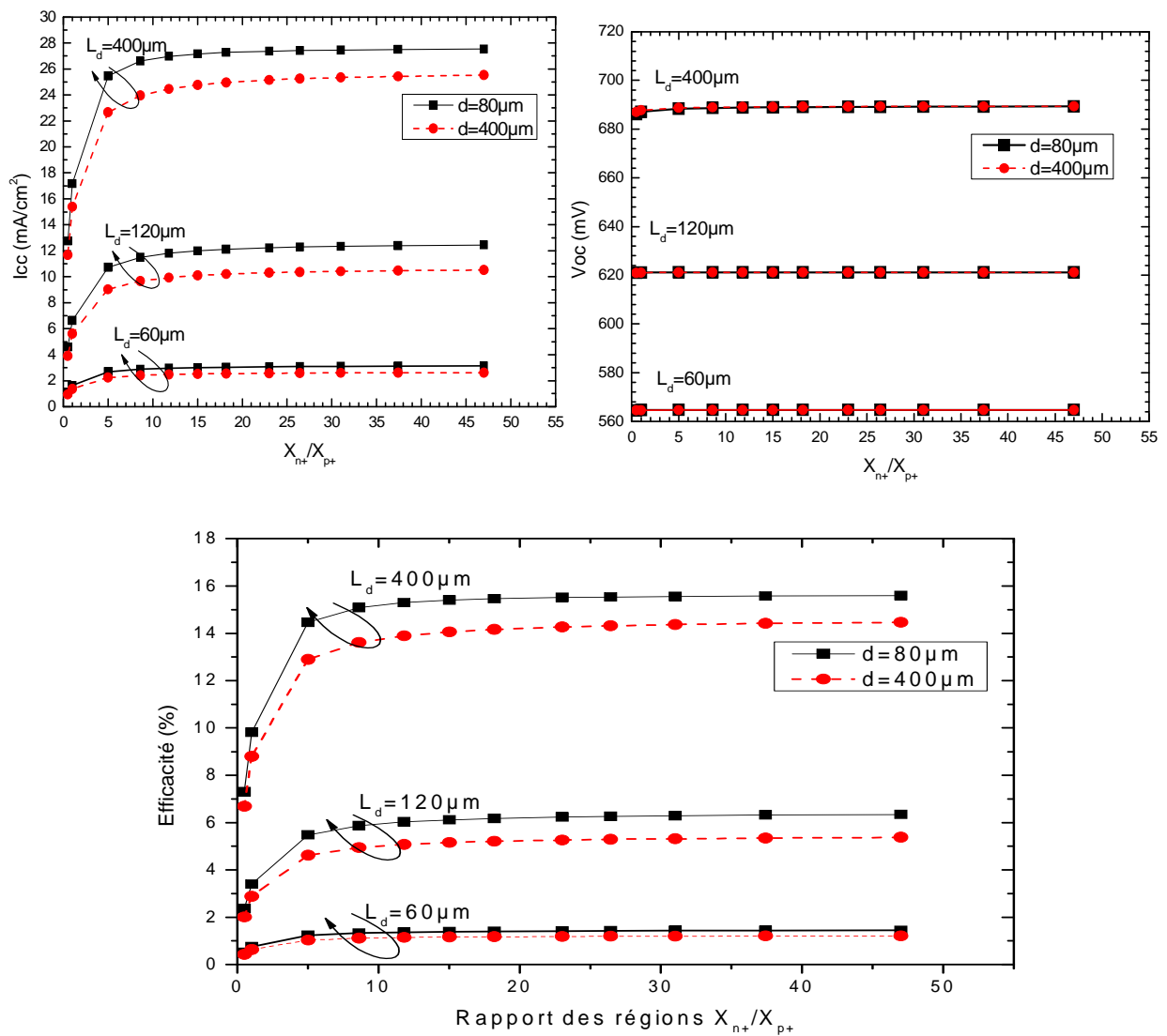


Figure III-6 : Evolution du courant de court circuit, de la tension de circuit ouvert et du rendement de la cellule en fonction du rapport des régions X_{n+}/X_{p+} pour différentes longueurs d'ondes

A partir de cette figure, nous observons que pour un rapport $L_d/W=0.3$ (longueur de diffusion sur l'épaisseur de la cellule) le rendement est d'environ 1.15% et 1.35%. Pour un rapport $L_d/W=0.6$, le rendement de la cellule est entre 5% et 6%. Enfin, pour un rapport $L_d/W=2$ Le rendement de la cellule est entre 14% et 15.5%.

On remarque alors que la longueur de diffusion est un paramètre déterminant du rendement des cellules solaires inter digitées. En effet, pour assurer une collecte satisfaisante des porteurs générés près de la face avant il faut que le rapport de L_d/W soit égal ou supérieur à 2.

Sur la figure III-7 nous présentons l'influence de la longueur de diffusion en fonction de la tension de circuit ouvert, du courant de court circuit, et du rendement de conversion de la cellule.

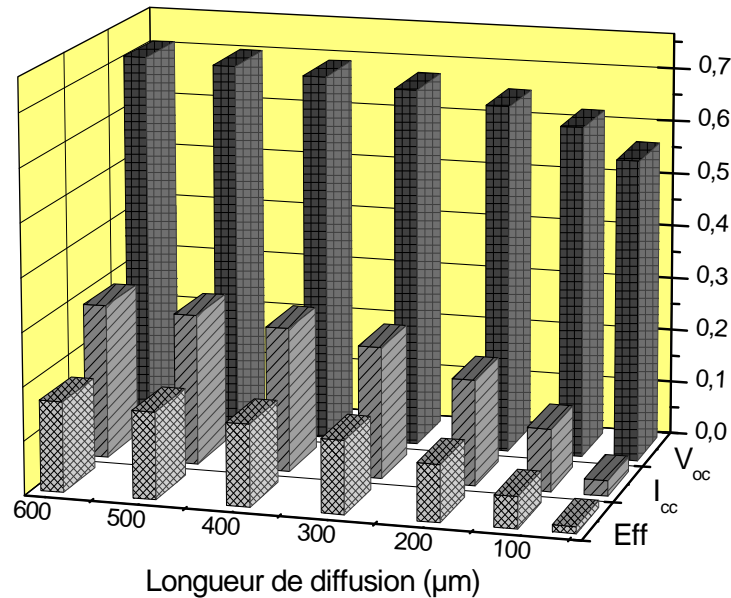


Figure III-7 : Résultats de simulation pour la structure IRC avec différentes longueurs de diffusions.
 $W=200\mu\text{m}$, $d=80\mu\text{m}$, $N=1*10^{17}\text{ cm}^{-3}$, $I_{cc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$, $V_{oc}(\text{V})$.

Sur cette figure nous observons que l'augmentation de la longueur de diffusion permet une amélioration remarquable des trois paramètres de la structure à contacts arrière. En effet, la longueur de diffusion est corrélée avec la durée de vie des porteurs minoritaires, ainsi quand la longueur de diffusion augmente la durée de vie des porteurs minoritaires augmente aussi. Dans ce cas, les porteurs générés ont plus de chance d'atteindre la jonction p-n qui se trouve sur la face arrière de la cellule. En utilisant un substrat d'épaisseur de $200\mu\text{m}$ avec des vitesses de recombinaisons sur la face avant et arrière de la cellule fixées à 100 cm/s nous trouvons une variation de l'efficacité entre 11% (pour $L_d = 200\mu\text{m}$) et 17% (pour $L_d = 600\mu\text{m}$) sans texturisation de la cellule.

Sur la figure III-8 nous représentons l'évolution de la caractéristique I-V en fonction de des longueurs de diffusion

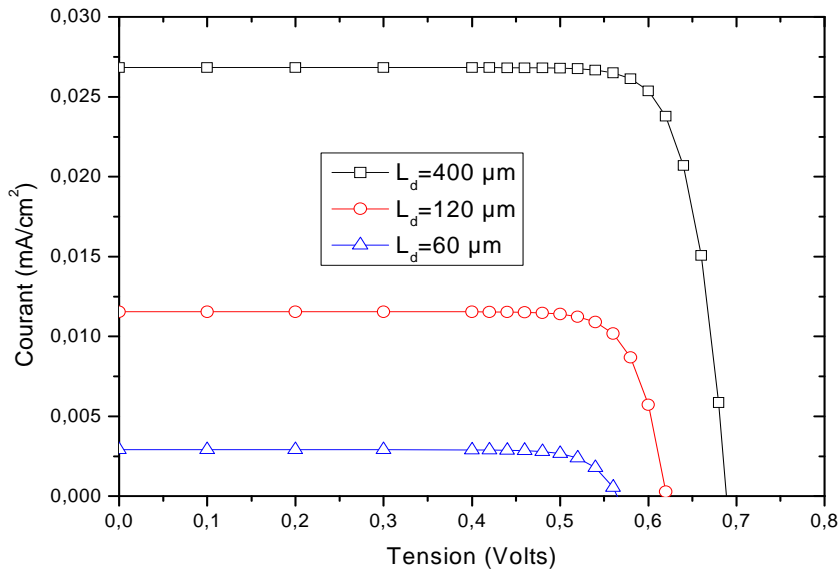


Figure III-8 : Evolution de la caractéristique $I-V$ en fonction de la longueur de diffusion

III-5-2. L'influence du dopage

III-5-2-1. Dopage du substrat

La figure III-9 illustre l'effet du niveau de dopage du substrat sur le rendement de conversion de la structure à contacts arrière en fonction des trois longueurs de diffusion et de deux distances entre les régions dopées n^+ et p^+ .

On constate sur la figure que l'augmentation du niveau de dopage du substrat permet une amélioration remarquable du rendement de conversion de la structure. Cette amélioration est d'autant plus importante que si la longueur de diffusion est élevée. En effet, avec l'augmentation du niveau de dopage du substrat, la durée de vie des porteurs minoritaires et la mobilité augmentent aussi. Ceci permet de compenser les pertes des porteurs recombinés dans les joints de grains. Si le taux de recombinaison augmente, la durée de vie des porteurs et la mobilité se dégradent. Cela entraîne une décroissance importante du rendement dans le cas de substrat fortement dopé à cause des recombinaisons Auger.

Si le substrat est faiblement dopé (inférieur à 10^{16}), la hauteur de la barrière de potentiel de la jonction p-n est réduite. Dans ce cas, le champ électrique de la jonction p-n est moins fort et

les conditions de collecte des porteurs sont insuffisantes. Ainsi, l'optimisation du dopage du substrat ne peut être faite simultanément afin d'avoir un maximum de rendement.

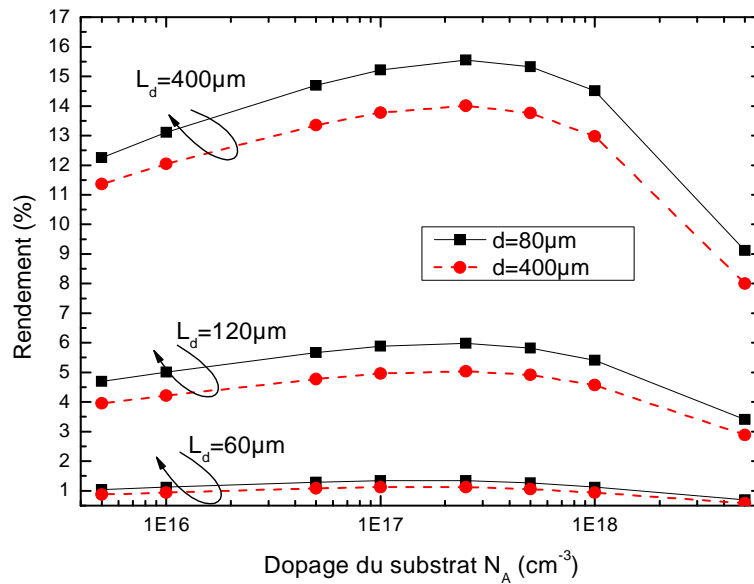


Figure III-9 : Evolution du rendement de la cellule en fonction du dopage du substrat pour la cellule de référence et pour deux distances entre les zones dopées n^+ et p^+ et des longueurs de diffusions différentes.

III-5-2-2. Dopage de l'émetteur

La figure III.10 représente l'évolution du rendement de la cellule en fonction du dopage de l'émetteur pour la cellule de référence.

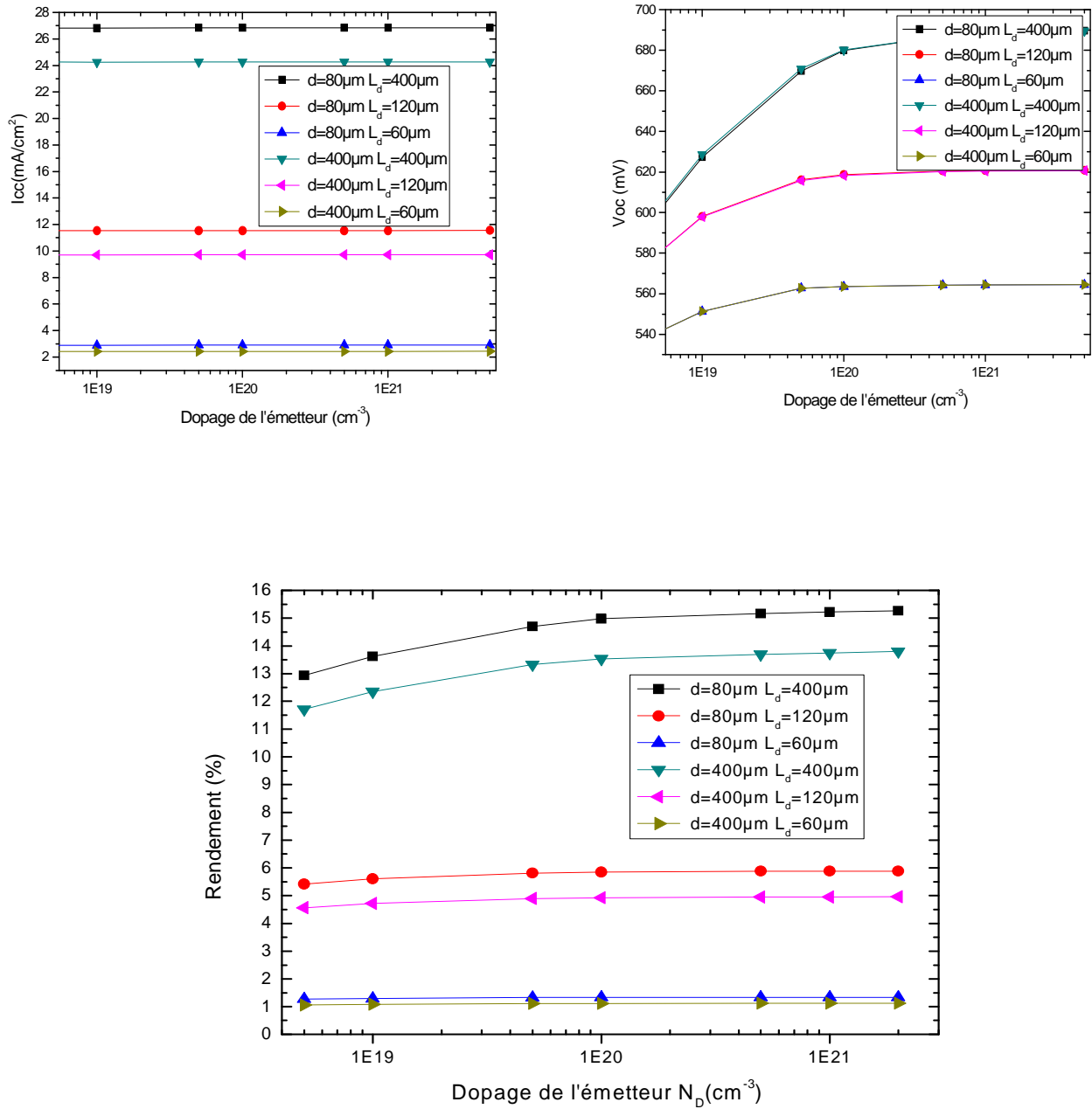


Figure III-10 : Evolution du courant de court circuit, de la tension de circuit ouvert et du rendement de la cellule en fonction du dopage de l'émetteur pour la cellule de référence et pour deux distances entre les zones dopées n^+ et p^+ et des longueurs de diffusions différentes.

Dans cette simulation, nous remarquons que le courant de court-circuit ne varie pas en fonction du dopage de l'émetteur. Par contre la tension de circuit ouvert augmente avec l'évolution du niveau de dopage de l'émetteur, ainsi que le rendement de conversion. En effet, pour les cellules à contact arrière, l'émetteur se trouve sur la face arrière de la cellule. L'épaisseur de ce dernier est très faible par rapport à l'épaisseur de la cellule ($0.5\mu\text{m} \ll 200\mu\text{m}$), la

recombinaison est pratiquement négligeable dans l'émetteur. Dans ce cas le courant de court-circuit ne varie pratiquement pas en fonction du dopage de l'émetteur.

Si l'émetteur est fortement dopé (supérieur à $1e20 \text{ cm}^{-3}$) la hauteur de la barrière de potentiel de la jonction p-n augmente et la tension de circuit ouvert augmente aussi.

Ainsi, le niveau du dopage de l'émetteur doit être élevé pour obtenir un bon contact électrique avec le métal. Ce fort dopage entraîne une augmentation du courant de saturation de l'émetteur [11]. Les calculs de courant de saturation en fonction de la profondeur de jonction sont disponibles dans la thèse de Y. Veschetti [12]. Les résultats de cette thèse montre qu'il est souhaitable de former des jonctions profondes afin de réduire le courant de saturation, si la vitesse de recombinaison en surface est élevée (10^6 cm/s), dans le cas pour nos simulation. Par contre si la vitesse de recombinaison en surface est faible ($5 \cdot 10^3 \text{ cm/s}$), alors il est nécessaire de réaliser des jonctions minces et peu dopées.

III-5-2-3. Dopage du BSF

La figure III.11 représente l'évolution du rendement de la cellule en fonction du dopage de BSF pour la cellule de référence.

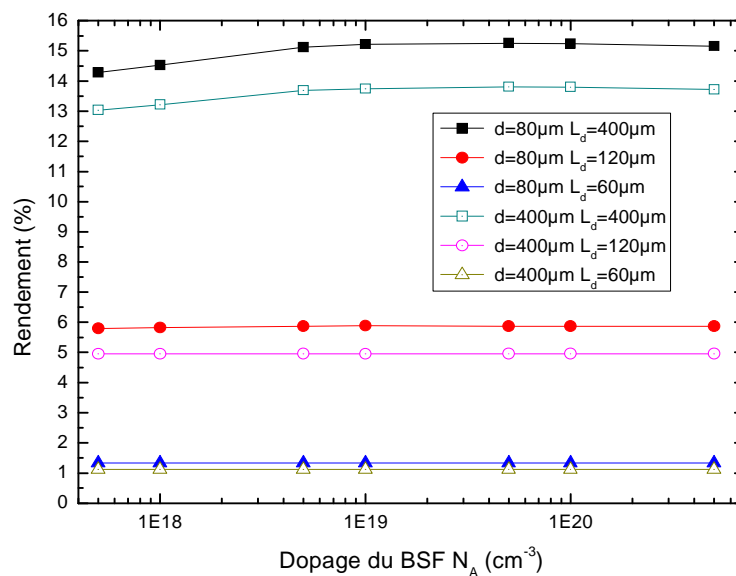


Figure III-11 : Evolution du rendement de la cellule en fonction du dopage de BSF pour la cellule de référence et pour deux distances entre les zones dopées n^+ et p^+ et des longueurs de diffusion différentes.

La recombinaison dans le BSF est pratiquement négligeable (comme dans le cas de l'émetteur) étant donnée son emplacement sur la face arrière de la cellule. Si le BSF est fortement dopé, les recombinaisons au niveau du contact sont réduites.

III-5-3. L'influence de l'épaisseur du substrat

La figure III-12 montre l'effet de l'épaisseur du substrat sur le rendement de conversion pour deux structures photovoltaïques simulées chacune par des longueurs de diffusion différentes.

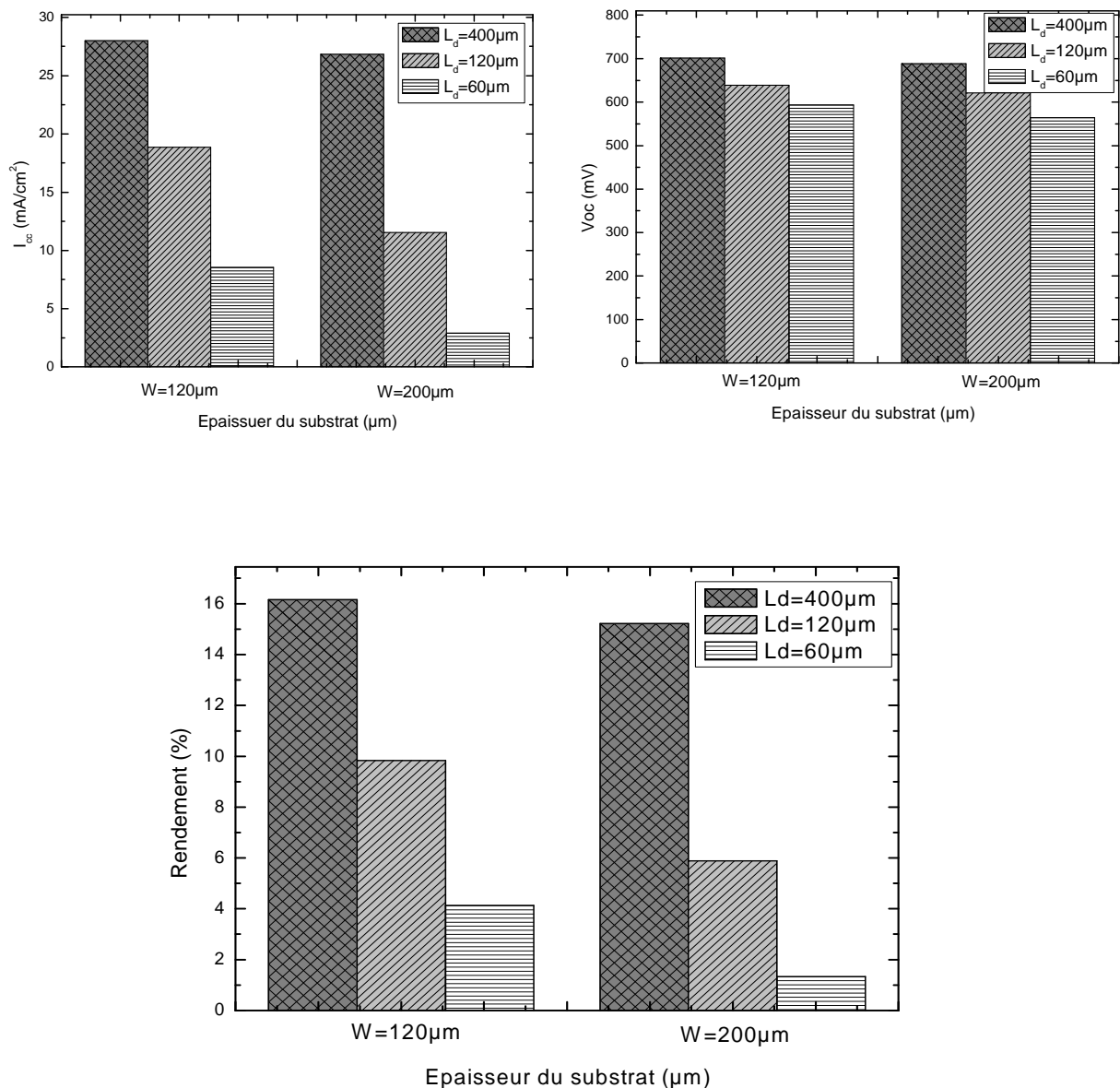


Figure III-12 : Performances d'une cellule à contact arrière sous éclairage AM 1.5G pour deux épaisseurs du substrat et des longueurs de diffusion différentes

A partir de cette figure, on remarque que si le rapport entre la longueur de diffusion et l'épaisseur du substrat est supérieur à 2, le rendement de la cellule photovoltaïque augmente. Ce résultat permet donc d'envisager l'utilisation d'un substrat de très bonne qualité.

III-5-4. Rendement quantique externe

La figure III-13 montre l'effet de la longueur de diffusion sur les rendements quantiques des cellules avec des épaisseurs de substrat respectivement de 120 μm et de 200 μm

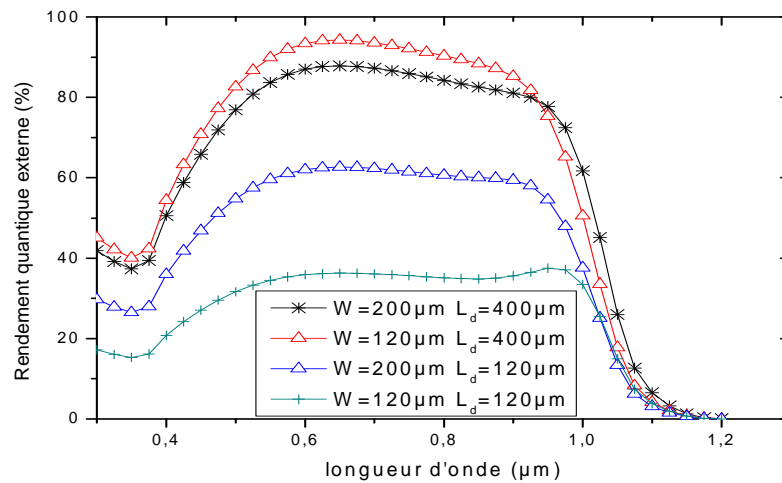


Figure III-13 : Rendement quantique externe de la structure à contacts arrière inter digités

Le rendement quantique externe est déterminé non seulement par les épaisseurs du substrat mais aussi par un paramètre important qui est la longueur de diffusion. En effet, le rendement quantique externe est supérieur à 80% pour une longueur de diffusion égale à 400 μm .

La cellule solaire absorbe des photons sur une large gamme de longueur d'onde. Sa réponse spectrale est un moyen de mesure pour caractériser ses performances. Le rendement quantique externe est défini comme le rapport entre le nombre de paires électrons-trous collectées par les contacts sur le nombre de photons incidents. Le silicium présente un coefficient d'absorption variable en fonction de la longueur d'onde. En effet, à partir de la figure III-13 nous constatons que la génération des paires électrons-trous est générée sur une plus grande profondeur du silicium à partir d'une longueur d'onde supérieur à 0.5 μm . Pour les longueurs d'ondes supérieur à

1 μ m le coefficient d'absorption diminue. En outre, les photons d'énergie inférieure au gap ne permettent aucune transition et aucune paire électron-trou n'est générée.

III-5-5. L'Etude de la face avant des cellules à contacts arrières

La face avant des cellules à contacts arrière inter digités est l'un des éléments les plus influents sur le rendement des cellules. Dans ce paragraphe, nous étudions l'influence des recombinaisons en face avant ainsi que l'effet de passivation.

III-5-5-1. Etude de la vitesse de recombinaison

Nous présentons dans la figure III-14 l'évolution des paramètres de la structure à contact arrière sous éclairage en fonction de la vitesse de recombinaison en face avant.

A partir de cette figure nous remarquons que pour des vitesses de recombinaisons supérieures à 10^3 cm/s, le courant de court-circuit et le rendement de conversion chutent fortement. Par contre, si la vitesse de recombinaison est inférieure à 10^3 cm/s, elle n'a pas d'influence sur la caractéristique I-V de la cellule.

L'étude de cette simulation montre que les performances de la cellule dépendent fortement de la passivation de la face avant.

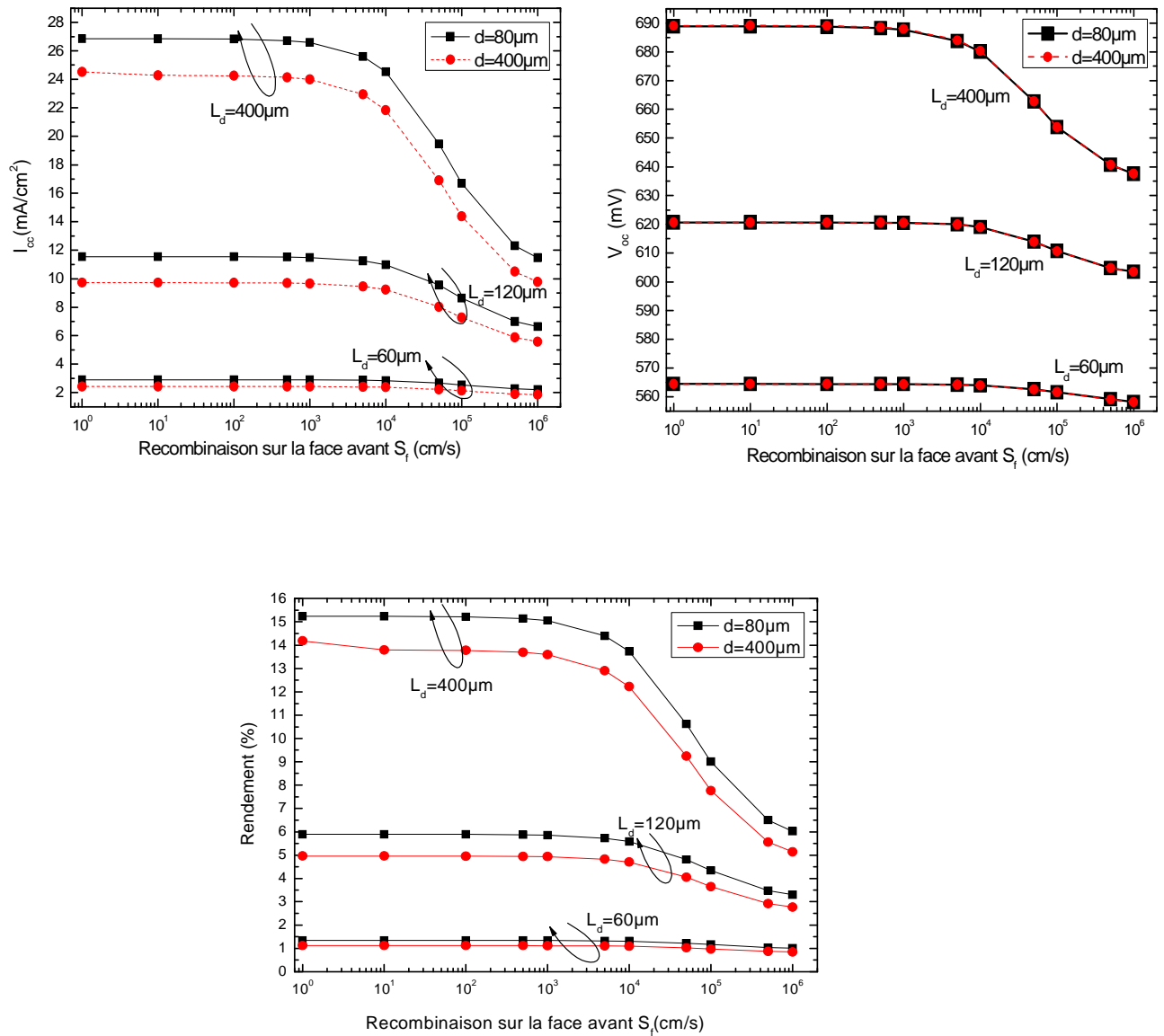


Figure III-14 : l'influence du courant de court-circuit, de la tension de circuit ouvert et du rendement de conversion de la cellule en fonction de la vitesse de recombinaison en face avant

III-5-5-2. L'influence du FSF sur la vitesse de recombinaison

La figure III-15, illustre l'effet du champ de surface dopé p^+ appelé FSF (Front Surface Field) sur la vitesse de recombinaison en face avant. Le champ FSF repose sur le même principe du champ BSF (Back Surface Field) utilisé pour la structure conventionnelle. Dans cette étude, nous fixons une profondeur de dopage du FSF de $0.2\mu\text{m}$, afin de limiter les recombinaisons de type Auger et une concentration de surface égale à 10^{19}cm^{-3} .

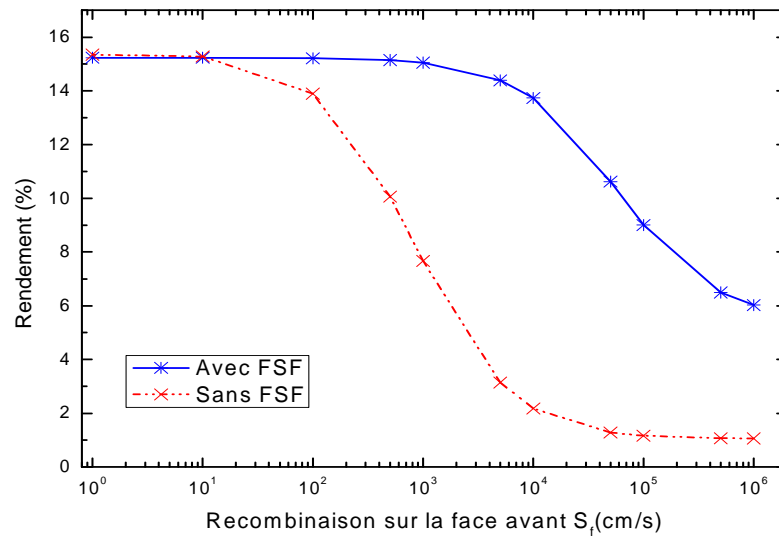


Figure III-15 : Comparaison du rendement de conversion de la cellule en fonction de la vitesse de recombinaison en face avant avec et sans FSF. $L_d=400\mu m$, $d=80nm$.

Nous remarquons sur cette figure, qu'en absence du FSF, la vitesse de recombinaison devient extrêmement critique sur le rendement de conversion dès que sa valeur dépasse les 100cm/s. La présence de ce dernier dans la structure à contacts arrière inter digités, limite l'influence de la vitesse de recombinaison en face avant.

L'étude de cette simulation, permet de mettre en évidence les paramètres principaux influents sur les performances de la cellule à contact arrière.

III-5-5-3. L'influence des couches antireflets

Comme nous avons vu dans la première partie de ce chapitre, les cellules solaires à contacts arrières sont des structures intéressantes sur substrat fin. La diminution de l'épaisseur des cellules augmente le rapport L_d/W mais diminue l'absorption de la lumière. Par conséquent, il est nécessaire d'améliorer le rendement des cellules solaires à contacts arrière en utilisant un bon réflecteur en face avant et ainsi une meilleure passivation.

Pour minimiser la réflexion à la surface de la cellule, on cherche à capter la plus grande partie des photons par un traitement chimique (texturisation) [13] ou par dépôt de couche antireflet avec un indice de réflexion adapté à celui du silicium (pour la longueur d'onde à laquelle on désire obtenir

une réflexion minimale). La passivation à partir de couches diélectriques semble être actuellement la voie la plus prometteuse. L'essor fulgurant de la technologie donne aujourd'hui accès à un plus large choix des matériaux diélectriques aux propriétés différentes. Les couches antireflets déposées sur silicium cristallin ont l'indice de réfraction qui varie entre 1.5 et 2.3[14]. Les plus adaptés dans l'industrie sont le nitrure de silicium SiN_x :H abrégé par le SiN et le dioxyde de silicium SiO_2 . Depuis quelques années, des travaux de recherche sont consacrés à la passivation surfacique par le dépôt d'oxyde suivie d'un dépôt de nitrure de silicium [15][16][17]. En référence [15] Lee J.Y. et al. ont obtenu de très faible vitesses de recombinaisons en surface par croissance d'oxyde et de nitrure où ils investiguent sur des émetteurs faiblement et fortement dopés au phosphore. Leur étude montre que la meilleure passivation est obtenue par un oxyde de silicium recouvert d'un dépôt de nitrure de silicium quelle que soit la surface à passiver.

a) *Le nitrure de silicium SiN*

Le nitrure de silicium SiN peut servir à la fois comme couche antireflet peu coûteuse et plus efficace que l'oxyde de silicium et également assurer une passivation des liaisons pendantes à la surface du silicium. Dans l'industrie photovoltaïque, la technique la plus répandue pour élaborer les couche minces de nitrure de silicium est le dépôt chimique en phase vapeur (CVD – Chemical Vapor Deposition) assisté par plasma (PECVD – Plasma Enhanced Vapor Deposition) à partir des gaz silane (SiH_4) et amoniac (NH_3). Cette technologie permet de réaliser des dépôts à basse température ($<500^\circ\text{C}$). Le dépôt assisté par plasma à été inventé en 1965 par Sterling et al. [18] et initialement utilisé dans le domaine de la microélectronique. La technique PECVD fut ensuite pour la première fois mentionnée pour une application photovoltaïque en 1981 par Hezel et al. [19]. Elle permet d'obtenir une excellente qualité de passivation sur surface de type p et améliore également les surface fortement dopées de type n^+ .

b) *Le dioxyde de silicium SiO_2*

Un moyen largement utilisé pour passiver efficacement les surfaces des cellules solaires à base de silicium est l'oxydation thermique obtenue à haute température ($> 1000^\circ\text{C}$). Les qualités de passivation obtenues par cette méthode sont excellentes. Des vitesses de recombinaisons aux environs de 10cm/s sont généralement atteintes sur surface p ou n de haute résistivité [15]. Malgré ces nombreux avantages, le dioxyde de silicium thermique (SiO_2) est rendu indésirable

pour une industrialisation à cause des hautes températures et des temps d'élaboration relativement longs. De plus, la durée de vie des porteurs minoritaires dans le volume de la cellule est dégradée par les températures trop élevées [20] [21] et nécessite un important budget thermique.

III-5-5-4. L'utilisation d'une double couche antireflet

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons utilisé une simple couche antireflet (SCAR) de nitrure de silicium SiN. Cette couche constitue une structure fiable pour la passivation de la face avant des structures à contacts arrière inter digités. Dans cette deuxième partie, nous utilisons une double couche antireflet (DCAR) SiN/SiO₂ déposée successivement sur le substrat :

- Une couche de SiN d'indice de réfraction $n = 2.05$
- Une couche de SiO₂ d'indice de réfraction $n = 1.52$

A partir de la figure (III-16), on remarque que les cellules avec une simple couche antireflet SiN présentent un courant de court-circuit plus faible par rapport aux cellules avec une double couche antireflet SiN/SiO₂. Par contre, la tension à circuit ouvert varie très peu. En effet, comme nous avons vu lors des simulations présentées en figure III-14, la vitesse de recombinaison en face avant est très influente sur le courant de court-circuit des cellules à contacts arrière puisqu'une part importante de la génération des porteurs a lieu dans cette région de la cellule.

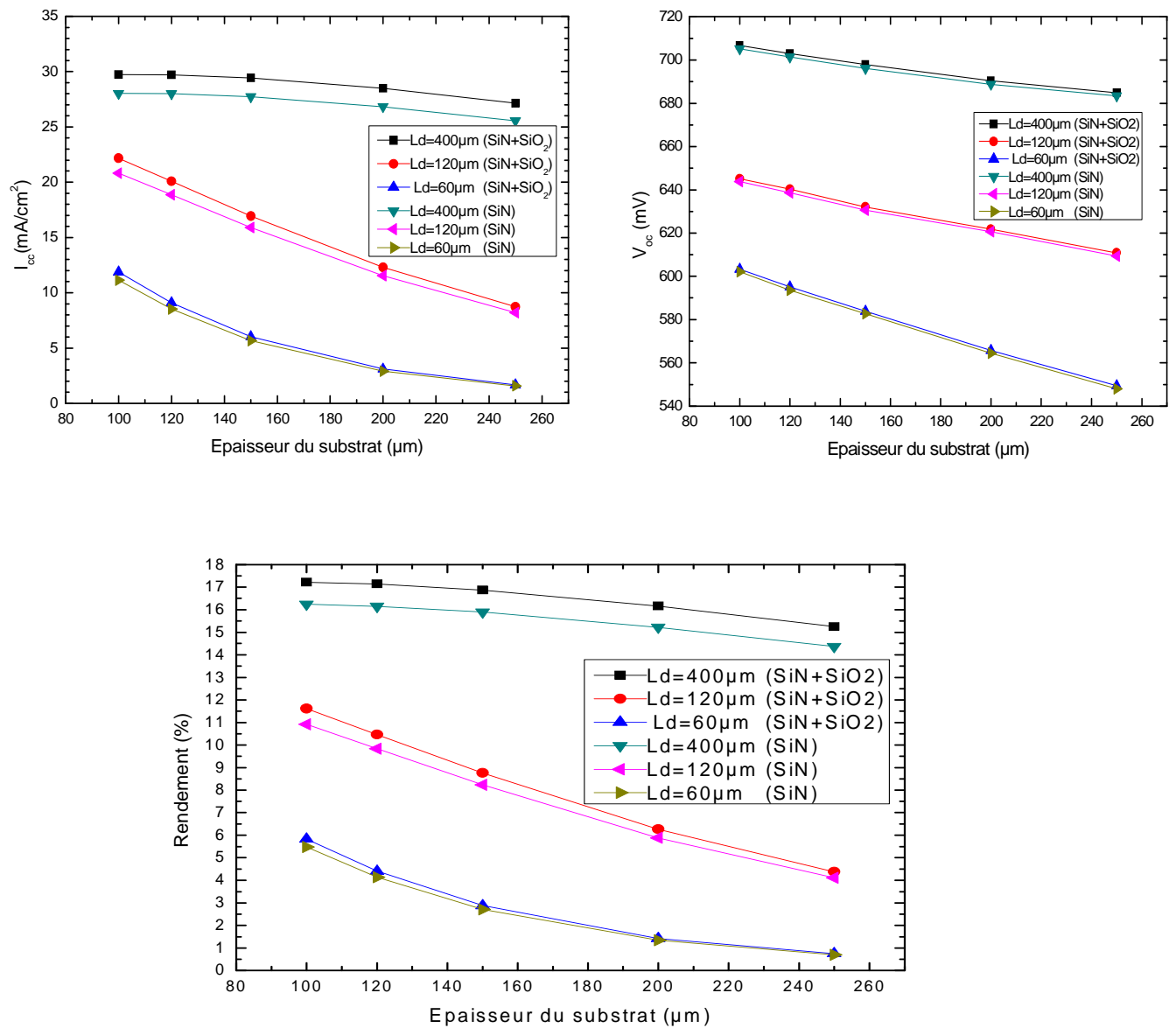


Figure III-16 : L'influence de la double couche antireflet sur le rendement des cellules à contacts arrières inter digités.

On constate aussi, que la double couche antireflet permet d'obtenir les meilleurs résultats du rendement de conversion sous éclaircissement. Cependant, dans le cas des cellules à contacts arrières avec une simple couche antireflet la réflectivité est plus faible et la passivation de surface est légèrement augmentée. Cela entraîne une diminution de la vitesse de recombinaison en face avant de la cellule.

La double couche antireflet permet d'améliorer le courant de court-circuit ainsi que le rendement de conversion. Ce résultat permet de valider l'intérêt d'une double couche antireflet par ces qualités de passivation en surface.

III-7.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence des paramètres de la cellule solaire inter digité sur leur rendement à l'aide de la simulation numérique en 2D sous SILVACO/ATLAS. Le but de l'étude était d'optimiser les paramètres géométriques et de dopage du substrat en fonction des longueurs de diffusion afin d'obtenir un rendement maximal.

Dans une première partie, l'étude a permis de démontrer l'intégration de la structure à contact arrière inter digité. Cela exprime la réalité technologique tenant compte des limites imposées par la technique de sérigraphie. La simulation numérique montre que la structure à contacts arrière inter digités *nécessite l'utilisation d'un substrat de bonne qualité électronique*. Une optimisation de la géométrie des régions n^+ et p^+ confirme que l'utilisation d'un *rapport optimal de la largeur des régions n^+ sur la largeur des régions p^+ est égal à 10*. Ainsi la distance entre ces deux régions est égale à $80\mu m$ pour qu'elle soit réalisable expérimentalement par sérigraphie.

Dans une deuxième partie, nous avons étudié la face avant de la cellule en fonction des différents paramètres de la structure afin d'améliorer le rendement de conversion. L'étude de la simulation montre que le rôle du FSF est important. A travers des tests nous avons constaté qu'en absence du FSF, la vitesse de recombinaison devient extrêmement critique sur le rendement de conversion. Nous nous sommes aussi intéressés à l'influence de la face avant en utilisant une double couche antireflet qui permet d'obtenir des meilleurs résultats de rendement de conversion. Suite à ces simulations nous avons étudié l'influence du rapport longueur de diffusion sur l'épaisseur du substrat. L'utilisation d'un rapport L_d/W supérieur ou égal à 2 permet d'augmenter l'efficacité de la cellule.

Cette étude permet en outre de mettre en évidence les paramètres principaux influant sur les performances de la cellule. Nous déduisons ainsi les conditions optimales pour atteindre des rendements de conversion satisfaisants ($> 16.21\%$ avec une technologie de sérigraphie).

III-8. Références bibliographiques

- [1] P.VERLINDER, F.VAN DER WIELE : “Optimization of substrate thickness for interdigitated back contact silicon solar cells”. Elsevier, Solar Cells, 9, 247-256 (1983)
- [2] O.NICHIPORUK : “ *Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités* ” , Thèse, INSA, Lyon, 2005.
- [3] S.M. YANG, J.PLÁ : “*Optimization of the back contact in c-Si solar cells*”. Elsevier, Solid State Electron (2009).
- [4] S. MARTINUZZI, O. PALAIS, M. PASQUINELLI, F. FERRAZZA : “*N-type multicrystalline silicon wafers and rear junction solar cells*”. Eur. Phys. J. Appl. Phys. 32, 187-192 (2005).
- [5] SVEN KLUSKA, FILIP GRANEK, MARC RÜDIGER, MARTIN HERMLE, STEFAN W.GLUNZ : “*Modeling and optimization study of industrial n-type high-efficiency back-contact back-junction silicon solar cells*”. Elsevier, Solar Energy Materials & Solar Cells. 94, 568–577 (2010).
- [6] M. TUCCI, L. SERENELLI, E. SALZA, S. DE IULIIS, L.J. GEERLIGS, D. CAPUTO, M. CECCARELLI, G.DE CESARE “*Back contacted a-Si:H/c-Si heterostructure solar cells*”. Journal of Non-Crystalline Solids, 354, 2386–2391 (2008)
- [7] D.DIOUF, J.P. KLEIDER, T.DESRUES, P.-J.RIBEYRON: “*Study of interdigitated back contact silicon heterojunctions solar cells by two-dimensional numerical simulations*”. Materials Science and Engineering B 159-160 (2009) 291-294.
- [8] I. JOZWIK, P. PAPET, A. KAMINSKI, E. FOURMOND, F. CALMON, M. LEMITI : “*Interdigitated back contact solar cells with SiO₂ and SiN back surface passivation*”. Journal of Non-Crystalline Solids 354 (2008) 4341–4344
- [9] Atlas User’s Manuel for from SILVACO International, version 5.14.0.R
- [10] (Virtual Wafer Fab) Manuel for from SILVACO International, version 5.14.0.R
- [11] R.R KING, R.A. SINTON, R.M. SWANSON: “*Studies of diffused phosphorous emitters: saturation current, surface recombination velocity and quantum efficiency*”, IEEE Transactions on electron devise, vol. 37, No.2 Feb 1990.
- [12] Y.VESCHETTI : “*Modélisation caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince* ” , thèse université of Louis Pasteur, 2005.
- [13] K.SOONWOO, Y.JONGHEOP, Y.SEWANG, S.L.JOHN, K.DONGHWAN

“Effects of textured morphology on the short circuit current of single crystalline silicon solar cells: Evaluation of alkaline wet-texture processes”. Current Applied Physics,9, (2009), pp. 1310-1314

[14] A.MOUHOUD “Procédés technologiques alternatifs de réalisation et de réalisation des photopiles solaires au silicium cristallin” Rev.Energ.Ren. Vol.4 (2001) pp11-22

[15]LEE J.Y., GLUNZ S.W. “Investigation of various surface passivation schemes for silicon solar cells” Solar Energy Materials and Solar Cells, 2006, Vol.90, pp.82-92

[16]SCHULTZ O., HOFMANN M., GLUNZ S.W. et al. “Silicon oxide / silicon nitride stack system for 20% efficient silicon solar cells” 31 st IEEE PVSC Orlando, Florida, 2005, pp. 872-876

[17] HAVERKAMP H., MCANN M., HUSTER F. et al “Screen Printed Low-Cost IBC Solar Cells” Preparatory Investigations, 20th European Solar Energy Conference and Exhibition, 2005, Barcelona, Spain, pp. 1248-1250

[18] H.F. STERLING and R.C.G. SWANN “Chemical vapor deposition promoted by r.f (radio-frequency) discharge”. Solide-State Electronics, 1965, Vol.8 pp. 653-654.

[19] R. HEZEL and R. SCHÖRNER “Plasma Si nitride – A promising dielectric to achieve high – quality silicon MIS/IL” Solar cells. Journal of Applied Physics, 1981, Vol.52, n°4, pp.3076-3079.

[20] C. LEGUIT et al. “Low temperature surface passivation for silicon solar cells”. Solar Energy Materials and Solar Cells. 1996, Vol.40, pp.297-345.

[21] T. JANA, MUKHOPADHYAY.S and RAY.S “low temperature silicon oxyde and nitride for surface passivation of silicon solar cells”. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2002, Vol.71, pp.191-211

Chapitre IV

*Choix du procédé technologique-
Comparaison entre la structure à contacts
arrière inter digités et la cellule
conventionnelle*

IV-1. Introduction

Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles à base de silicium cristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons le principe de la sérigraphie (les encres, le dépôt et le traitement thermique). Dans le cadre de cette étude, le but n'est pas d'atteindre de très hauts rendements de conversion, mais de proposer une structure alternative à la structure classique. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la photolithographie ou l'évaporation sous vide sont utilisées [1].

Ensuite, nous étudions en détail le procédé technologique mise en œuvre pour améliorer les performances des cellules à contacts arrières inter digités. Pour cela, deux procédés technologiques sont présentés : par diffusion sélective et par gravure.

Dans une deuxième partie, nous réalisons des simulations avec une structure conventionnelle. Nous considérons dans cette étude, les performances de l'efficacité entre une cellule à contact arrière avec une simple couche anti reflet SiN, une cellule à contact arrière avec une double couche antireflet SiN+SiO₂ et une cellule conventionnelle.

IV-2. La sérigraphie

La sérigraphie est un procédé d'impression utilisant un écran constitué d'un maillage qui laisse passer l'encre (ou la pâte) à l'aide d'une raclette soumise à une pression contrôlée. Ce processus est capable d'imprimer sur de nombreuses matières : papiers, tissus, plastiques, métaux, verres, céramiques ...

L'industrie de la sérigraphie englobe un grand nombre de branches: l'impression de motifs sur les vêtements, les affiches, les CD ou dans le domaine de la microélectronique avec l'impression des circuits hybrides.

IV-2-1. Avantages de la technologie sérigraphie

Les principaux avantages de cette technologie sont :

- La miniaturisation des systèmes qui permet la réalisation de plusieurs éléments sur un même substrat.

- Le coût de production. La sérigraphie est une technologie de grande production qui devient rentable pour les demandes à fort volume. Les investissements de base sont une machine à sérigraphie, une étuve et un four de grand volume. Ensuite, les produits intermédiaires et les consommables sont vendus en grande quantité et à bas coût (liant temporaire, solvant).
 - L'universalité de la technique, c'est-à-dire que l'on peut déposer sur plusieurs natures de supports (substrat en silicium, ...) et que l'on peut déposer divers matériaux (métal, isolant, semi-conducteur ...). Cette universalité permet d'adapter et d'intégrer cette technique dans un procédé industriel déjà existant.
 - Le dernier avantage de la sérigraphie est la simplicité de mise en place de la procédure.
- Tous ces avantages ont permis le développement des technologies de sérigraphies dans un grand nombre de domaines.

IV-2-2. Principe de la technique

Dans l'industrie photovoltaïque la sérigraphie permet d'effectuer des dépôts à vitesses très élevée et avec une épaisseur de pâte qui peut atteindre $30\mu\text{m}$, ce qui permet de transporter d'importantes densités de courant [2].

La méthode de dépôt par sérigraphie consiste à l'application d'une pâte sur un substrat, à travers un masque, suivie d'un traitement thermique qui permet la solidification et la densification de la pâte sur la cellule. Ainsi les contacts sont réalisés par la diffusion des éléments métalliques de la pâte dans le semi conducteur. Ces éléments métalliques constitutifs sont l'argent pour les régions de type n^+ et l'aluminium pour les régions de type p^+ .

La figure (VI-1) illustre le principe de la technique sérigraphie

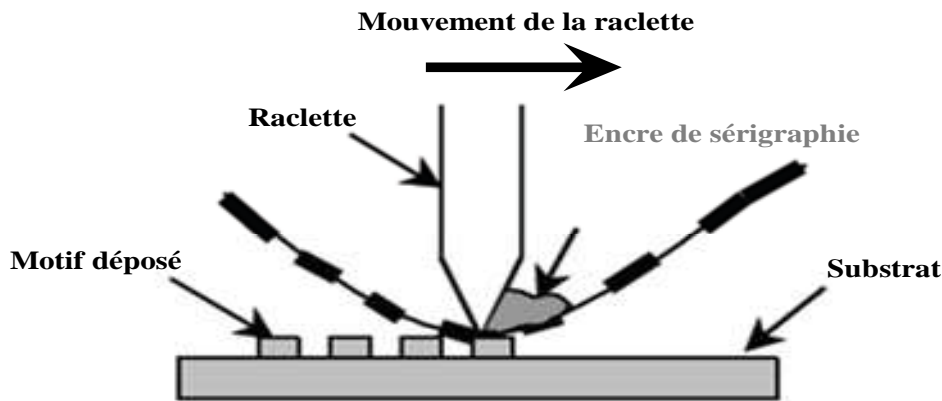


Figure IV-1 : Principe de la sérigraphie [3]

Le procédé de sérigraphie est déterminé par un cycle de la raclette. Au départ du cycle, la pâte est étalée sur le motif de l'écran à imprimer. Ensuite, nous appliquons une pression à la raclette ainsi qu'un déplacement horizontal à vitesse constante. La pression appliquée à la raclette provoque le passage de la pâte à travers les ouvertures du motif de l'écran. A la fin du cycle, la raclette et l'écran revient vers leurs positions initiales pour effectuer un nouveau dépôt.

IV-2-3. Pâte de sérigraphie

La pâte de sérigraphie est constituée de trois éléments principaux. Les éléments qui la composent sont [4]:

➤ *le liant organique*

Le liant organique est un liquide qui contient divers éléments qui disparaîtront au fur et à mesure des opérations.

- Un liant provisoire qui assure la cohésion de la couche après l'étape du dépôt et avant le traitement thermique,
- Un solvant qui liquéfie le liant et permet un contrôle rhéologique de l'encre (paramètre important dans la préparation des encres),
- Des gélifiants ou lubrifiants qui donnent les qualités de mouillage.

➤ *Le métal actif*

Pour réaliser tous les connexions métalliques, les fabricants utilisent différents métaux actifs tels que des poudres d'or, d'argent, de carbone ou encore des alliages.

Les métaux utilisés dans le cas de notre structure sont l'argent pour le silicium de type n (l'émetteur) et l'aluminium pour le silicium de type p.

Quels que soient les matériaux utilisés, afin que la couche épaisse conserve les mêmes propriétés que le matériau initial, il faut respecter un certain nombre de conditions pour que l'encre traverse l'écran.

- Les particules doivent être très fines dont les dimensions peuvent aller jusqu'à $5\mu\text{m}$,
- La distribution granulaire doit être étroite.

➤ Les liants minéraux

Les liants minéraux assurent l'adhérence de la couche et ils permettent d'assurer une bonne viscosité de la pâte. Il existe deux systèmes de liant :

- le liant vitreux : est souvent un verre fusible à basse température (600 à 900°C) et possédant des propriétés d'adhérence à température ambiante.
- le liant réactif : qui au lieu d'agir comme une *colle*, utilise des oxydes pour assurer la cohésion avec le substrat et le matériau actif.

IV-2-4. Recuit des pâtes de sérigraphie

La technique de la sérigraphie est plus fréquente car elle est plus facile à automatiser. Au cours de la sérigraphie, une pâte d'argent est pressée à l'aide d'une racle au travers de ces ouvertures et atteint ainsi la cellule en cours de fabrication. La pâte doit ensuite être frittée. Pendant cette opération, le métal diffuse jusqu'à la surface de l'émetteur, ce qui assure un bon contact.

Le recuit d'une pâte de sérigraphie doit être effectué suivant les étapes suivantes [2] :

a) Etuvage de la pâte

Cette opération consiste à évaporer les solvants présents dans la pâte grâce à un chauffage modéré à une température de 200°C pendant une durée de (20-30 min). Elle doit être effectuée très rapidement pour éviter l'étalement de la pâte de sorte que la plaquette puisse être manœuvrée sans que le modèle imprimé soit endommagé. Malheureusement, ceci ne peut pas être évité car le chauffage brusque formerait une croûte sur la surface de celle-ci [5,6].

b) Déliantage de la pâte

Dans cette étape, les composés organiques sont consommés à une température moyenne de 550°C, sous une atmosphère d'oxygène afin d'évacuer les différents éléments carbonés en formant des composés volatils tels que les COx.

c) Frittage de la pâte

La pâte se densifie, diffuse au travers de la couche antireflet en face avant, et se solidarise à la cellule. Cette phase est accomplie à une température élevée dépassant le seuil de 800°C et pendant une durée de 10-15 minutes, sous une atmosphère d'azote.

IV-2-5. Qualité de la sérigraphie

Les moyens techniques que nécessite cette méthode sont peu importants par rapport à des contacts évaporés. Elle bénéficie en outre d'une rapidité d'exécution qui supporte la cadence de production industrielle élevée d'environ une cellule toute les deux secondes et 1500 cellules de 156,2cm de côté par heure.

Les différents paramètres dont dépend la qualité de la sérigraphie sont résumés dans le tableau (IV-1) [5]

Tableau VI-1 : Paramètres intervenants dans la sérigraphie.

ELEMENTS	PARAMETRES
Raclette	Vitesse
	Pression
	Angle d'attaque
	Dureté du caoutchouc en poise
Encre	Viscosité (température de la pièce)
	Comportement thixotrope
Ecran de sérigraphie	Distance écran/cellule
	Hauteur de l'émulsion
	Ouverture des lignes

IV-3. Le procédé technologique de réalisation des cellules solaires inter digités


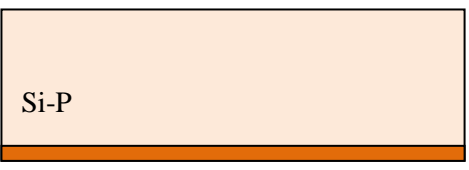
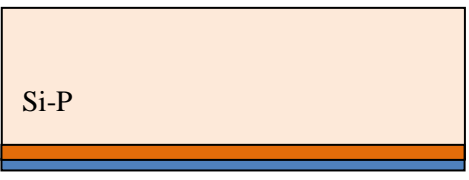
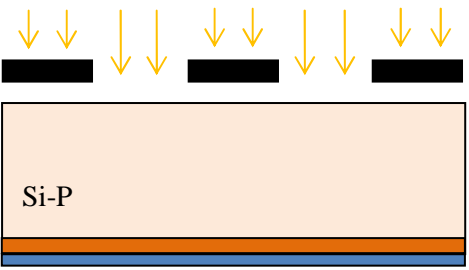
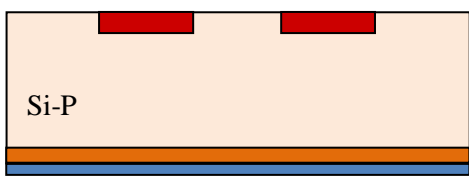
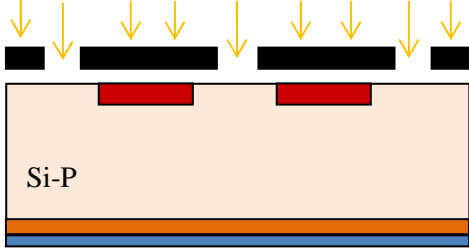
L'un des principaux inconvénients des structures à contact arrière est la nécessité de nombreux masques pour la réalisation de la cellule. Dans la littérature, ce type de cellule nécessite trois à six lithographies [7]. Cependant quelques équipes ont développé des techniques afin de réduire le nombre d'étapes. Le procédé proposé par R.A.Sinton [8] nécessite qu'un seul masque mais la séparation des contacts n'est pas toujours obtenue. Un autre procédé sans masque a été proposé par J.W. Muller [9]. Cette technique repose sur la formation de tranchées en face arrière et d'évaporation oblique d'une barrière de diffusion et des contacts électriques. Ce procédé nécessite cependant trois évaporations. Aussi, le procédé développé par Rise [10] ne nécessite aucun masque mais un enchaînement de gravures laser. Récemment, P. Papet [11] a présenté un autre procédé simplifié de réalisation des cellules à jonction arrière. Ce procédé consiste à réaliser cette structure sur couche épitaxiée mais l'auteur précise que ces couches sont très fragiles et un minimum de contraintes doit leur être appliquées. Plusieurs laboratoires développent actuellement des technologies basés sur l'utilisation de la sérigraphie. En effet, H. Haverkamps et al [12] développent un procédé technologique des cellules à jonction arrière en utilisant un matériau mc-type n. Ce dernier est moins sensible aux impuretés métalliques, permet d'obtenir de meilleures longueurs de diffusions des porteurs minoritaires.

L'objectif de ce paragraphe est de détailler deux protocoles technologiques de réalisation des cellules à contacts arrière inter digitée par diffusion sélective et par gravure basés sur l'utilisation de la sérigraphie.

IV-3-1. IBC par diffusion sélective

Dans cette partie, nous détaillons le procédé technologique de réalisation des cellules à contacts arrière inter digité par diffusion sélective.

Sur la face avant de la cellule, la première étape de cette technologie consiste à nettoyer la plaque initiale. Cette étape de nettoyage est suivie par une diffusion du BCl_3 afin de créer les zones dopées p^+ (FSF). Ensuite, nous déposons une couche de nitrure de silicium SiN par la technique PECVD. Cette technique permet d'obtenir des vitesses de dépôt relativement élevées à basse température ($<400^\circ\text{C}$).

<p>1)</p> 	<p>Nettoyage chimique de la plaque initiale</p>
<p>2)</p> 	<p>Création des zones p^+ par diffusion BCl_3 pour la formation du FSF</p>
<p>3)</p> 	<p>Dépôt d'une couche de nitrure de silicium SiN par PECVD. les caractéristiques de cette couche sont : $d=80\text{nm}$ et $n=2.05$</p>
<p>4)</p> 	<p>Dépôt du premier masque qui sert à délimiter les zones dopées n^+ (émetteur).</p>
<p>5)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Création des zones n^+ par diffusion de phosphore de $POCl_3$ - gravure sèche SF_6 du masque.
<p>6)</p> 	<p>Dépôt du deuxième masque qui sert à délimiter les ouvertures des contacts aluminium</p>

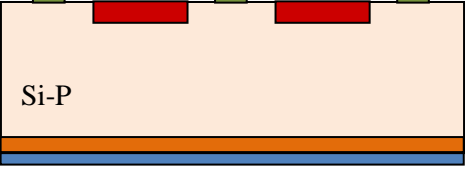
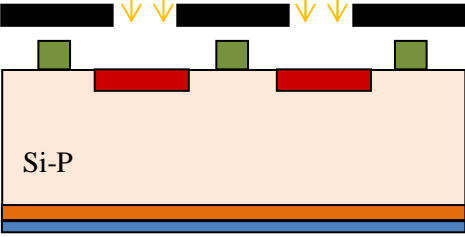
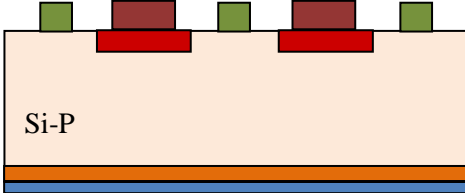
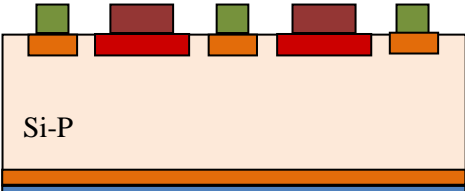
<p>7)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Sérigraphie aluminium - décapage du masque - Etuvage de la pate 														
<p>8)</p> 	<p>Dépôt du dernier masque qui sert à délimiter les ouvertures des contacts argent</p>														
<p>9)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Sérigraphie argent sur les régions n⁺ - Décapage du masque - Etuvage de la pate 														
<p>10)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Recuit thermique (quelques minutes) - Formation de la région p⁺ (BSF) 														
<p>Légende des schémas :</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tbody> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <table border="0"> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #f5deb3; border: 1px solid black;"></td> <td>Silicium cristallin</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #6495ed; border: 1px solid black;"></td> <td>Nitrure de silicium</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #ffa500; border: 1px solid black;"></td> <td>Zones dopées p⁺</td> </tr> </table> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <table border="0"> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #ff0000; border: 1px solid black;"></td> <td>Zones dopées n⁺</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #808000; border: 1px solid black;"></td> <td>Contact aluminium</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #800000; border: 1px solid black;"></td> <td>Contact argent</td> </tr> </table> </td> </tr> </tbody> </table>		<table border="0"> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #f5deb3; border: 1px solid black;"></td> <td>Silicium cristallin</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #6495ed; border: 1px solid black;"></td> <td>Nitrure de silicium</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #ffa500; border: 1px solid black;"></td> <td>Zones dopées p⁺</td> </tr> </table>		Silicium cristallin		Nitrure de silicium		Zones dopées p ⁺	<table border="0"> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #ff0000; border: 1px solid black;"></td> <td>Zones dopées n⁺</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #808000; border: 1px solid black;"></td> <td>Contact aluminium</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #800000; border: 1px solid black;"></td> <td>Contact argent</td> </tr> </table>		Zones dopées n ⁺		Contact aluminium		Contact argent
<table border="0"> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #f5deb3; border: 1px solid black;"></td> <td>Silicium cristallin</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #6495ed; border: 1px solid black;"></td> <td>Nitrure de silicium</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #ffa500; border: 1px solid black;"></td> <td>Zones dopées p⁺</td> </tr> </table>		Silicium cristallin		Nitrure de silicium		Zones dopées p ⁺	<table border="0"> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #ff0000; border: 1px solid black;"></td> <td>Zones dopées n⁺</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #808000; border: 1px solid black;"></td> <td>Contact aluminium</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #800000; border: 1px solid black;"></td> <td>Contact argent</td> </tr> </table>		Zones dopées n ⁺		Contact aluminium		Contact argent		
	Silicium cristallin														
	Nitrure de silicium														
	Zones dopées p ⁺														
	Zones dopées n ⁺														
	Contact aluminium														
	Contact argent														

Tableau V-2 : *Etapas technologiques de réalisation des cellules à contacts arrière inter digités par diffusion sélective*

Sur la face arrière de la cellule, nous utilisons trois masques de sérigraphie (figure- IV-2) afin de varier les largeurs des différentes régions. Le premier dépôt du masque consiste à la formation de l'émetteur par diffusion de phosphore POCl_3 . Après la formation de l'émetteur, nous procédons à un décapage du masque. Ensuite, le deuxième masque consiste à déposer par sérigraphie le contact d'aluminium. Cette opération est suivie par un décapage du masque et un étuvage de la pâte d'aluminium. L'étuvage consiste à évaporer les solvants présents dans la pâte pendant une durée de 20 à 30 min et une température de 200°C . Cette opération doit être effectuée très rapidement pour éviter l'étalement de la pâte. Enfin, le dernier masque consiste à déposer le contact d'argent sur les zones dopées n^+ . Un second étuvage est réalisé pour évaporer les solvants de la pâte d'argent.

A la fin, nous traitons thermiquement les cellules à une température élevée (environ 800°C) pendant quelques minutes. Cette dernière étape permet non seulement de combiner la passivation face avant mais aussi de renforcer les contacts entre le métal et le semiconducteur. Toutes ces étapes technologiques sont représentées sur le tableau (IV-2). Les doigts de contacts de la cellule à contact arrière inter digitée sont représentés la figure (IV-3).

Les masques utilisés pour la réalisation des cellules à contacts arrière ont les motifs suivants :

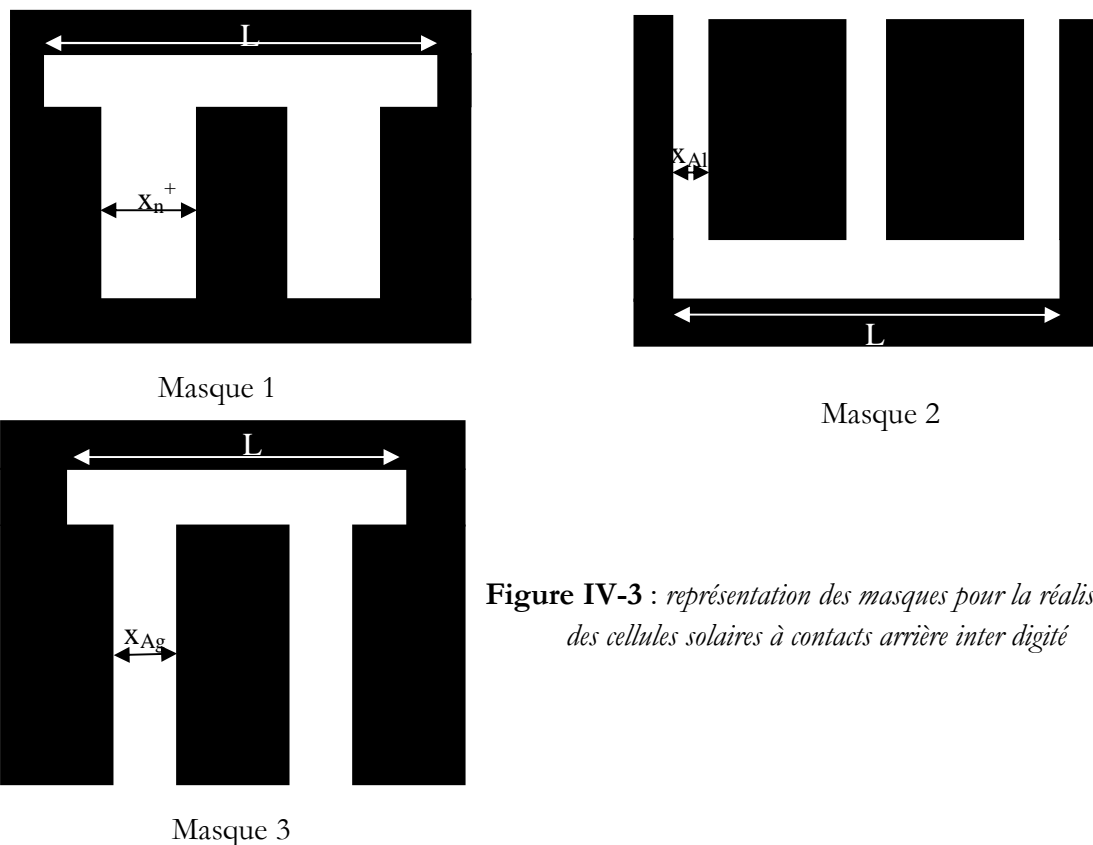


Figure IV-3 : représentation des masques pour la réalisation des cellules solaires à contacts arrière inter digité

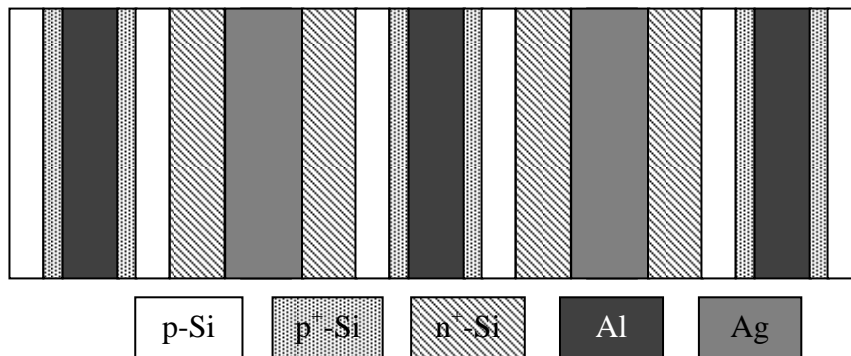
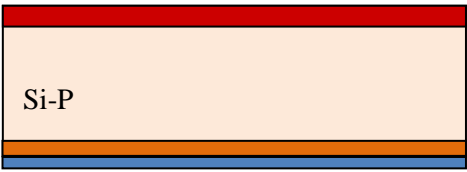
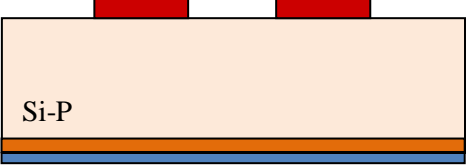


Figure IV-4: représentation des doigts de contacts de la cellule à contact arrière inter digitée

IV-3-2. IBC par gravure

Ce procédé a été investi par J. Rentesh et *al* [14]. Le procédé technologique de réalisation des cellules solaires à contacts arrière inter digités par gravure consiste en la formation d'une zone de type n^+ pleine surface que l'on grave ensuite localement par plasma pour permettre de former le contact argent et la zone p^+ . Dans ce procédé nous utilisons trois masques et tous les contacts sont déposés par sérigraphie. Le procédé technologique de la IBC par gravure est décrit sur la figure (IV-5). Les trois premières étapes du procédé IBC par diffusion sélective ne sont pas modifiées.

<p>4)</p> 	<p>Formation d'une zone n^+ par diffusion $POCl_3$.</p>
<p>5)</p> 	<p>Gravure plasma de la zone n^+ par SF_6</p>

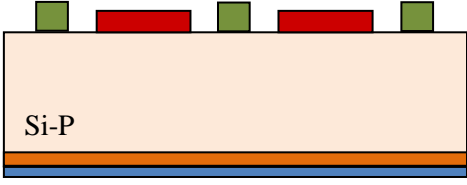
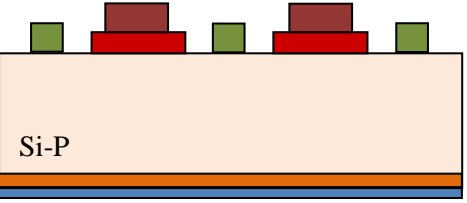
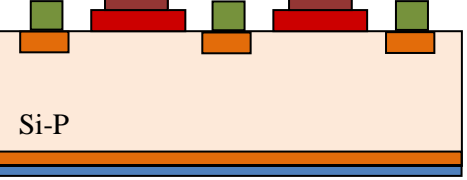
<p>6)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Dépôt du deuxième masque qui sert à délimiter les ouvertures des contacts aluminium. - Sérigraphie aluminium
<p>7)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Dépôt du dernier masque qui sert à délimiter les ouvertures des contacts argent - Sérigraphie argent
<p>8)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Recuit RTP des contacts - Formation de la zone p⁺

Tableau V-5 : *Etapes technologiques de réalisation des cellules à contacts arrière inter digités par gravure*

IV-3-3. Comparaison entre les deux procédés

La figure (IV-6) montre l'évolution du rendement de la cellule en fonction du rapport des régions dopées n⁺ et p⁺ pour les deux technologies.

Dans cette étude, nous considérons un niveau de dopage du substrat de 10¹⁷cm⁻³, une longueur de diffusion de 400μm et une distance de 80nm entre les régions dopées n⁺ et p⁺.

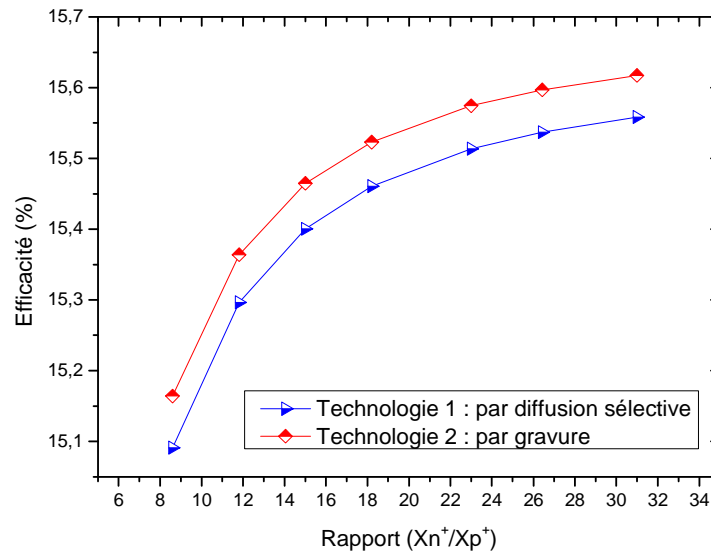


Figure VI-6 : Evolution du rendement de la cellule en fonction du rapport des régions X_{n^+}/X_{p^+} pour les deux technologies.

On constate que les résultats obtenus de ces deux procédés technologiques de réalisation des contacts métalliques par sérigraphie sont cependant presque similaires.

Ces deux procédés offrent la possibilité d'effectuer un recuit à température élevée des contacts métalliques et de percer le film antireflet à base de nitrure de silicium hydrogéné ($\text{SiN}_x\text{:H}$). Ceci permet une bonne passivation de la face avant de la structure photovoltaïque.

Le procédé technologique de réalisation des cellules solaires à contacts arrière par diffusion sélective est moins encourageant que le procédé par gravure. Toutefois, l'avantage de ce procédé est la réduction du nombre d'étapes d'alignement grâce à la gravure plasma SF_6 . Aussi, cette gravure est mieux considérée dans l'industrie car elle évite l'utilisation coûteuse de produits chimiques et d'eau dés-ionisée [15].

IV- 4. Comparaison entre la structure conventionnelle et la structure à contacts arrière

Pour expliquer l'évolution du rendement de conversion en fonction du rapport longueur de diffusion sur épaisseur du substrat, nous avons réalisé des simulations avec une structure conventionnelle. La figure (IV-7) représente la structure conventionnelle et les paramètres de la cellule utilisée pendant la simulation.

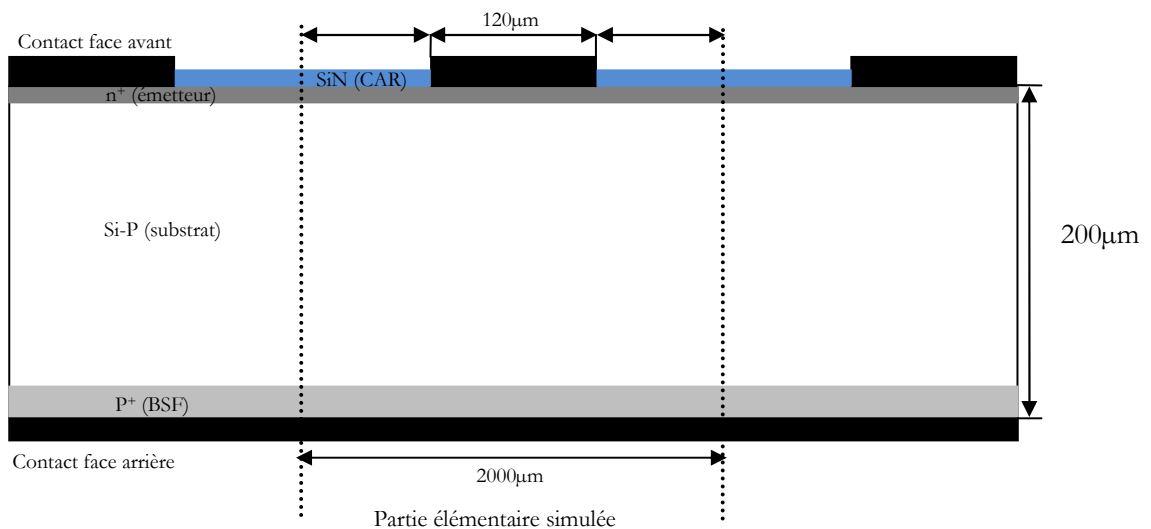


Figure IV-7 : Structure de la cellule de référence conventionnelle simulée sous SILVACO

IV-4-1. L'influence du rapport de la longueur de diffusion sur l'épaisseur du substrat

Nous représentons sur la figure (IV-8) la variation du rendement de conversion en fonction du rapport longueur de diffusion sur épaisseur du substrat. Nous considérons dans cette étude, les performances de l'efficacité entre une cellule conventionnelle, une cellule à contacts arrière avec une simple couche anti reflet et (SiN) et une cellule à contacts arrière avec une double couche antireflet (SiN+SiO₂).

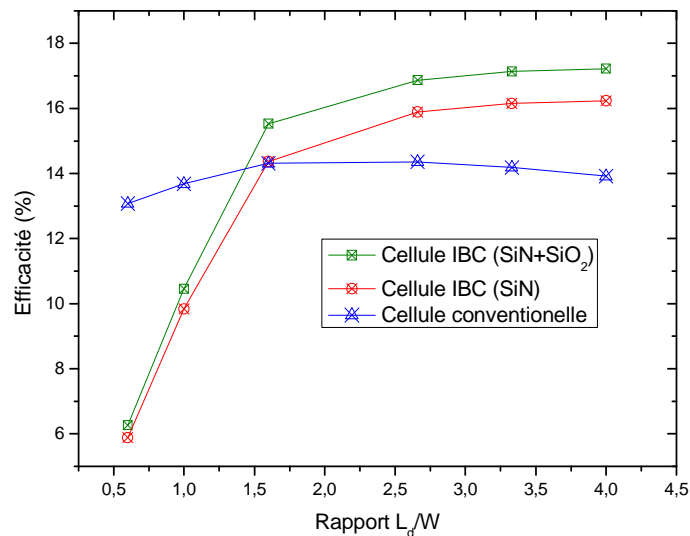


Figure IV-8 : L'influence du rapport de la longueur de diffusion sur l'épaisseur du substrat sur le rendement des cellules à contact arrière inter digité.

Nous constatons sur cette figure, que le rapport entre la longueur de diffusion et l'épaisseur du substrat est un paramètre primordial de conception des cellules solaires à contacts arrière. Ce concept, nécessite une grande longueur de diffusion des porteurs. En effet, les porteurs photogénérés doivent traverser l'épaisseur du substrat pour atteindre la jonction sur la face arrière. Ces résultats montrent aussi, que les performances de la cellule à contacts arrière sont supérieures à celles de la structure conventionnelle dès que le rapport L_d/W est supérieur à 2. Cette étude montre que la structure à contacts arrière nécessite l'utilisation d'un substrat de bonne qualité électronique.

L'écart entre la passivation par une simple couche SiN et une double couche SiN/SiO₂ est remarquable. Le résultat s'explique par le rôle de chacune de ses couches. En effet, la réduction de phénomènes de recombinaison au niveau de la face avant se fait en neutralisant les liaisons pendantes à la surface (Si-Si, Si-N, Si-H) du silicium. Le SiN contient une forte quantité de l'hydrogène, sous forme de Si-H et N-H. La présence de cet élément semble intéressante pour obtenir une faible densité d'états d'interface [16]. L'oxyde de silicium améliore cette passivation par effet de champ, et cela par sa forte concentration en charge fixes.

IV-4-2. L'influence de l'épaisseur du substrat

Sur la figure (IV-9), nous présentons une étude comparative des performances au niveau du rendement entre une cellule conventionnelle, une cellule à contact arrière avec une simple couche anti reflet et une cellule à contact arrière avec une double couche antireflet en fonction de l'épaisseur du substrat. Nous considérons deux épaisseurs du substrat $W=120\mu\text{m}$ et $W=200\mu\text{m}$.

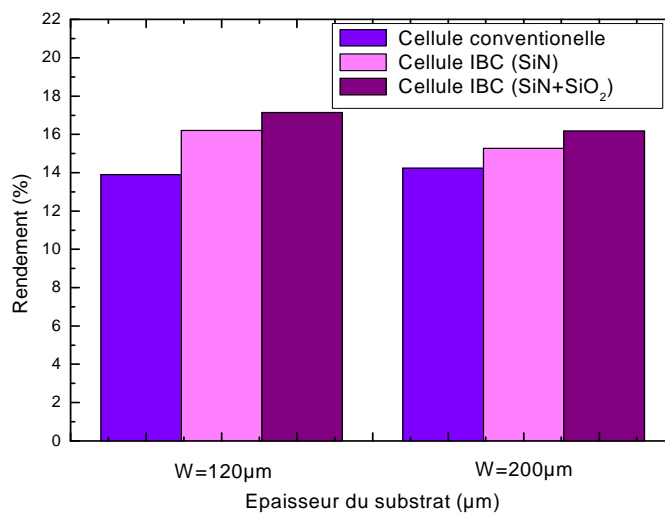


Figure IV-9 : Comparaison des performances au niveau du rendement entre une cellule conventionnelle, une cellule à contact arrière avec une simple couche anti reflet et (SiN) et une cellule à contact arrière avec une double couche antireflet (SiN+SiO₂) en fonction de l'épaisseur du substrat. $L_d=400\mu\text{m}$

A partir de la figure (VI-9), on obtient un gain proche de $\sim 1\%$ du rendement de conversion pour une épaisseur du substrat de $120\mu\text{m}$ avec les cellules à contacts arrière (La cellule avec une simple couche antireflet : $\eta=16,19\%$ pour $W=120\mu\text{m}$ et $\eta= 15,26\%$ pour $W=200\mu\text{m}$. La cellule avec une double couche antireflet : $\eta=17,13\%$ pour $W=120\mu\text{m}$ et $\eta= 16,16\%$ pour $W=200\mu\text{m}$). Cette différence n'est pas observée sur les performances du rendement de la cellule conventionnelle. L'amélioration du rendement de conversion des cellules à contacts arrière pour une épaisseur du substrat de $120\mu\text{m}$ montre que la structure à contact arrière inter digité nécessite l'utilisation d'un substrat de bonne qualité électronique. Contrairement à cette structure, la cellule conventionnelle peut être fabriquée sur du silicium multicristallin.

IV-4-3. L'influence du dopage

Nous montrons sur la figure (IV-10) l'influence du dopage du substrat en fonction du rendement de conversion. Nous examinons dans cette figure une étude comparative des performances de l'efficacité entre une cellule conventionnelle, une cellule à contact arrière avec une simple couche anti reflet et (SiN) et une cellule à contact arrière avec une double couche antireflet (SiN+SiO₂). Nous fixons dans les trois types de cellules, le dopage de l'émetteur et du BSF à $N_D^+ = 2.10^{21} \text{ cm}^{-3}$ et $N_A^+ = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ respectivement.

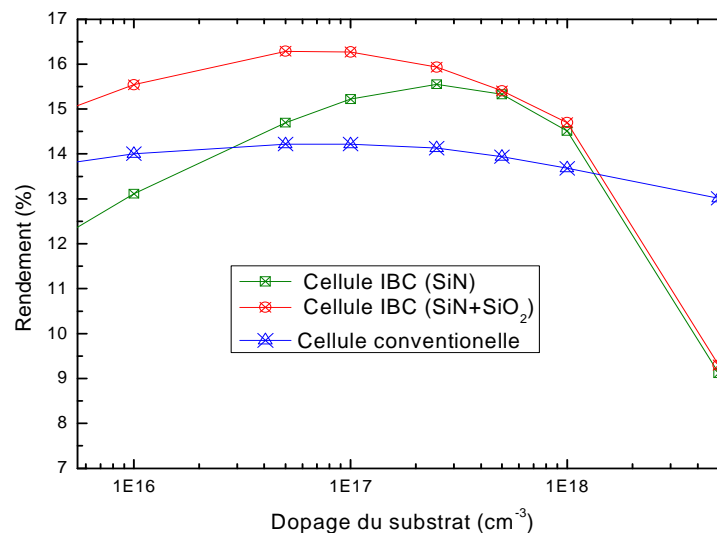


Figure IV-10 : L'évolution du rendement de conversion en fonction du dopage pour une cellule conventionnelle, une cellule à contact arrière avec une simple couche anti reflet et (SiN) et une cellule à contact arrière avec une double couche antireflet (SiN+SiO₂). $N_n^+ = 2 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, $N_p^+ = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $L_d = 400 \mu\text{m}$

On remarque dans cet ensemble de courbes que le meilleur rendement de conversion fourni pour les différentes valeurs de dopage du substrat est obtenu avec un dopage de 10^{17} cm^{-3} (14,22% pour la cellule conventionnelle, 15,21% pour la cellule à contact arrière avec une simple couche anti reflet et 16,26% la cellule à contact arrière avec une double couche anti reflet).

Nous avons montré dans le chapitre III que si le substrat est fortement dopé, le taux de recombinaison augmente et la durée de vie des porteurs et la mobilité se dégradent. Ceci entraîne une décroissance du rendement dans le cas de substrat fortement dopé. Si les conditions de collecte des porteurs sont insuffisantes (le substrat est faiblement dopé), on obtient un faible rendement pour les trois types de cellules.

IV-5. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons détaillé la sérigraphie et les avantages de cette technologie. Ensuite, nous avons abordé le procédé technologique des cellules à contact arrière inter digités. Pour cela, nous avons testé deux procédés technologiques de réalisation de ce type de structure : par diffusion sélective et par gravure. Nous avons remarqué que les simulations des deux procédés sont presque similaires. Nous avons montré que le procédé technologique de réalisation des cellules solaires à contacts arrières par diffusion sélective est moins encourageant que le procédé par gravure.

Dans la deuxième partie, nous avons réalisé une étude de simulation comparative entre une cellule conventionnelle, une cellule à contact arrière avec une simple couche anti reflet et (SiN) et une cellule à contact arrière avec une double couche antireflet (SiN+SiO₂). Contrairement à la structure à contact arrière, les performances de la cellule conventionnelle sont moins dépendantes de la qualité du silicium du substrat.

IV-6. Références bibliographiques

- [1] OLEKSIY NICHIPORUK « *Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités* ». Thèse de doctorat. INSA de Lyon. 2005.
- [2] ABDELLATIF ZERGA « *Caractérisation, Modélisation et Simulation Numérique des Cellules Photovoltaïques à base de Silicium Polycristallin en Couche Mince Déposée par RT-CVD* » Thèse de l'Université de Tlemcen, 2005.
- [3] BEATRICE RIVIERE « *Optimisation du procédé de sérigraphie pour la réalisation de capteurs de gaz en couche épaisse. Etude de la compatibilité avec la technologie microélectronique* » thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2004.
- [4] Marc MONNERAYE « Les encres sérigraphiables en microélectronique hybrides » Acta Electronica 21, 4, 1978 p263-281.
- [5] BRUNO THUILLIER « *Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisés à partir d'encres métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multicristallin* ». Thèse de doctorat. INSA de Lyon, 2001.
- [6] ANTONIO LUQUE, STEVEN HEGEDUS « *Handbook of photovoltaic science and engineering* » ; WILEY; 2003.
- [7] E.V.KERSCHVER, G.BEAUCARNE, « *Back contact solar cells* » a Review. Prog. Photovolt.Res.Appl., Vol.14, 2006, pp. 107-123
- [8] R.A.SINTON, R.M.SWANSON « *Simplified Backside Contact Solar Cells* » IEEE Trans. Electron .Dev., Vol.37, pp. 348-352 (1990)
- [9] J.WMULLER, A.MERKLE, R.HEZEL « *Self-aligning, industrially feasible back contacted silicon solar cells* » PVSEC 3rd, Vol.2, 2003, pp.1403-1406
- [10] P.ENGELHAET, N.P.HARDER, R.GRISCHKE « *Laser structuring for back junction silicon solar cells* » Prog. Photvolt : Res.Appl, Vol.15, 2007, pp.237-243
- [11] P.PAPET « *Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats mince en silicium cristallin* » Thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007
- [12] H.HAVERKAMPS, M.MCCANN, F.HUSTER, P.FATH « *Screen printed low-cost IBC solar cells-preparatory investigations* » Proceeding of 20th European PV Solar Energy conference
- [13] P.HACKE, J.M.GEE, M.W.SUMNER, J.SALAMI, C.HONSBURG « *Application of a boron source diffusion barrier for the fabrication of back contact silicon solar cells* » Proceeding of the 19th European PV Solar Energy Conference, June 2004, Paris.

[14] J.RENTESH, D.M.HULJIC, S.REBER, R.LÜDERMANN «*Proceeding in screen printed front side metallization schemes for c-Si TF solar cells*» *Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, Louisiana, May 2002.*

[15] S.SCHAEFER, H.LAUTENSCHLAGER, M.JUCH, O.SINIAGUINE, R.LÜDERMANN “ *An overview of plasma sources suitable for dry etching of solar cells*”, *Proceedings of the 28th IEEE PV Specialists Conference, Anchorage, September 2000.*

[16] F.DUERINCKX, J.SZULFCIK “ *Defect passivation of industrial multicrystalline solar cells based onPECVD silicon nitride*”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 72, (2002), pp.231-246

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Le coût élevé de la production industrielle photovoltaïque reste une question majeure. Afin de réduire le coût de production, il est essentiel de trouver un équilibre entre une technologie efficace et un prix raisonnable, tout en contrôlant l'impact environnemental du procédé de fabrication. Parmi les différentes cellules solaires destinées à améliorer l'efficacité, sont les cellules à contacts arrière inter digités. Par rapport aux cellules conventionnelles ayant les contacts sur les deux faces, ces cellules présentent les avantages suivants : pas de taux d'ombrage dû aux métallisations sur la face avant ; l'émetteur placé sur la face arrière entraîne moins de recombinaisons que lorsqu'il est situé sur la face avant, ce qui entraîne une tension de circuit ouvert plus grande ; l'interconnexion des cellules dans le module est facilitée.

Ce travail porte sur la modélisation des structures photovoltaïques à contacts arrières inter digités. L'objectif principal de cette thèse est non seulement l'étude de la modélisation et l'optimisation des structures à contacts arrières inter digités mais aussi la mise au point d'un procédé technologique directement transférable à l'industrie.

Après une introduction présentant l'évolution de la production mondiale de l'énergie électrique, ainsi que l'intérêt potentiel des énergies renouvelables, nous avons présenté dans un premier chapitre les bases indispensables à la compréhension du sujet. En outre nous avons abordé les notions fondamentales concernant le principe de l'effet photovoltaïque et la présentation d'une source d'énergie durable : *le soleil*. Ensuite nous avons présenté les paramètres essentiels qui permettent de calculer le rendement d'une cellule solaire à partir de la caractéristique courant-tension et les différents constituants de base d'une cellule photovoltaïque conventionnelle. Enfin de ce chapitre, nous avons montré l'intérêt de la technologie des cellules solaires à contacts arrières inter digités.

Ensuite, nous avons présenté dans le deuxième chapitre une étude détaillée du choix des modèles physiques utilisés dans la simulation numérique. Dans cette étude, nous avons présenté la physique des semi-conducteurs, ainsi que les modèles de mobilité des porteurs de charges et la recombinaison qui correspond aux mécanismes conduisant à la perte de paires électron-trou. A la fin de ce chapitre nous avons abordé les modèles de rétrécissement de la bande interdite.

Dans le chapitre 3, nous avons étudié l'influence des paramètres de la cellule solaire interdigitée sur leur rendement à l'aide de la simulation numérique 2D sous SILVACO/ATLAS. Le but de l'étude est d'optimiser les paramètres géométriques et de dopage du substrat en fonction des longueurs de diffusion afin d'obtenir un rendement maximal.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons démontré l'intégration de la structure à contacts arrière interdigités. Cela exprime la réalité technologique tenant compte des limites imposées par la technique de sérigraphie. A l'aide du logiciel SILVACO/ATLAS, nous avons mis en évidence que la structure à contact arrière interdigité nécessite l'utilisation d'un substrat de bonne qualité électronique. Aussi nous avons montré qu'un rapport de la longueur de diffusion sur l'épaisseur du substrat égal à 2 pourrait suffire pour atteindre des rendements de conversion satisfaisants. Une optimisation de la géométrie des régions n^+ et p^+ confirme que l'utilisation d'un rapport optimal de la largeur des régions n^+ sur la largeur des régions p^+ est égal à 10. Ainsi la distance entre ces deux régions est égale à $80\mu\text{m}$ pour qu'elle soit réalisable expérimentalement par sérigraphie.

Dans la deuxième partie, de ce chapitre nous avons optimisé la face avant de la cellule en fonction des différents paramètres de la structure afin d'améliorer le rendement de conversion. L'étude de la simulation montre qu'en absence du FSF (champ de surface avant), la vitesse de recombinaison devient extrêmement critique sur le rendement de conversion. Nous nous sommes aussi intéressés à l'influence de la face avant en utilisant une double couche antireflet qui permet d'obtenir des meilleurs résultats de rendement de conversion. Cette dernière est constituée de deux couches déposées successivement sur le substrat, une couche de SiN et une couche de SiO₂.

Dans le dernier chapitre, nous comparons deux procédés technologiques différents pour l'élaboration des cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités. Dans cette démarche, nous avons développé deux procédés technologiques : la technologie IBC par diffusion sélectif et la technologie IBC par gravure. Nous avons montré que le deuxième procédé reposant sur la séparation des différentes zones par une gravure plasma SF₆, permet de limiter le nombre d'alignements. Par la suite, nous avons achevé notre travail par une étude comparative entre une cellule conventionnelle, une cellule à contact arrière avec une simple couche anti reflet (SiN) et une cellule à contact arrière avec une double couche antireflet (SiN+SiO₂).

En résumé, dans la perspective d'une meilleure efficacité des cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, certains critères doivent être établis :

- Réaliser des structures photovoltaïques inter digités en rajoutant la texturisation de la face avant.
- Le développement d'un procédé de fabrication des cellules à contacts arrière sur des substrats à base de silicium de type métallurgique en incorporant l'effet getter.
- La détermination de l'influence de la résistivité du substrat sur le rendement de conversion de la cellule.
- Pour améliorer l'efficacité de la cellule, il serait aussi judicieux d'utiliser une double couche anti reflet en face avant poursuivie à surfaces texturées.

Résumé

L'électricité photovoltaïque est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules photovoltaïques. L'objectif de cette thèse est de développer des cellules photovoltaïques à contacts arrières inter digités à base de silicium cristallin.

Dans une première partie de ce travail nous étudions le fonctionnement des cellules photovoltaïques à contacts arrières inter digités par la simulation numérique à deux dimensions effectuées sous SILVACO/ATLAS. Nous définissons une cellule de référence avec un ensemble de paramètres physiques et technologiques, afin d'analyser leurs influences sur le rendement de conversion. Ainsi, plusieurs paramètres sont retenus : l'épaisseur du substrat, le dopage des différentes régions, le dimensionnement des régions n^+ et p^+ de la cellule, l'espacement entre les deux régions, la longueur de diffusion (la durée de vie des porteurs minoritaires), etc... Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence que la structure à contact arrière nécessite l'utilisation d'un substrat de bonne qualité électronique. Aussi, l'optimisation de la géométrie des régions n^+ (émetteur) et p^+ (BSF) a confirmé que l'utilisation d'un rapport optimal de la largeur des régions n^+ sur la largeur des régions p^+ sera égal à 10 pour atteindre des rendements de conversion satisfaisants. La simulation numérique a donné un rendement de 16.21%, en utilisant des paramètres raisonnables tenant compte des limites géométriques imposées par la technologie conventionnelle.

Dans une seconde partie nous optimisons la face avant de la structure à contacts arrières inter digités en utilisant une double couche antireflet. Cette dernière est constituée de deux couches déposées successivement sur le substrat, (SiN et SiO_2) ; ceci permet d'améliorer la passivation et la réflectivité de la face avant en diminuant la vitesse de recombinaison.

Mots clés : silicium cristallin - contacts arrière inter digités – cellules solaires - simulation numérique 2D, sérigraphie - Couche antireflet – Modélisation.

Abstract

Photovoltaic electricity is obtained by direct transformation of the sunlight into electricity by means of photovoltaic cells. The objective of this thesis is to develop interdigitated rear contact silicon solar cells.

On a first step, we investigate the optimal design of interdigitated rear contact silicon solar cells by using a two dimensions numerical simulation based on SILVACO/ATLAS software environment. It was possible to define the most relevant physical and technological parameters for the conversion efficiency. Such as substrate thickness, doping levels of different regions, width and depth of n^+ and p^+ regions, space inter-regions, diffusion length (minority carrier lifetime) etc... The obtained results show that this structure requires a high quality silicon substrate. Optimization of the geometry of the n^+ (emitter) and p^+ (back surface field) regions confirmed that the ratio of the widths of n^+ and p^+ regions should not be less than 10 to reach a high conversion efficiency. This important result allowed us to obtain 16.21% efficiency by using a photovoltaic structure compatible with conventional technologies.

On a second step part we optimize the front face for interdigitated rear contact solar cells using a double anti-reflective coating. The latter consists of two layers deposited successively on the substrate (SiN and SiO_2); this allows improve the passivation and the reflectivity of the front face by decreasing the recombination velocity.

Keywords: silicon crystalline – Interdigitated rear contact – solar cells – 2D numerical simulation – Screen printing – anti-reflective coating – Modelling.

ملخص

يتم إنتاج الكهرباء الفوتوفولطية بواسطة التحويل المباشر لضوء الشمس إلى الكهرباء باستخدام الخلايا الفوتوفولطية. الهدف من هذه الأطروحة هو تطوير الخلايا الشمسية ذات الاتصال الخلفي (inter digités) مكونة على أساس سيليسيوم.

في الجزء الأول من هذا الأطروحة نقوم بدراسة الخلايا الفوتوفولطية ذات الإتصال الخلفي (inter digités) عن طريق محاكاة رقمية ثنائية الأبعاد المنجزة بواسطة /SILVACO. ATLAS نحدد خلية مرجع مع مجموعة من الضوابط الفيزيائية والتكنولوجية من أجل تحليل تأثيرها على مردودية التحويل. وعلى هذا السبيل، عدة معايير تؤخذ بعين الإعتبار: سمك طبقة السيليسيوم، منشطات مختلف المناطق، وحجم مناطق n^+ و p^+ للخلية، تباعد بين المنطقتين، وطول الإنتشار (la durée de vie des porteurs minoritaires) إلخ...، النتائج المتحصل عليها سمحت إثبات أن هيكل ذو الاتصال الخلفي يتطلب استخدام طبقة من السيليسيوم ذات جودة إلكترونية عالية. أيضا، تحسين هندسة المناطق n^+ (émetteur) و p^+ (BSF) أكد أن استخدام نسبة الأمتل لعرض المناطق n^+ على عرض المناطق p^+ يكون يساوي 10 لتحقيق مردودية التحويل مرضية. المحاكاة الرقمية سمحت الحصول على مردودية 17.21%، وذلك باستخدام معايير معقولة مع مراعاة الحدود الهندسية التي تفرضها التكنولوجيا التقليدية.

في الجزء الثاني نقوم بتحسين الوجه الأمامي للهيكل ذو الإتصال الخلفي (inter digités) باستخدام طبقة مزدوجة مضادة للإنعكاس. هذه الأخيرة تتألف من طبقتين أودعت على التوالي فوق طبقة سيليسيوم، (SiO_2 و SiN)، وهذا يسمح بتحسين انعكاسية الوجه الأمامي بتخفيض سرعة إعادة التركيب.

الكلمات المفتاحية: سيليسيوم - الإتصال الخلفي (inter digités) - الخلايا الشمسية - محاكاة رقمية ثنائية الأبعاد - الشاشة الحرارية - طبقة مزدوجة مضادة للإنعكاس - النمذجة.