

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abou-Bakr Blekaid Tlemcen
Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique et Électronique



MEMOIRE

Pour obtenir

LE DIPLOME DE MAGISTER

En Nano Physique & Nano Technologie

Présenté par

MOHAMMEDI Mohammed

THEME

**ETUDE ET SIMULATION DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES
A CONTACTS ARRIERES INTERDIGITÉS
SOUS ENVIRONNEMENT SILVACO**

Soutenu le2012

Devant la commission d'examen

Président :	Mr. N.E. CHABANE SARI	Professeur	UABTlemcen
Examineurs :	Mr. K. GHAFfour	Professeur	UABTlemcen
	Mr. A. HAMDOUNE	Maître de Conférences A	UABTlemcen
Encadreur :	Mr. A. BENMANSOUR	Maître de Conférences A	UABTlemcen

Je dédie se modeste travail à,

*Mes chers parents,
Ma chère épouse,
Mes chères sœurs,
Mon cher frère,
Tous mes amis.*

Remerciements

J'adresse mes sincères remerciements à mon encadreur Dr. BENMANSOUR Abdelhalim pour le sujet passionnant et d'actualité qu'il m'a proposé, pour tous les conseils qu'il m'a prodigué et pour son assistance continue et ces encouragements.

Je tiens à remercier le Professeur CHABANE SARI Nasr-Eddine d'avoir accepté de présider le jury d'examen de ma soutenance.

Mes remerciements vont aussi au Professeur GHAFFOUR Kheir-Eddine et au Dr. HAMDOUNE Abdelkader d'avoir bien voulu examiner ce modeste travail.

J'adresse également mes remerciements à monsieur Ziani zaki pour son aide précieuse pour l'exploitation du logiciel Silvaco.

Une pensée pour tous mes camarades de promotion du magister nano technologie pour les bons moments passés ensemble lors de notre année théorique et le long de notre préparation du mémoire.

Enfin, je tiens à remercier aussi les enseignants/chercheurs, les doctorants, les magistrants et les ingénieurs de l'unité de recherche URMER de l'Université de Tlemcen.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	09
Chapitre I : présentation des cellules photovoltaïques conventionnelles...	13
Introduction.....	14
I. Nature du rayonnement solaire	14
I.1-Spectre solaire.....	14
I.2-Dualité de la lumière.....	15
I.3-Effet photoélectrique et production d'énergie.....	17
I.3.1-L'effet photoélectrique.....	17
I.3.2-La diode p/n: base du dispositif photovoltaïque.....	18
I.3.3-Production d'énergie par un dispositif photovoltaïque.....	21
I.4-Limites intrinsèques à la conversion photovoltaïque.....	23
I.4.1-Absorption du rayonnement.....	23
I.4.2- Recombinaisons intrinsèques (radiatives et Auger).....	24
I.4.3-Facteur de forme.....	26
I.4.4-Rendement maximal théorique d'une cellule c-si.....	26
I.5-Limites technologiques à la conversion photovoltaïque.....	27
I.5.1-Pertes optiques et résistives.....	27
I.5.2-Recombinaison volumique Shockley-Read-hall (SRH).....	28
I.5.3-Recombinaisons surfaciques et au contact.....	29
II- Différent types des cellules conventionnelles.....	32
II.1-La cellule photovoltaïque standard en silicium cristallin.....	32
II.1.1-Architecture de la cellule.....	32
II.1.2-Couche antireflet et texturation.....	33
II.1.3-Champ de surface arrière.....	35
II.2-La cellule standard optimisée: structure perl.....	36
II.3-Cellule standard à émetteur inversé.....	38
Conclusion.....	39
Chapitre II : la cellule photovoltaïque interdigitée à contact arrière	40
Introduction.....	41
I- Description de la cellule interdigitée à contact arrière.....	43
I.1-Structure de la cellule.....	43
I.2-Description de la cellule.....	43
I.3-Différents types de passivation.....	46

I.4-Avantages et inconvénients.....	47
I.4.1 -Avantages.....	47
I.4.2-Inconvénients.....	48
II-Elaboration des cellules solaires interdigitées.....	48
II.1-Exemples des cellules interdigitées à haut rendement.....	52
Conclusion.....	53
Chapitre III : Présentation de la structure simulée et du logiciel « Silvaco ».	54
Introduction.....	55
I-Modélisation.....	56
II- Structure simulée, paramètres, maillage.....	57
II.1-Structure simulé.....	57
II.2-Paramètres de la structure simulée.....	58
II.3-Le maillage.....	59
III-Présentation du logiciel Silvaco.....	60
II.1-La VWF: (virtual wafer fab).....	60
II.2-Athéna.....	60
II.3-Atlas.....	60
Chapitre IV : résultats et interprétations.....	62
Introduction.....	63
I-Interprétation des résultats.....	64
I.1-Caractéristique (I-V) de la structure non texturisée.....	64
I.2-Variation du dopage du substrat.....	65
I.3-Variation du dopage de l'émetteur.....	67
I.4-Variation de l'épaisseur de l'émetteur.....	68
I.5-Variation du dopage du BSF.....	69
I.6-Variation de l'épaisseur du BSF.....	70
Conclusion.....	71
Conclusion générale et perspectives.....	73
Annexe.....	76
I- présentation du logiciel « Silvaco ».....	77
I.1-La VWF (virtual wafer fab).....	77
I.2-Athéna.....	77
I.3 -Atlas.....	77
I.4-Deck build menu de commande.....	79
II-liste des symboles.....	89

Liste des abréviations

Abréviation	Nomination	Unité
I _{cc}	Courant de court circuit	Ampère
V _{co}	Tension du circuit ouvert	Volt
FF	Facteur de forme	%
η	rendement	%
IBC	Interdigitated back contact	-
RCC	Rear Contact Cell	-
CAR	Couche Anti Reflet	-
BSF	Back surface Field	-
FSF	Frontal Surface Field	-
P	La densité de puissance	Watt/m ²
E _{ph}	Energie des photons	Electron Volt
α	Coefficient d'absorption	m ⁻¹
B _v	Bande de valence	-
B _c	Bande de conduction	-
E _F	Energie de Fermi	Electron Volt
e	électron	-
h	Trous (hole)	-
c-Si	Silicium cristallin	-
a-Si	Silicium amorphe	-
E _G	Energie de gap	Electron Volt
V _D	Barrière de tension	Volt
L _D	Longueur de diffusion des porteurs de charge	m
τ	Durée de vie des porteurs	s

U	Taux de recombinaison	-
SRH	Shockley-Read-Hall	-
N_c	Densité d'état effective de la bande de conduction	-
N_v	Densité d'état effective de la bande de valence	-
PERL	Passivated Emitter Rear Locally diffused	-
FZ	Fusion de zone	-
CZ	La methode de Chocralscki	-

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
II-1	Paramètres des cellules interdites à haut rendement	45
III-1	paramètres de la cellule simulée	57
III-2	paramètres de maillage	58
IV-1	<i>Paramètres variables pendant la simulation</i>	61
IV-2	<i>Grandeurs physiques simulées et celles de la littérature.</i>	63

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
Figure : I-1	Spectre représentant l'irradiance solaire sur Terre (AM1.5G)	15
Figure : I-2	Transitions électroniques pour un gap direct et un gap indirect	18
Figure : I-3	Caractéristiques I-V et P-V sous éclairement	22
Figure : I-4	Influence des différentes pertes dues aux mécanismes d'absorption dans le c-Si. (1) Thermalisation des photons d'énergie supérieure à 1.12 eV; (2) Photons d'énergie inférieure à 1.12 eV non absorbés	24
Figure : I-5	Schéma de bandes à l'interface a-Si:H (n) / c-Si (p). Les niveaux d'énergie dus aux défauts sont indiqués par des traits, et les processus de recombinaisons par des flèches. E_C , E_V , E_F et e_ϕ représentent respectivement l'énergie de la bande de conduction, de celle de valence, l'énergie du niveau de Fermi et la courbure de bande dans le c-Si	31
Figure :I-6	Structure standard. Gauche: Photographie de la face avant (Wafer pseudocarré 150 cm ²); Droite: Schéma vue de coupe	32
Figure : I-7	Schéma de principe des réflexions lumineuses sur une surface texturée. R est le coefficient de réflexion, T le coefficient de transmission	37
Figure : I-8	Schéma de la structure PERL	38
Figure : I-9	Cellule photovoltaïque à émetteur inversé sur c-Si de type n	32
Figure :II-1	<i>Structure RCC(A300) développée par Sunpower Corp¹</i>	35
Figure :II-2	<i>Cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités</i>	36
Figure :II-3	vertical d'une Cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités	37
Figure :II-4	Structure IBC. Gauche : Vue de la face avant (pas de métallisations); Droite : Schéma d'une coupe de la structure	37
Figure :II-5	: Cellules photovoltaïque interdigitée avec différents types de passivation face avant : par SiO ₂ (A), par champ avant (B) et par	39

	jonction flottante (C).	
Figure :III-1	Partie élémentaire de la cellule e interdigitée simulée	56
Figure:III-2	Structure et paramètres de la cellule simulée	57
Figure:III-3	La Virtual Wafer Fabrication	59
Figure :III-4	: les entrés et les sorties de Atlas	60
Figure :IV-1	Structure simulée sous SILVACO-Atlas	61
Figure: IV -2	caractéristique (I-V) de la cellule photovoltaïque non texturisée simulée	62
Figure : IV - 3	Evolution du rendement de la cellule en fonction du dopage d'un substrat de qualité n-Si	63
Figure: IV -4	: Evolution du courant de court-circuit de la cellule en fonction du dopage d'un substrat de qualité n-Si.	64
Figure: IV -5	Evolution de la tension du circuit ouvert de la cellule en fonction du dopage d'un	64
Figure : IV-6	Evolution du rendement de la cellule en fonction du dopage de l'émetteur pour un	65
Figure : IV-7	Evolution du rendement de la cellule en fonction de l'épaisseur de l'émetteur pour les	66
Figure :IV-8	Evolution du rendement, de la cellule en fonction du dopage du BSF pour les substrats n-S	67
Figure :IV-9	du rendement en fonction de la profondeur du BSF pour un Substrat de qualité n-Si.	68

INTRODUCTION GENERALE

Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, entre 1973 et 2007, la consommation énergétique mondiale a quasiment doublé, en passant de 5.4×10^4 à 9.6×10^4 TWh par an. Plus de 15% de cette énergie est aujourd'hui consommé sous forme d'électricité, soit près de 1.6×10^4 TWh par an ^[IEA, 09]. Au niveau mondial, plus de 80% de l'électricité est produite à partir de combustibles fossiles (67%) et fissiles (15%) non renouvelables. A ce rythme de consommation, les réserves des combustibles fossiles seront épuisées dans une centaine d'années ^[Jancovici, 08].

Au niveau environnemental, la production d'électricité mondiale est responsable de l'émission de plus de 10^{10} tonnes de CO_2 par an ^[Carma, 08]. Or le CO_2 est un gaz à effet de serre (GES) qui contribue fortement au réchauffement climatique mondial. L'amointrissement des ressources fossiles non renouvelables, ainsi que l'augmentation de la température du globe, présentent de nombreux risques de tensions au niveau mondial. Quant à l'énergie fissile depuis les catastrophes de Chernobille en 1986 et de Fukujama en 2011 la communauté mondiale s'interroge sur la continuation, l'arrêt progressif ou définitif de cette forme d'énergie. Afin de faire face à tous ces problèmes, il est nécessaire d'agir sur plusieurs facteurs résumés par les points suivants :

- Favoriser l'économie énergétique
- Améliorer l'efficacité énergétique
- Développer les sources d'énergies renouvelables.
- Diversifier les sources d'énergie.
- Remplacer Définitivement les énergies fissiles porteuses de gros risques.
- Etc.

Contrairement aux énergies fossiles et fissiles basées sur l'exploitation d'un stock de gisement de pétrole, gaz, charbon ou uranium, les énergies renouvelables (ENR) sont issues d'un flux naturel inépuisable (soleil, vent, eau).

Parmi les différentes les énergies renouvelables, l'électricité photovoltaïque (PV) ne représente actuellement qu'un petit pourcentage de la production mondiale d'électricité. Son potentiel est pourtant quasiment infini au regard de l'énergie solaire produite annuellement (7.5×10^8 TWh ^[Lelièvre, 07]).

A cet effet, le grand défi des grandes puissances mondiales et de tous les chercheurs de la planète est de rendre l'énergie photovoltaïque exploitable avec un grand rendement et surtout diminuer les dimensions des panneaux solaires donc des cellules photovoltaïques.

La technologie dominante actuellement dans le domaine photovoltaïque est celle des cellules à base de silicium cristallin (c-Si). Elle existe depuis environ 50 ans et constitue actuellement plus de 80% des ventes au niveau mondial [EPIA, 08]. Les cellules c-Si permettent d'obtenir les meilleures performances au niveau du module avec 13 à 15% de rendement en moyenne.

De nombreuses recherches ont été menées depuis les années 1980 pour améliorer le rendement des cellules photovoltaïques c-Si et pousser leur limite industrielle vers celle théorique de 29% [Kerr, 02b]. Il a été démontré que trois structures de cellules photovoltaïques sur du c-Si monocristallin de bonne qualité ont le potentiel pour atteindre de très hauts rendements :

- **La structure PERL** (Passivated Emitter Rear Locally Diffused) développée par l'UNSW (University of New South Wales, Australie) sur le modèle de la cellule standard à base de c-Si de type p. Un rendement expérimental de 24.7% sur une cellule de 4 cm² a pu être atteint en laboratoire en 1999 par Zaho et al. [Zhao, 99] puis de 25.0% avec la nouvelle norme sur l'éclairement standard par l'équipe de Green dix ans après [Green, 09]). Cependant, la complexité du procédé de fabrication, nécessitant plusieurs étapes d'alignement par photolithographie empêche son industrialisation. L'entreprise Suntech travaille en collaboration avec l'UNSW afin d'industrialiser des cellules de type PERL. Ces cellules, nommées PLUTO, atteignent des rendements proches de 19% [Shi, 09] sur leur chaîne de production.

- **La structure à contacts interdigités en face arrière IBC** (Interdigitated Back Contacts) a d'abord été développée à l'échelle du laboratoire et sur surface réduite par l'Université de Stanford [Swanson, 85]. Cette structure qui est l'objet de notre travail utilise la technologie des contacts localisés (Point-Contact) et nécessite plusieurs étapes d'alignements par photolithographie comme la technologie PERL. SunPower Corp. a pu diminuer le nombre d'alignements en simplifiant la structure puis

industrialiser sa production sur c-Si de type n sans étape de photolithographie ^[Mulligan, 04]. Des cellules de 148 cm² avec un rendement moyen de 22.4% (max 23.4%) sont fabriquées sur leur chaîne de production industrielle ^[DeCeuster, 07]. Ces excellents résultats ont été obtenus grâce aux très faibles pertes optiques et résistives de cette structure. Ils sont toutefois encore limités par des recombinaisons aux contacts et dans les zones dopées thermiquement ^[Swanson, 05].

- **Les cellules (Si-HJ) :** Un troisième type de cellules à haut rendement utilise l'hétérojonction silicium (Si-HJ) entre le silicium amorphe hydrogéné a-Si:H et le silicium cristallin c-Si.

Pour prédire les paramètres physiques et géométriques des matériaux et systèmes électroniques et optoélectroniques de plus en plus les chercheurs font appel à la simulation. Ceci leur permettra de fabriquer moins de prototypes avec la prédiction de certains paramètres qui seront testés et améliorés grâce à la caractérisation (optique et électrique).

Dans notre travail nous allons tout d'abord procéder, dans le premier chapitre, l'état de l'art à ce jour des cellules photovoltaïques conventionnelles.

Dans le deuxième chapitre nous décrirons, dans un premier temps, la cellule photovoltaïque interdigitée à contact arrière. C'est la cellule à étudier et à simuler dans notre travail. Dans un deuxième temps nous énoncerons ces propriétés physiques et les verrous auxquels sont affrontés les chercheurs et les industriels pour la conception et la réalisation de ces cellules.

Le troisième chapitre est consacré à la description de la cellule photovoltaïque interdigitée à contact arrière référence simulée et à la présentation du logiciel de simulation Atlas Silvaco utilisé dans notre travail.

Dans le quatrième chapitre nous présenterons les résultats de la simulation et leurs interprétations.

Nous terminerons le manuscrit avec une conclusion générale sur l'objectivité de la simulation et des perspectives.

Chapitre I :

Présentation des cellules photovoltaïques conventionnelles

Introduction

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous abordons quelques notions sur la source d'énergie solaire et son application dans le domaine photovoltaïque. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs études théoriques, leurs caractéristiques principales et leurs limites y sont énoncés.

Nous décrirons aussi les principaux types des cellules réalisées sur le silicium cristallin.

I. Nature du rayonnement solaire

I.1 Spectre solaire

Le soleil est constitué principalement de gaz, dont la fusion continue produit une quantité d'énergie phénoménale. La fusion des atomes d'hydrogène en atomes d'hélium permet en effet d'atteindre des températures de l'ordre de 20 millions de degrés Kelvin ^[Honsberg, 09]. Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes majoritairement comprises entre 0.2 μ m et 3 μ m. Hors atmosphère le rayonnement émis par le soleil (AM0) est constitué de :

L'ultra violet ($0.1 < \lambda < 0,40\mu\text{m}$), 09%.

Le visible ($0.4 < \lambda < 0,75\mu\text{m}$), 43%.

L'infrarouges ($0.75 < \lambda < 5,0\mu\text{m}$), 48%.

On représente le rayonnement par un spectre donnant l'irradiance en fonction de la longueur d'onde (Figure I-1). Pour le soleil, ce spectre est comparable à celui d'un corps noir à une température d'environ 5800 K.

À la surface de la Terre, le spectre solaire n'est plus le même que dans l'espace, car il est pondéré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère (O_3 , CO_2 , H_2O , ...).

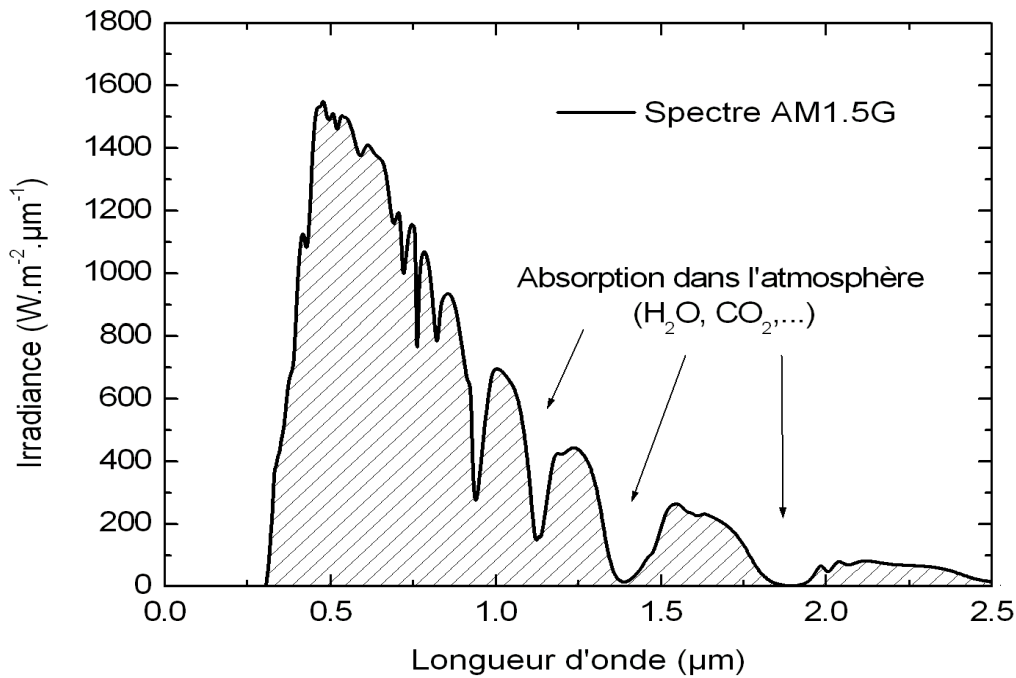


Figure I-1 : Spectre représentant l'irradiance solaire sur Terre (AM1.5G) [Desrués T., 09]

Les conditions climatiques ainsi que la présence de particules influencent également la valeur réelle du spectre. Pour pouvoir comparer les performances des cellules solaires et qualifier les différents spectres solaires utilisés, la notion d'Air-masse (AM), ou « masse atmosphérique » a été créée. Sa valeur dépend de la pression, de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux. L'intégration de l'irradiance sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance P (en W.m^{-2}) fournie par le rayonnement. Les notations généralement utilisées sont suivantes :

AM0 : Hors atmosphère (applications spatiales). $P \approx 1.36 \text{ kW.m}^{-2}$

AM1 : Le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).

AM1.5G : Spectre standard, le soleil est à 45° . $P \approx 1 \text{ kW.m}^{-2}$

I.2 Dualité de la lumière

La lumière peut être considérée sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde λ ou sous forme de photons, corpuscules possédant une énergie E_{ph} liée à λ par la relation (I-1).

$$E_{ph} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (I - 1)$$

Avec :

h : Constante de Planck (J.s)

C : Vitesse de la lumière dans le vide ($m.s^{-1}$)

ν : Fréquence (s^{-1})

λ : Longueur d'onde (m)

La notion de dualité (onde/corpuscule) est importante pour comprendre les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau. L'absorption d'un rayonnement dans un matériau s'explique en effet simplement par l'échange d'énergie entre les atomes du matériau et les corpuscules de la lumière. Le coefficient d'absorption (en m^{-1}) dépend de la longueur d'onde des photons incidents, ainsi que du coefficient d'extinction k , selon la relation (I-2).

$$\alpha = \frac{4\pi K}{\lambda} \quad (I-2)$$

En général les faibles longueurs d'ondes (très énergétiques) sont donc plus facilement absorbées. Cependant, le coefficient d'extinction d'un matériau varie également avec la longueur d'onde, ce qui peut faire varier cette tendance.

Le phénomène d'absorption est décrit par la loi de Beer-Lambert (I-3).

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (I-3)$$

Avec:

I_0 : Intensité de la lumière incidente (W)

I : Intensité de la lumière sortante (W)

x : Longueur du trajet optique (m)

Les photons les plus énergétiques sont donc absorbés en quasi-totalité à proximité immédiate de la surface éclairée. En revanche, une partie des photons moins énergétiques peut traverser une partie du matériau, voire sa totalité, sans être absorbée.

I.3 Effet photoélectrique et production d'énergie

I.3.1 L'effet photoélectrique

Découvert par Becquerel en 1839, puis expliqué par Einstein au début du XXe siècle, l'effet photoélectrique (ou photovoltaïque) provoque, sur certains matériaux, l'émission d'une petite quantité d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Pour cela, il faut d'abord que l'énergie des photons incidents soit transmise à des porteurs de charge (électrons ou trous) dans le matériau. L'absorption des photons dans un matériau conducteur ou semi-conducteur permet en effet la libération d'une certaine quantité de porteurs libres. Ce mécanisme de photo-génération peut être représenté à l'aide des états énergétiques des bandes de valence et de conduction, séparées par un gap d'énergie interdite (E_G).

Dans les matériaux conducteurs, les charges libérées se recombinent quasi-instantanément et peuvent difficilement être collectées. L'usage de certains matériaux semi-conducteurs permet la réduction de ces recombinaisons et l'application de l'effet photovoltaïque à la production d'électricité.

Un matériau semi-conducteur se caractérise par son énergie de gap E_G entre la bande de valence (B_V) et la bande de conduction (B_C). A l'équilibre, les électrons possèdent une énergie correspondant à des états situés dans la B_V et sont dits «Liés». Un photon incident, dont l'énergie $h\nu$ est supérieure à l'énergie de gap E_G du matériau, peut permettre le passage d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction. On considère alors que l'électron ayant rejoint la bande de conduction est excité, et qu'il laisse un trou (équivalent à une charge positive) dans la bande de valence. La paire électron/trou (e/h) créée forme un exciton. Le transfert d'énergie entre le photon incident et l'électron de la B_V respecte les lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. Le vecteur d'onde k des photons a cependant une valeur beaucoup plus faible que celui des électrons. Les transitions énergétiques de ceux-ci se font alors sans changement de vecteur d'onde mais verticalement dans l'espace des k (Figure I-2).

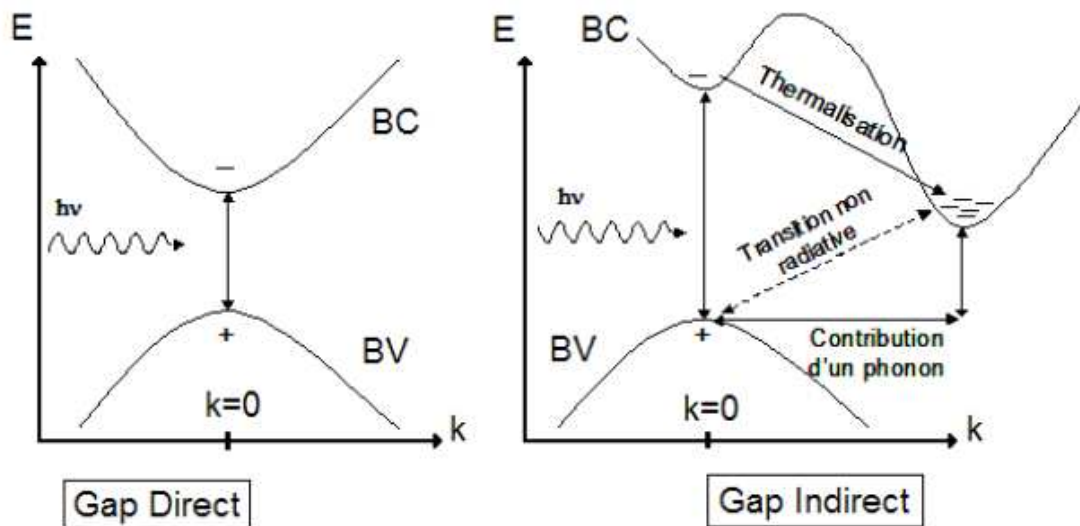


Figure I-2. Transitions électroniques pour un gap direct et un gap indirect ^[Desrués, 09].

Lorsque dans l'espace des k , le minimum de la bande de conduction correspond au maximum de la bande de valence, on parle de gap direct. Dans le cas du silicium cristallin (c- Si) les photons très énergétiques ($E \geq 1.8\text{eV}$) voient un gap direct. Pour des énergies plus faibles, le gap est indirect car les transitions radiatives entre les extrema des bandes ne peuvent se faire qu'avec la participation d'un phonon. Les phonons sont des vibrations du réseau fournissant ou absorbant la quantité de mouvement nécessaire aux déplacements de charges.

Les transitions faisant appel aux phonons (gap indirect) sont donc moins probables que dans le cas d'un gap direct. L'effet photoélectrique est donc plus ou moins important en fonction du matériau semi-conducteur utilisé. De plus, pour extraire véritablement l'énergie transmise du rayonnement à la matière, un dispositif de collecte des charges photogénérées est nécessaire.

I.3.2 La diode p-n: base du dispositif photovoltaïque

La séparation des paires $e^- h^+$ et la collecte des charges libres sont facilitées par la présence d'un champ électrique au sein du matériau. Les chercheurs des laboratoires Bell ont utilisé pour la première fois en 1954 le champ électrique d'une jonction (ou diode) $n^+ - p$ dans une cellule solaire ^[Chapin, 54]. Cette structure simple est constituée d'une base en c-Si de type p dopée n^+ localement pour former l'émetteur. La différence de concentration d'électrons entre la zone dopée n^+ et celle de type p entraîne une tension de diffusion V_D à la jonction des deux zones de conductivité

opposée. La tension de diffusion provoque un champ électrique intrinsèque à la jonction, dans une zone appelée Z_{CE} (Zone de Charge d'Espace).

À l'équilibre, cette zone désertée de porteurs libres est présente essentiellement dans la région la moins dopée. Sa largeur varie en moyenne entre 0.1 et 1 micron en fonction du profil et du niveau de dopage. On distingue alors, dans la diode p-n, deux zones : les zones neutres (émetteur et base) où il ne règne aucun champ électrique, et la Z_{CE} . À la jonction, le champ électrique intrinsèque permet l'accélération des porteurs minoritaires vers la zone où ils sont majoritaires. Ainsi, les électrons de la base de type p sont accélérés vers la zone d'émetteur dopée n^+ . Lorsque la base et l'émetteur de la diode sont réalisés dans un seul matériau (même E_G), on parle d'une homojonction p-n. La valeur de la tension de diffusion V_D peut s'exprimer en fonction des densités de dopants dans l'émetteur et la base du matériau semi-conducteur par la relation (I-4). Si les densités de dopages étaient égales aux densités d'états du matériau, la tension de diffusion de la jonction serait égale à E_G/q . Ce cas est limité par les recombinaisons de porteurs et la diminution de la valeur de (E_G) pour les matériaux très dopés (Band Gap Narrowing ou BGN) ^[Sze, 81].

$$V_D = KTLn\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = \frac{E_G}{q} + Ln\left(\frac{N_A N_D}{N_c N_v}\right) \quad (I - 4)$$

Avec :

E_G : Énergie de gap du matériau semi-conducteur (eV)

N_D : Densité d'impuretés de type donneur (cm^{-3})

N_A : Densité d'impuretés de type accepteur (cm^{-3})

N_C : Densité d'états dans la bande de conduction (cm^{-3})

N_V : Densité d'états dans la bande de valence (cm^{-3})

n_i^2 : Concentration de porteurs intrinsèques (cm^{-6})

L'équation (I-5) permet de modéliser la densité de courant fournie par une diode idéale soumise à une rampe de tension. Cette caractéristique courant-tension (I-V, ou J-V pour la densité de courant) est en effet particulièrement représentative de la

qualité du dispositif. Ce modèle utilise un facteur d'idéalité (n) ainsi qu'une densité de courant de saturation (I_0) pour décrire son fonctionnement.

$$I_{obs} = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right) \quad (I - 5)$$

Avec :

q : Charge élémentaire (C)

V : Tension aux bornes de la jonction (V)

K : Constante de Boltzmann ($J.K^{-1}$)

T : Température (K)

I_0 : Courant de saturation de la diode (A)

n : Facteur d'idéalité de la diode

La densité de courant de saturation de la diode (I_0) représente le courant de fuite franchissant la barrière V_D . Il est d'autant plus fort que les recombinaisons dans le matériau et/ou en surface sont élevées. Le courant de saturation est dû aux différents phénomènes de recombinaisons en surface et en volume du dispositif. Dans le cas où les défauts dans la base de type p dominant, son expression analytique (I-6) dépend des mécanismes de recombinaisons prépondérants.

$$I = \frac{qD_n n}{L_n} \quad (I - 6)$$

La longueur de diffusion des porteurs minoritaires L_n dans la base de type p donne une indication sur la qualité de celle-ci. Moins le matériau montre de défauts, plus la longueur de diffusion est grande, et plus le I_0 est faible. Le courant de saturation I_0 dépend également du facteur de diffusion D_n ($cm^2.s^{-1}$) et de la densité n de porteurs minoritaires dans la base.

La qualité d'un matériau peut également être exprimée par la durée de vie des porteurs minoritaires (τ en s). En effet τ et la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans le matériau sont liés par l'équation (I-7).

$$L = (D_n \tau)^{1/2} \quad (I-7)$$

Un I_0 de la diode élevé entraîne une augmentation plus rapide du courant direct avec la tension. Une limite inférieure à la valeur de I_0 ($0.27 \text{fA} \cdot \text{cm}^{-2}$) peut être calculée en considérant uniquement les recombinaisons radiatives intrinsèques au matériau. Cependant au niveau expérimental des valeurs 100 à 1000 fois supérieures sont obtenues [Swanson, 05].

I.3.3 Production d'énergie par un dispositif photovoltaïque

L'éclairement d'une diode provoque l'apparition d'un courant de photogénération dans le dispositif. Ce flux lumineux rompt l'équilibre thermodynamique en changeant les populations d'électrons et de trous. A titre d'exemple, un éclairage AM1.5 libère environ $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ porteurs de charge dans le silicium cristallin. En général l'éclairement influence peu la densité de porteurs majoritaires, dans la mesure où celle-ci est supérieure à $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ dans un semi-conducteur dopé. En revanche, la population de porteurs minoritaires augmente sensiblement avec l'éclairement, provoquant ainsi l'apparition d'un courant inverse proportionnel à l'éclairement. Une diode sous éclairage voit ainsi sa caractéristique I-V décalée par l'apparition d'une densité de courant inverse I_{ph} due aux porteurs photogénérés.

L'équation de la diode sous éclairage (I-8) montre la compétition entre I_{ph} (proportionnel à l'intensité du flux lumineux) et la densité de courant direct I_{obs} qui dépend de la tension appliquée et de la qualité du dispositif.

$$I_{\text{éclair}} = I_{\text{obs}} - I_{\text{ph}} \quad (I-8)$$

Où :

$I_{\text{éclair}}$: densité de courant d'éclairement

I_{obsc} : densité de courant d'obscurité

I_{ph} : densité de courant photogénéré

La caractéristique I-V d'une diode sous éclairement (Figure I-3) permet la détermination des paramètres suivants :

I_{cc} : Densité de courant de court-circuit

V_{co} : Tension de circuit ouvert

P_{max} : Puissance maximale débitée par la photodiode

I_{max} : Densité de courant au point de puissance maximale

V_{max} : Tension au point de puissance maximale

La puissance électrique produite par une diode sous éclairement est égale au produit de l'intensité délivrée et de la tension à ses bornes. Il faut ainsi adapter la charge aux bornes du dispositif afin de le faire fonctionner au point de puissance maximale P_{max} (V_{max} , I_{max}).

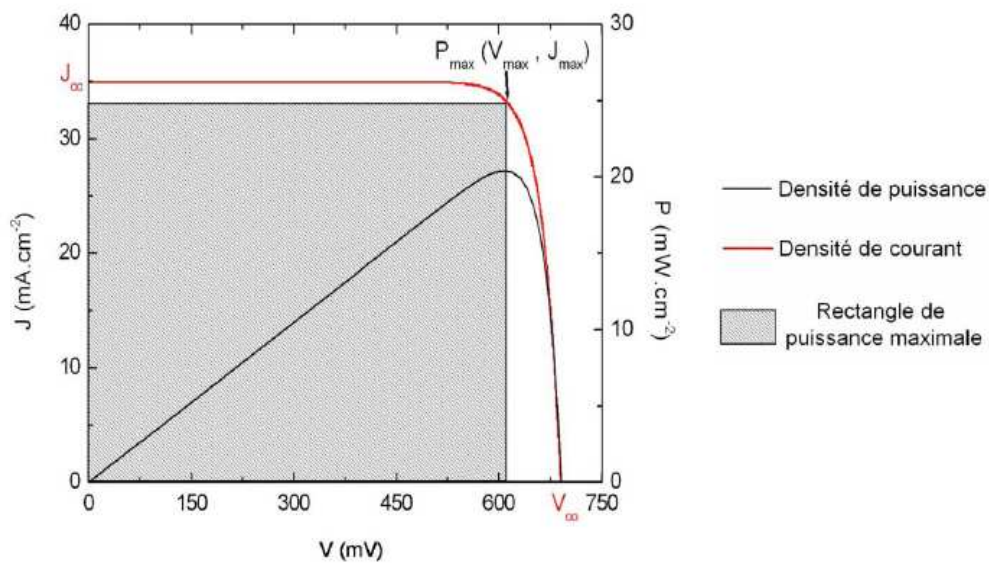


Figure I-3.

Caractéristiques I-V et P-V sous éclairement [Desrués, 09]

Le facteur de forme (FF) de la courbe I-V exprime la différence entre la puissance réelle débitée par la cellule et sa puissance idéale égale au produit $I_{\text{cc}} \times V_{\text{co}}$. Le FF est limité dans la plupart des cas par des résistances parasites et son expression est donnée par la relation (I-9).

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{co} I_{cc}} \quad (I - 9)$$

On appelle rendement de conversion η le rapport de la puissance fournie par la cellule sur la puissance incidente (l'éclairement). Il s'exprime selon l'équation (I-10) en fonction des paramètres extraits de la courbe I-V sous éclairement.

$$\mu = \frac{P_{max}}{P_{incidente}} = \frac{V_{max} I_{max}}{P_{incidente}} = \frac{V_{co} I_{cc} FF}{P_{incidente}} \quad (I - 10)$$

Les trois paramètres principaux caractérisant un dispositif photovoltaïque sont donc le courant de court-circuit, la tension à vide et le facteur de forme (I_{cc} , V_{co} et FF). La valeur de I_{cc} est influencée par la longueur de diffusion des porteurs mais également par des facteurs optiques tels que l'absorption et la réflexion du flux lumineux.

Le facteur de forme est limité dans la plupart des cas par des résistances et courts-circuits parasites. La valeur de V_{co} est liée au rapport entre les densités de courant de court-circuit et de saturation de la diode par la relation (I-11) ^[MacDonald, 01].

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} \right) \quad (I - 11)$$

I.4. Limites intrinsèques à la conversion photovoltaïque

I.4.1 Absorption du rayonnement

Le rayonnement solaire s'étend sur un large spectre de longueurs d'ondes (0.1 à 5 μ m) et une grande partie de son énergie n'est pas exploitée par une cellule c-Si à simple jonction.

L'énergie de gap E_G du c-Si (1.12eV) correspond à une longueur d'onde de 1.1 μ m. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à E_G , ils ne peuvent pas générer de porteurs libres et traversent le matériau sans être absorbés. En revanche, quand

leur énergie est supérieure à E_G , l'excès d'énergie est thermalisé et ne contribue pas à la conversion.

La Figure (I-4) montre le spectre exploité par une cellule c-Si par rapport au spectre solaire AM1.5. Avec un confinement optique idéal, la densité de courant de court-circuit maximale (I_{ccMax}) d'une cellule c-Si peut atteindre $42.5\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ sous un éclairage AM1.5 [Swanson, 05].

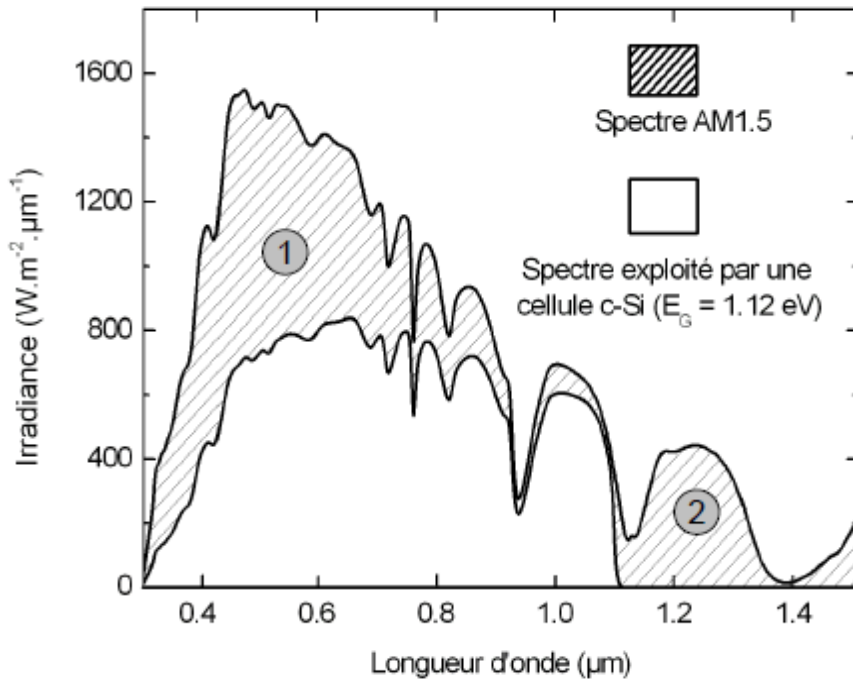


Figure I-4 : Influence des différentes pertes dues aux mécanismes d'absorption dans le c-Si. (1) Thermalisation des photons d'énergie supérieure à 1.12 eV; (2) Photons d'énergie inférieure à 1.12 eV non absorbés [Desrués, 09]

I.4.2 Recombinaisons intrinsèques (radiatives et Auger)

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est soumis à une excitation (thermique, lumineuse, etc.), son équilibre est rompu et des porteurs en excès apparaissent. Ces porteurs en excès restent libres jusqu'à ce qu'ils perdent leur énergie, c'est-à-dire qu'ils recombinent. La durée de vie des porteurs (τ en s) dépend de la densité de porteurs en excès (Δ_n en cm^{-3}) et du taux de recombinaison (U en $\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-3}$) selon l'équation (I-12).

$$\tau = \frac{\Delta_n}{U} \quad (I-12)$$

Différents phénomènes de recombinaison existent au sein d'un semi-conducteur comme le silicium cristallin. Certains, comme les phénomènes Auger et radiatifs sont intrinsèques au matériau, tandis que d'autres dépendent plus de la qualité du matériau.

Dans un semi-conducteur à gap direct le mécanisme de recombinaison radiative domine les autres phénomènes. C'est l'inverse de la création d'une paire e-h par un photon : un électron de la bande de conduction retourne dans la bande de valence en cédant de l'énergie sous forme lumineuse, en émettant un photon. L'énergie du photon émis étant égale ou proche de celle du gap, il pourra avec une faible probabilité être recyclé et créer une nouvelle paire e-h. Pour un semi-conducteur à gap direct, les recombinaisons radiatives sont importantes car elles se font sans la participation de phonons. En revanche pour un gap indirect comme le c-Si, les recombinaisons radiatives sont peu probables. Dans ce cas l'électron doit émettre simultanément un photon et un phonon pour changer d'état. Selon la relation (I-13), le taux de recombinaisons radiatif (U_{rad}) dépend d'une constante B caractéristique du matériau et sa valeur est faible pour le c-Si ($1 \times 10^{-14} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) [Schlangenotto, 74].

$$U_{rad} = B \Delta_n (N_A + \Delta_n) \quad (I - 13)$$

Le processus de recombinaison Auger (U_{Auger}) est non radiatif et implique l'interaction de trois particules. L'énergie libérée par la recombinaison d'un électron de la bande de conduction et un trou de la bande de valence est ici transférée à un autre porteur libre (électron ou trou). Ce porteur thermalisé, perd ensuite cette énergie en revenant à un état énergétique inférieur proche de la limite de bande. Ce mécanisme de recombinaison (en réalité plus complexe) est dominant à fort taux d'injection et pour de fortes densités de dopants [Dubois, 07].

Pour de faibles injections, il peut être décrit par la relation (I-14). Il dépend d'un coefficient Auger (C_A en $\text{cm}^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$) qui dépend du type de matériau [MacDonald, 01].

$$U_{Auger} = C_A \Delta_n N_A^2 \quad (I - 14)$$

La tension de circuit ouvert maximale d'un dispositif photovoltaïque est en réalité limitée par les mécanismes de recombinaison évoqués ci-dessus.

Si l'on considère que les surfaces de la cellule ne provoquent aucun phénomène de recombinaison (cas idéal), la principale limitation de la V_{co} provient du volume. La valeur maximale que l'on pourrait atteindre dépend donc de l'épaisseur de la cellule. Elle est de l'ordre de 770mV pour une cellule d'une épaisseur de $100\mu\text{m}$ [Tiedje, 84] et pourrait atteindre 800mV en réduisant l'épaisseur du substrat à $20\mu\text{m}$ [Green, 84].

I.4.3 Facteur de forme

Dans le cas idéal, la courbe I-V est rectangulaire. La puissance maximale produite par la cellule sous éclairement est alors égale au produit $I_{cc} \times V_{co}$. En réalité, les caractéristiques courant-tension suivent une forme exponentielle (équation de Boltzmann), ce qui limite la puissance maximale au produit $I_m \times V_m$. Le facteur de forme maximal théorique d'une cellule solaire en silicium cristallin à haut rendement est de 89% [Szlufcik, 97].

I.4.4 Rendement maximal théorique d'une cellule c-Si

Le rendement de conversion maximal théorique des cellules photovoltaïques peut être déterminé par une approche thermodynamique tenant compte des différentes limitations intrinsèques au dispositif. Schockley et Queisser ont ainsi calculé en 1961 le rendement maximal théorique pour une cellule à simple jonction ($E_G=1.1\text{eV}$), en considérant uniquement les recombinaisons radiatives. Sous un éclairement AM1.5, ce rendement atteint la valeur de 33% [Schockley, 61]. Tiedje et al [Tiedje, 84] ont ensuite amélioré le modèle en introduisant une connexion entre l'analyse thermodynamique et la modélisation du dispositif lui-même (Cellule en silicium cristallin).

En tenant compte de l'effet de l'épaisseur du substrat et des recombinaisons non radiatives (Auger), le rendement maximal est alors de 29.8%.

En 2002, Kerr et al ont apporté des modifications à ce calcul en améliorant la modélisation des phénomènes de recombinaisons Auger et en introduisant le recyclage des photons pour les recombinaisons radiatives. À l'aide de ces améliorations, un rendement maximal théorique de 29.05% a été calculé pour une épaisseur de substrat optimale de $90\mu\text{m}$ [Kerr, 02b].

I.5. Limites technologiques à la conversion photovoltaïque

On a vu dans la partie précédente que le rendement maximal théorique pour une cellule en silicium cristallin réalisée en laboratoire de recherche peut atteindre des valeurs supérieures à 29% mais avec des procédés très coûteux. La différence entre ce rendement et ceux obtenus industriellement est due aux pertes technologiques provenant de facteurs optiques et résistifs, mais aussi des recombinaisons volumiques et surfaciques.

I.5.1 Pertes optiques et résistives :

Les pertes optiques d'une cellule solaire provoquent une chute de la densité de courant produite par le dispositif. En effet, le courant fourni dépend directement de la quantité de lumière absorbée dans la cellule. La première source de perte optique est due aux phénomènes de réflexion du rayonnement incident sur la face avant. En effet, pour un substrat c-Si poli, plus de 30 % de la lumière est réfléchi en face avant, provoquant une chute du même ordre du courant photogénéré [Lelièvre, 07]. Dans le cas de substrats minces (inférieurs à 200 μm), une partie du rayonnement infrarouge peut traverser la base sans être absorbée. La réflectivité interne au niveau de la face arrière joue dans ce cas également un rôle particulièrement important [Kray, 08]. Une réflectivité effective de 2% en face avant alliée à une réflectivité interne de 90% en face arrière permet théoriquement d'obtenir une densité de courant de court-circuit de 41.1mA/cm⁻² [Swanson, 05]. Un autre facteur de pertes optiques est provoqué par le contact sur l'émetteur, réalisé en face avant sur la plupart des structures de cellules photovoltaïques. Ces métallisations de contact sont opaques et provoquent un ombrage du rayonnement incident, proportionnel à la surface de l'électrode.

En ce qui concerne les pertes résistives, les possibilités d'améliorations dépendent fortement de la structure de cellule utilisée. Des phénomènes de résistance série peuvent provenir de conductivités insuffisantes dans le c-Si [Granek, 07], dans les métallisations, ainsi qu'au contact métal / c-Si [Schröder, 84].

Un second type de pertes résistives provient de courts-circuits (ou shunts) entre les électrodes positives et négatives de la cellule. Ces différentes pertes résistives influencent fortement la valeur du facteur de forme des cellules photovoltaïques.

I.5.2 Recombinaisons volumiques Shockley-Read-Hall (SRH)

Contrairement aux phénomènes Auger et radiatifs, le mécanisme de recombinaisons (SRH) n'est pas intrinsèque pour silicium cristallin. Les recombinaisons SRH sont dues aux impuretés et défauts présents dans le c-Si. Celles-ci provoquent l'apparition de niveaux d'énergie discrets dans la bande interdite [Schockley, 54].

L'émission thermique de porteurs à partir de ces niveaux est improbable lorsqu'ils sont suffisamment éloignés du bord des bandes de valence et de conduction. On parle alors de niveaux «profonds» qui augmentent la probabilité de recombinaison des porteurs libres. Par exemple, un électron libre peut être piégé dans un niveau profond où il se recombinera, plus facilement, avec un trou de la bande de valence. Ces niveaux sont d'abord caractérisés par leur densité N_T ainsi que leur énergie E_T dans la bande interdite. Leurs sections efficaces de capture σ_n et σ_p permettent de représenter leur aptitude à capturer respectivement des électrons et des trous. Dans le cas du silicium de type p, et pour une densité N_T du niveau d'énergie très inférieure au dopage N_A , la durée de vie τ_{srh} est définie par l'équation (I-15)

[MacDonald, 01]

$$\tau_{SRH} = \frac{\tau_{p0}(n_1 + \Delta_n) + \tau_{n0}(N_A + P_1 + \Delta_n)}{N_A + \Delta_n} \quad (I-15)$$

Les paramètres τ_{p0} et τ_{n0} dépendent des sections efficaces de capture respectivement des trous et des électrons selon l'équation (I-16), tandis que n_1 et n_2 sont liés au niveau d'énergie E_T du piège par la relation (I-17).

$$\tau_{p0} = \frac{1}{\sigma_p N_T V_{th}} \quad \tau_{n0} = \frac{1}{\sigma_n N_T V_{th}} \quad (I-16)$$

$$n_i = N_c e^{\left(-\frac{E_c - E_T}{KT}\right)} \quad p_i = N_v e^{\left(-\frac{E_T - E_v}{KT}\right)} \quad (I-17)$$

On définit n_1 (et p_1) comme la densité d'électrons (de trous) dans la bande de conduction E_c (de valence E_v) lorsque le niveau de Fermi E_F coïncide avec le niveau piège E_T .

V_{th} représente la vitesse thermique des porteurs, N_c et N_v les densités effectives d'états dans la bande de conduction et la bande de valence. Plus les niveaux d'énergie apparus sont proches des bandes, moins ils vont agir dans le sens de la recombinaison des porteurs. En effet, il sera plus probable que le porteur capturé par ce niveau d'énergie soit réémis thermiquement plutôt qu'il ne se recombine. C'est pour cela que les niveaux situés vers la moitié du gap provoquent les plus forts taux de recombinaison. Les défauts et impuretés présents dans le c-Si modifient donc fortement ses propriétés électriques en favorisant les recombinaisons des porteurs. Il est en général nécessaire de limiter le nombre de défauts ainsi que la densité d'impuretés afin de garder des valeurs élevées de durée de vie des porteurs.

Il faut noter que la valeur de la densité de courant de court-circuit (I_{cc}) n'est plus limitée par la durée de vie volumique des porteurs, lorsque la longueur de diffusion devient très supérieure à l'épaisseur de la cellule.

Elle est alors uniquement limitée par les recombinaisons de surface et les facteurs optiques évoqués précédemment. En revanche, la valeur de la tension en circuit ouvert V_{co} est dans la plupart des cas strictement limitée par les phénomènes de recombinaison et ceci quelque soit leur niveau.

1.5.3 Recombinaisons surfaciques et au contact :

La surface d'un substrat de c-Si représente une rupture brutale dans la continuité du réseau cristallographique. Ceci entraîne la présence de liaisons non saturées ou liaisons pendantes. Les atomes de silicium auxquels il manque une liaison covalente ne sont donc pas dans une configuration électronique stable. Ces défauts structuraux introduisent des niveaux énergétiques dans le gap du silicium qui vont assister les phénomènes de recombinaison. Les liaisons pendantes peuvent être saturées par le dépôt d'une couche de matériau à la surface. On parle alors de passivation des défauts de surface.

L'oxyde natif, de mauvaise qualité, n'apporte aucune passivation, il est donc nécessaire d'apporter un traitement adapté à la surface afin de réduire son influence sur les recombinaisons. La notion de densité d'états d'interface $D_{it}(E)$ exprimée en

$\text{cm}^{-2}.\text{eV}^{-1}$ est utilisée pour caractériser les niveaux d'énergie introduits par les défauts de surface. Le taux de recombinaison surfacique s'exprime par l'équation (I-18), en fonction des concentrations d'électrons (n_s) et de trous (p_s) en surface, de la densité d'états d'interface, ainsi que des paramètres définis précédemment pour les recombinaisons SRH [Eades, 85].

$$U_s = \int_{E_V}^{E_C} \frac{V_{th}(n_s p_s - n_i^2)}{\frac{n_s + n_I}{\sigma_p(E)} + \frac{p_s + p_I}{\sigma_n(E)}} D_{it}(E) dE \quad (I-18)$$

Afin de représenter les phénomènes de recombinaison surfacique, on utilise la notion de vitesse de recombinaison de surface. Ce paramètre, noté S , s'exprime en $\text{cm}.\text{s}^{-1}$.

Il dépend du taux de recombinaison et de la densité de porteurs en excès à la surface selon la relation (I-19).

$$S = \frac{U_s}{\Delta n_s} \quad (I-19)$$

Les techniques de passivation s'appuient sur deux leviers différents. La première repose sur la réduction de la Dit. Le second consiste à diminuer, par effet de champ, la densité de porteurs susceptible de se recombiner à la surface. La croissance d'un oxyde thermique à haute température (1000°C) permet de réduire la densité d'états de surface à des valeurs très basses ($1 \times 10^9 \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$), à comparer avec les $6.8 \times 10^{14} \text{at}.\text{cm}^{-2}$ d'une surface orientée (100) [Damon-Lacoste, 07]. Certains matériaux hydrogénés réalisés par CVD (a-SiN_x:H, a-Si:H, a-SiC:H) contiennent une certaine quantité d'hydrogène qui peut passer les liaisons pendantes.

Cependant, les valeurs de Dit obtenues avec ces matériaux sont en général supérieures d'au moins une décade à celles du SiO₂ thermique. Pour atteindre d'excellentes propriétés de passivation, les matériaux déposés à basse température utilisent donc également le mécanisme d'effet de champ. Un type de porteurs est alors éloigné de l'interface, ce qui réduit le taux de recombinaisons. Cet effet de champ peut être provoqué par les discontinuités de bande (énergie de gap différente entre les matériaux), par la présence de charges à proximité de la surface (charges positives fixes pour le nitrure de silicium) ou encore par un léger dopage thermique

(jonction p/n ou high/low) [Aberle, 01]. La Figure (I-5) montre les processus de recombinaisons dans le cas particulier de l'interface a-Si:H(n)/c-Si(p). Dans ce cas, les porteurs peuvent se recombiner à l'interface mais également dans le matériau a-Si:H(n). Dans la plupart des cas, la passivation de surface est effectuée par un matériau non conducteur. Les recombinaisons se produisent alors principalement à l'interface entre les deux matériaux.

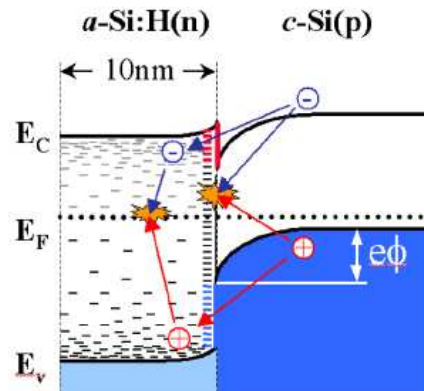


Figure I-5. Schéma de bandes à l'interface a-Si:H (n) / c-Si (p). Les niveaux d'énergie dus aux défauts sont indiqués par des traits, et les processus de recombinaisons par des flèches. E_C , E_V , E_F et $e\phi$ représentent respectivement l'énergie de la bande de conduction, de celle de valence, l'énergie du niveau de Fermi et la courbure de bande dans le c-Si [Korte, 07].

Il est difficile d'obtenir directement une mesure de vitesse de recombinaison de surface. Le paramètre le plus accessible reste la durée de vie effective (τ_{eff}) du substrat c-Si, qui prend en compte à la fois les recombinaisons volumiques et surfaciques. La formule (I-20) permet d'exprimer τ_{eff} en fonction des différentes contributions des recombinaisons radiatives (τ_{rad}), Auger (τ_{Auger}), SRH (τ_{SRH}) et surfaciques (S). Dans ce cas, la même vitesse de recombinaison de surface est considérée sur chaque face du substrat d'épaisseur W (cm).

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{2s}{W} \quad (I - 20)$$

Pour un matériau multicristallin, les recombinaisons en volume peuvent dominer et ainsi limiter la durée de vie effective des porteurs minoritaires. En revanche, dans le cas d'un substrat silicium FZ ou CZ (monocristallin), il est plus probable que le rôle

de la surface soit prépondérant, et ce d'autant plus que l'épaisseur du substrat est faible. Avec un substrat de très haute durée de vie, un rendement de cellule supérieur à 27% peut théoriquement être obtenu si les recombinaisons de surface sont suffisamment faibles [Swanson, 05].

II. Différent types des cellules conventionnelles.

II.1 La cellule photovoltaïque standard en silicium cristallin

II.1.1 Architecture de la cellule :

Les premières cellules solaires c-Si réalisées dans les années 1950 utilisaient des substrats de type n (dopés Phosphore). À cette époque, leur première application, militaire, était destinée à l'alimentation des satellites. Les substrats de type p se révélant plus résistants aux radiations, les cellules photovoltaïques ont ensuite été développées sur du c-Si dopé Bore [Green, 09]. Ces premières cellules étaient seulement constituées d'une jonction diffusée (émetteur) et d'un contact ohmique. Par rapport à ces simples photodiodes, l'architecture des cellules photovoltaïques a ensuite rapidement évolué, et a abouti à une architecture dite « standard » schématisée sur la Figure (I-6).

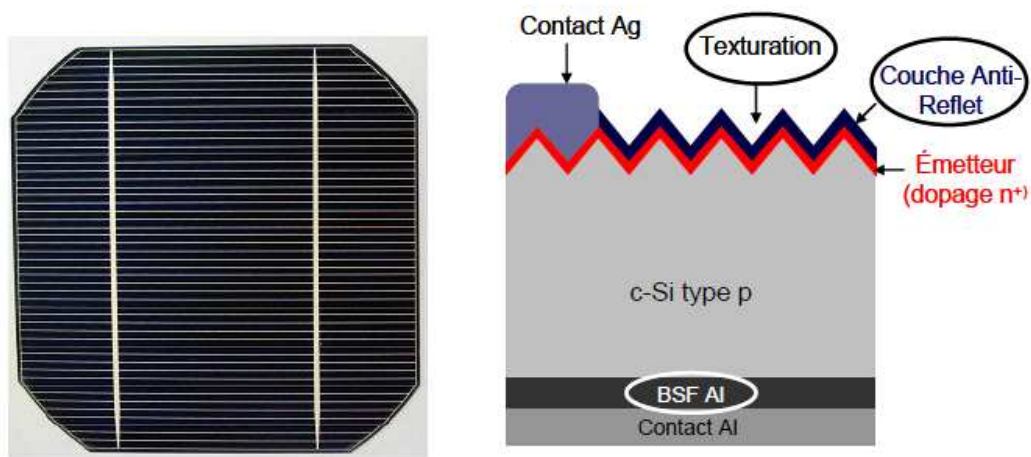


Figure I-6. Structure standard. Gauche: Photographie de la face avant (Wafer pseudocarré 150 cm²); Droite: Schéma vue de coupe [Desrues, 09]

A la différence des dispositifs réalisés pour la microélectronique, la totalité du substrat de silicium cristallin est utilisé. Ces substrats (wafers) sont découpés, à la scie à fil, dans des lingots cristallisés selon différents procédés (CZ, FZ, Block-cast).

Une épaisseur de 80µm suffit théoriquement pour que la quasi-totalité des photons soit absorbée. Cependant les techniques actuelles de découpe de wafers ne permettent pas d'atteindre des épaisseurs inférieures à 100µm. De plus, la réduction des épaisseurs fragilise les plaques et augmente le taux de casse tout au long du procédé de fabrication (cellules et modules). Les substrats multicristallins les plus utilisés au niveau industriel ont une forme carrée d'approximativement 15cm de côté, alors que pour le monocristallin c'est la forme pseudocarrée de 12.5cm de côté qui est la plus répandue. Trois grandes avancées technologiques, montrées sur la Figure (I-6), ont permis l'augmentation du rendement des cellules photovoltaïques. Il s'agit de l'usage d'une couche anti-reflet, de la texturation de surface de l'introduction d'un champ de surface arrière BSF (Back Surface Field).

II.1.2 Couche Anti-Reflet et Texturation

L'utilisation d'une structuration de la surface avant (texturation), alliée à une couche anti-reflet (CAR), permet de réduire drastiquement la réflexion du rayonnement incident.

Le procédé de texturation consiste à créer un relief micrométrique à la surface du wafer de silicium ^[Haynos, 74]. La forme généralement pyramidale du relief multiplie les réflexions et donc les chances pour la lumière de pénétrer dans le matériau. En effet, le rayonnement incident est constitué de longueurs d'onde inférieures aux dimensions des structures réalisées. Dans le cas d'une double réflexion (Figure I-7), le coefficient de réflexion total devient R^2 , ce qui entraîne une baisse de la réflexion totale de cette surface. Les techniques industrielles de texturation se font le plus souvent par voie chimique alcaline (KOH, NaOH, TMAH). Cependant, les voies acide et sèche font l'objet d'un intérêt croissant en particulier pour les matériaux multicristallins.

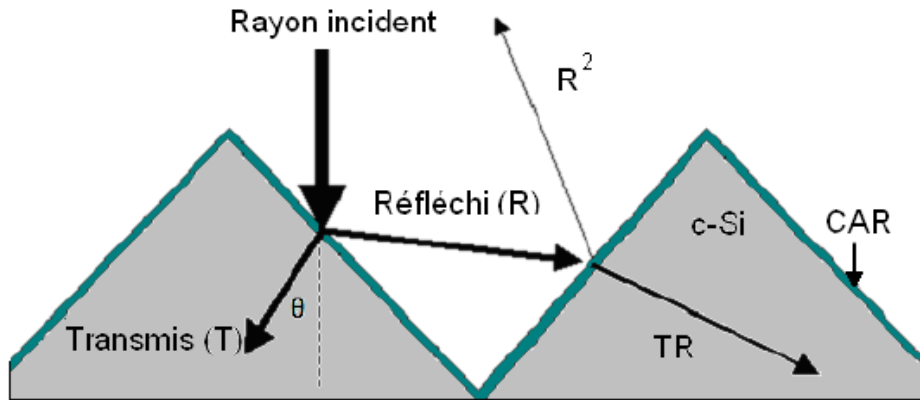


Figure I-7. Schéma de principe des réflexions lumineuses sur une surface texturée. R est le coefficient de réflexion, T le coefficient de transmission [Desrués T., 09]

Une couche anti-reflet (CAR) déposée sur la face avant des cellules aide à améliorer le confinement optique. Elle permet d'adapter l'indice optique entre le milieu extérieur et le silicium, par conséquent, elle minimise les réflexions. Pour cela, il est nécessaire que cette couche possède un indice de réfraction (n_{CAR}) ainsi qu'une épaisseur (e_{CAR}) adaptés au milieu extérieur d'indice n_{ext} . Les relations (I-21) et (I-22) permettent de déterminer les valeurs e_{CAR} et n_{CAR} en fonction du milieu extérieur et du silicium (n_{Si}) [Desrués, 09]. Le minimum de réflexion peut être atteint pour des valeurs périodiques de e_{CAR} dépendant du nombre entier m . Il est en général préférable de prendre $m=1$ afin de limiter l'épaisseur de la CAR.

$$n_{CAR} = \sqrt{n_{ext} n_{Si}} \quad (I - 21)$$

$$e_{CAR} = \frac{(2m + 1)\lambda}{4n_{CAR}} \quad (I - 22)$$

Pour un milieu extérieur constitué d'air, la valeur de n_{CAR} doit être proche de 2, et celle de (e_{CAR}) de l'ordre de 75nm. Si l'on considère les cellules encapsulées dans un module, ces valeurs varient légèrement avec $n_{CAR} \approx 2.3$ et $e_{CAR} \approx 65$ nm [Lelièvre, 07].

La couche anti-reflet la plus répandue pour les cellules photovoltaïques standards est constituée de nitrure de silicium hydrogéné ($a\text{-SiN}_x\text{:H}$). En effet, ce matériau peut combiner à la fois des propriétés optiques excellentes et un niveau élevé de passivation de surface. Cette couche de ($a\text{-SiN}_x\text{:H}$) est en général déposée par épitaxie (PECVD), à des températures proches de 450°C [Aberle, 01]. Il a été montré aussi que l'hydrogène présent dans cette couche peut diffuser lors de recuits ce qui a pour effet de passiver les défauts volumiques en plus des défauts de surface [Duerinckx, 02].

II.1.3 Champ de Surface Arrière

A la face arrière des cellules c-Si standard, il est nécessaire de relier la base à l'aide d'un contact métallique. Malheureusement, au contact, la vitesse de recombinaison de surface atteint des valeurs très élevées ce qui provoque une diminution du rendement des dispositifs. Pour réduire le taux de recombinaison sur cette face arrière, il est possible de diminuer les défauts d'interface ou d'éloigner un des types de porteurs. L'efficacité d'un champ répulsif en face arrière a été d'abord démontrée par la réalisation d'un gradient de dopage [Mandelkorn, 72]. La jonction (high/low) ainsi formée, éloigne les porteurs minoritaires de la face arrière et diminue les recombinaisons au contact.

Dans le cas des cellules standard sur c-Si de type p, la technique la plus répandue au niveau industrielle utilise une couche d'Aluminium déposée sur la face arrière. Lors d'un traitement thermique adapté ($\approx 600^\circ\text{C}$), un eutectique AlSi est formé. Celui-ci en se refroidissant donne naissance à une zone c-Si dopée Al. La profondeur de ce BSF Al peut atteindre plusieurs microns avec des dopages de l'ordre de 1×10^{18} à $1 \times 10^{19} \text{ at.cm}^{-3}$ [Narasimha, 99].

Pendant la réalisation du BSF Aluminium, des phénomènes de passivation des défauts volumiques peuvent également apparaître [Dubois, 07].

Cette étape technologique agit donc doublement sur la longueur de diffusion des porteurs, en diminuant à la fois les recombinaisons volumiques et surfaciques.

Les meilleurs rendements atteints par la cellule standard fabriquée industriellement sont de l'ordre de 15 à 16% aussi bien sur c-Si monocristallin que multicristallin. Les modules fabriqués à l'aide de ces cellules montrent donc des performances légèrement inférieures à ces valeurs, de l'ordre de 14% en moyenne.

II.2. La cellule standard optimisée: structure PERL

L'architecture standard des cellules photovoltaïques est issue d'un compromis entre l'obtention d'un rendement élevé et le maintien d'un procédé de fabrication peu coûteux. Les recherches menées depuis le début des années 80, en particulier par l'équipe de l'University of New South Wales (UNSW), avaient pour but principal d'améliorer le rendement des cellules photovoltaïques en c-Si. Cette amélioration repose principalement sur une optimisation continue de la structure des cellules, pour permettre un meilleur confinement optique et une diminution des recombinaisons volumiques et surfaciques, sans pour cela provoquer des pertes résistives. Différentes structures et technologies ont été successivement conçues en laboratoire : PESC (Passivated Emitter Solar Cell) [Blakers, 86], PERT (Passivated Emitter Rear Totally diffused) et enfin PERL (Passivated Emitter Rear Locally diffused) [Zhao, 99]. La PERL détient le record de rendement sous AM1.5, pour une cellule en silicium cristallin, avec une valeur de 25 % [Green, 09]. Ces structures de 4cm², schématisées sur la Figure (I-8), sont fabriquées à l'aide de procédés déjà appliqués à la microélectronique (photolithographie, oxyde thermique) sur un substrat c-Si FZ de type p (1Ωcm et 450µm d'épaisseur). Plusieurs technologies avancées sont nécessaires pour réduire les pertes dans ce type de cellules et augmenter le rendement :

- Texturation en pyramides inversées,
- Double couche anti-reflet,
- Grille de contacts à surface réduite,
- Émetteur sélectif,
- Passivation de surface par oxyde thermique,
- BSF localisé.

Parmi ces technologies, les plus répandues dans les laboratoires et les industries sont l'émetteur sélectif et le BSF localisé. En effet, la structure standard utilise des dopages uniformes sur toute la surface de la cellule afin de réaliser l'émetteur et le BSF. Pour supporter la prise d'un contact par les électrodes métalliques, ces zones sont très dopées, et donc très recombinaisons. La technologie des émetteurs sélectifs repose sur la réalisation d'un dopage élevé uniquement sous les contacts et d'un dopage plus faible ailleurs. Ceci permet de diminuer les recombinaisons dans l'émetteur, mais également à sa surface. Il est en effet plus facile de passiver une

zone faiblement dopée qu'une zone fortement dopée. Pour le BSF localisé, le procédé est identique au précédent sauf qu'il n'est pas nécessaire de réaliser un dopage léger hors des contacts. Un oxyde thermique permet en effet de passiver la surface arrière encore plus efficacement qu'un léger dopage Bore.

La réalisation de grilles de contact à surface réduite fait également l'objet de nombreuses recherches. L'aspect des lignes peut être caractérisé par un rapport d'aspect (aspect ratio) égal au rapport de l'épaisseur et de la largeur des lignes. Il est intéressant de limiter la valeur de ce paramètre afin de diminuer l'ombrage occasionné par la grille de contact. Avec la technique de sérigraphie il est difficile d'atteindre à la fois des lignes étroites et épaisses. Parmi les technologies les plus adéquates pour palier à ce problème et former des lignes fines, on peut citer les contacts enterrés [Wenham, 93] ou le dépôt induit par illumination (LIP) [Mette, 06].

En revanche, ces métallisations fines doivent être plus épaisses afin de limiter les pertes résistives.

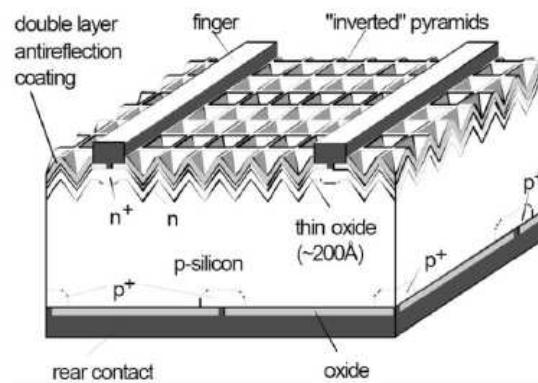


Figure I-8. Schéma de la structure PERL [Zhao, 99].

En raison de la complexité du procédé PERL (beaucoup d'étapes technologiques), la structure PERL ne peut pas être fabriquée industriellement telle quelle. De nombreuses techniques ont été étudiées afin de simplifier son procédé de fabrication industriel. Parmi celles-ci, l'utilisation du LASER semble particulièrement adaptée, aussi bien pour former des contacts localisés que pour structurer des couches diélectriques à des vitesses élevées. La firme Suntech, qui collabore activement avec l'UNSW, a ainsi récemment annoncé avoir fabriqué des cellules inspirées de la structure PERL sur ses chaînes de production. Un rendement proche de 19% a été atteint, ce qui semble valider cette approche pour la fabrication de cellules standard à haut rendement [Shi, 09].

II.3. Cellule standard à émetteur inversé

Les cellules standard à émetteur inversé sont fabriquées à l'aide des mêmes procédés que les cellules standard mais sur un substrat de type n. Ainsi, comme indiqué sur la Figure (I-9), l'émetteur est réalisé sur la face arrière et le BSF devient FSF (Front Surface Field). Les rendements obtenus sur cette structure sont plus élevés que sur des cellules type n à émetteur en face avant [Zhao, 06]. En effet, l'émetteur p^+ semble provoquer plus de recombinaisons lorsqu'il est situé en face avant qu'en face arrière. Un rendement maximal de 22.7% a ainsi pu être obtenu avec une structure PERL à émetteur inversé sur un substrat de type n (FZ). Avec les mêmes substrats, la structure à émetteur en face avant atteint seulement 21.9%.

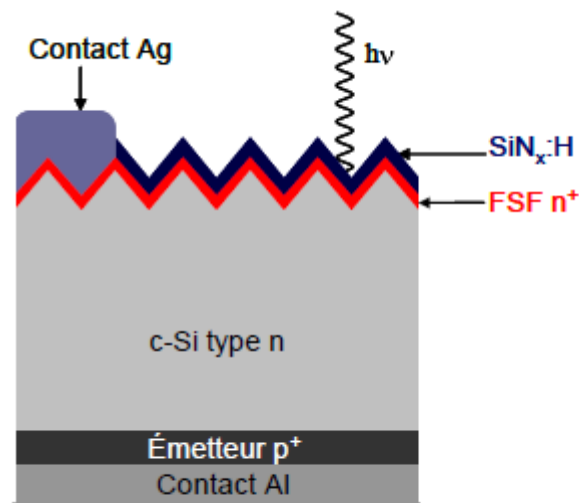


Figure I-9. Cellule photovoltaïque à émetteur inversé sur c-Si de type n [Desrues, 09]

Des variantes industrielles de cette structure existent également, avec l'émetteur formé par le recuit d'une couche d'Aluminium en face arrière. Des rendements de l'ordre de 17% ont ainsi pu être obtenus [Schmiga, 06] et [Mihailetchi, 08]. Ces variantes industrielles utilisent des dopages élevés afin de faciliter la pose de contact. Le fait de diminuer le dopage de la face avant permet à la fois de diminuer les recombinaisons dans le volume de l'émetteur et à sa surface. Il a été montré par Mai et al. qu'à l'aide d'un procédé basé sur le LASER, un dopage plus léger du FSF améliore considérablement le courant fourni par la cellule à émetteur inversé [Mai, 09]. Un rendement de 18.2% est ainsi atteint sur des substrats CZ de grande taille (148.6cm²). Toutefois, cette structure nécessite des substrats de bonne qualité ainsi que des vitesses de recombinaisons en face avant faibles [Mihailetchi, 06].

Il existe plusieurs avantages à l'utilisation de c-Si de type n pour la fabrication de cellules solaires. Il a en effet été démontré que ses qualités électriques sont supérieures à celles du c-Si de type p. Le c-Si de type n possède plus facilement de hautes valeurs de durées de vie, particulièrement grâce à sa faible sensibilité aux défauts chimiques et cristallographiques [Cotter, 06]. De plus, les matériaux CZ et multicristallins de type n sont beaucoup moins sujets à la dégradation sous éclairage (Light induced degradation) (LID), que les matériaux de type p (dopés Bore) [Cuevas, 02]. Les phénomènes de LID sont en effet liés aux paires B-O qui se forment sous éclairage, et agissent alors comme des centres recombinants. Ces différents avantages justifient en partie l'utilisation de c-Si de type n pour la fabrication de cellules industrielles à haut rendement.

CONCLUSION

Dans le cas de cellules photovoltaïques conventionnelles (classiques), la jonction p-n est placée sur la face avant (illuminée) de la cellule et les contacts à l'émetteur et au substrat sont sur les faces opposées (cf. figure I-8). Ce genre de structure est simple et l'industrie les utilise depuis longtemps. Par contre, elle présente les inconvénients suivants :

- ombrage partiel de la cellule par la grille de métallisation face avant ;
- la zone fortement dopée (émetteur) est placée sur la face avant, où le taux de génération est maximal (voir figure I-6). Donc, la recombinaison dans l'émetteur est importante ;
- pour réaliser la cellule, il est nécessaire d'avoir accès aux deux faces.

Ces problèmes sont en partie levés dans la cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités.

Chapitre II :

La cellule photovoltaïque

interdigitée à contacts arrière (IBC)

(Interdigitated back contact Cell)

Introduction

La cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités IBC (interdigitated back contact) ou RCC (rear contact cell) qui est l'objet de notre étude, représente une option prometteuse pour compléter le champ d'application des cellules photovoltaïques. Les deux principaux avantages de cette structure sont l'absence de contact sur la face avant permettant de réduire le taux d'ombrage et la possibilité d'interconnexion coplanaire. Les contacts présents sur la face opposée au rayonnement sont réalisés par deux grilles interdigitées (collecte de trous et des électrons) et peuvent être librement optimisés en terme de géométrie (largeur, hauteur) afin de minimiser la résistance série totale.

Le concept de cette cellule fut la première fois introduit par Schwartz en 1975 [R.j.Schwartz, 75]. Des rendements de conversion de 17%, sous une lumière concentrée correspondant à 50 soleils, furent obtenus. Dans une étude théorique publiée par Lammert [M.D.Lammert, 77], il a été calculé qu'une réduction du dopage de la jonction alliée à une optimisation des contacts, à une diminution de la réflectivité face avant, et à une durée de vie des porteurs plus grande, permet d'atteindre des rendements de 24% sous une illumination de 100 soleils.

Swanson fut à la base de l'amélioration d'un point important du concept RCC, grâce à la technologie (point contact solar cell). A ce moment, des rendements de 23% furent obtenus sous 100 soleils pour un substrat FZ de haute résistivité de 80 microns d'épaisseur. La différence avec les premières structures IBC provient de la métallisation qui prend contact seulement sur des petites surfaces gravées à travers un oxyde de silicium, lui-même déposé sur les zones N^+ et P^+ . Dans la foulée, Swanson développa un modèle analytique destiné à expliquer la distribution des porteurs de charges autour du point de contact. Ce modèle fut repris par Sinton en incorporant les effets de recombinaison et génération dans le substrat [R.A.Sinton, R.M.Swanson, 87].

Ce dernier déduit un rendement limité à 28% pour une illumination sous concentration ont pu également être utilisés pour une illumination sous soleil AM1.5. Ainsi un rendement de 22.3% avec un V_{co} de 706mV sous AM1.5 fut obtenu par King [R.R.King, 91].

En suite, Verlinden proposa une technique de métallisation multi-niveaux produisant une résistance série indépendante de la surface de la cellule, cette dernière reste

trop coûteuse pour l'application industrielle, Sinton proposa donc une séquence de fabrication simplifiée pour résoudre ce problème. Une autre technique de métallisation auto-alignée pour ce travail a permis l'utilisation d'un seul masque de photolithographie. Afin d'éviter le phénomène de court-circuit dans les régions dopées plus, Sinton utilisa une technique de fabrication reposant sur l'utilisation de deux étapes de masquage. Des rendements de 21.9% furent atteints sur des substrats de type n d'épaisseur égale à 130µm et d'une résistivité égale à 390Ω.cm. [R.A.Sinton, R.M.Swanson, 90]

Matsukama et al améliorèrent le modèle analytique du (point-contact) en prenant en compte, avec plus de précision, les effets de réflexion internes multiples et la recombinaison de porteurs dans la base [K.Matsukama, 90].

En 1991, les recherches effectuées à l'université de Stanford sur les cellules RCC ont permis d'obtenir des rendements de 22.7% sous illumination de 1 soleil [R.R.King, R.A.Sinton, R.M.Swanson, 91]

La première chaîne de production de cellules RCC de grandes surfaces a commencé chez Sunpower Corporation En 1993 [R.A.Sinton, P.J.Verlinden, 93], suivi par la fabrication de 7000 cellules à haut rendement qui furent utilisées pour la réalisation de la voiture solaire - the dream - [P.J.Verlinden, R.M.Swanson, 94].

Sunpower a démontré la possibilité de fabriquer des cellules RCC avec un rendement moyen de 21.1% et un taux de production de 90%. Pour cela, cinq masques de photolithographie étaient utilisés en 1993 sur la chaîne de production avec des substrats de type FZ c-Si d'épaisseur 160µm.

Le design de la cellule RCC fut par la suite optimisé afin de réduire les pertes parasites sur les extrémités de la cellule. En réduisant la résistivité du substrat utilisé, un rendement maximal de 23.2% a été obtenu. [P.J.Verlinden, R.A.Sinton, 97]

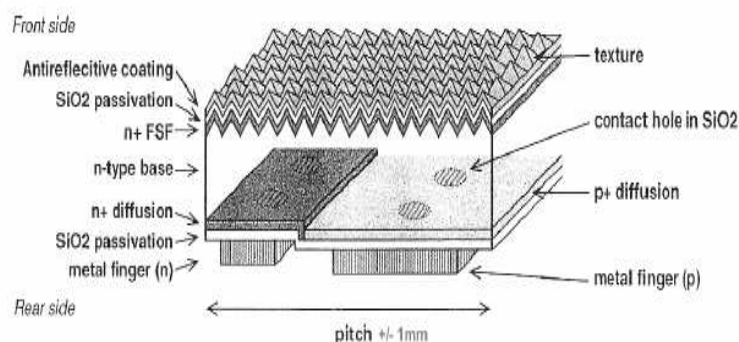
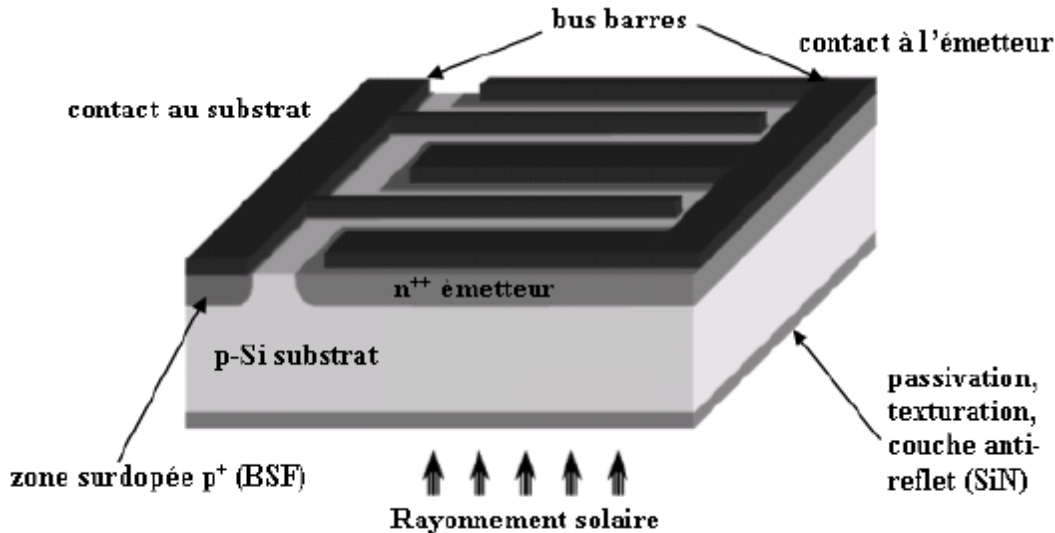


Figure II-1 : Structure RCC(A300) développée par Sunpower Corp [SunPower Corporation. Solar Cells. [en ligne]

I. Description de la cellule interdigitée à contact arrière

I.1 Structure de la cellule

La figure II-2 présente La structure générale d'une cellule interdigitée.



Figure

II-2 : Cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités ^[Nichiporuk, 05]

I.2 : Description de la cellule

On résume notre description aux points suivant :

- La cellule photovoltaïque interdigitée à contact arrière est caractérisé par sa jonction et son contact qui ils sont trouvé précisément sur la face opposé au rayonnement elle est réalisée sur un substrat de silicium de bonne qualité, c'est-à-dire avec une longueur de diffusion plus importante que l'épaisseur du substrat. La jonction p-n est élaborée en forme de peigne et est située sur la face arrière (non exposée) du substrat.
- Les contacts ohmiques à l'émetteur et au substrat sont réalisés en forme de peignes interpénétrés. Une zone dopée p⁺ est formée sous le contact au substrat pour assurer l'ohmicité du contact et réduire la recombinaison des porteurs minoritaires sur le contact.
- La face avant de la cellule est texturisée puis on dépose une couche de passivation et antireflet (habituellement le nitrure de silicium).

- La cellule interdigitée est éclairée du côté où il n'y a pas de métallisation. La lumière génère des paires (électron - trou) dans le substrat et ils diffusent vers les contacts correspondants (les électrons vers l'émetteur et les trous vers le BSF).

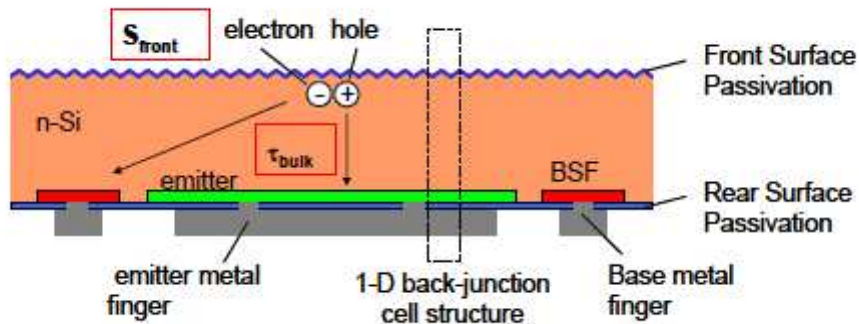


Figure II-3 : section vertical d'une Cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités [F.Granek, 09]

- Les paramètres géométriques de la cellule doivent satisfaire la condition suivante : la distance qui doit être parcourue par les porteurs minoritaires entre la génération et le contact, doit être plus petite que la longueur de la diffusion. Dans le cas contraire, le rendement de la cellule va se dégrader en raison des recombinaisons en volume.

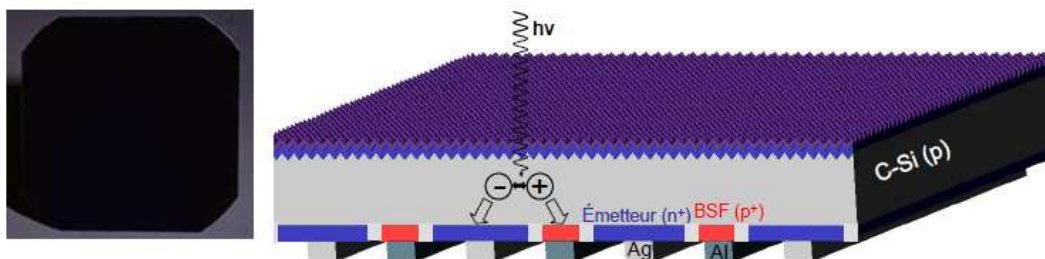


Figure II-4 : Structure IBC. Gauche : Vue de la face avant (pas de métallisations); Droite : Schéma d'une coupe de la structure [DESRUES, 09]

- Dans une cellule solaire sous éclairement, la majorité des porteurs sont photogénérés à proximité de la face avant. Ceci implique deux caractéristiques importantes pour l'obtention de hauts rendements sur les structures IBC [Nichiporuk, 05].
- La passivation de la face avant doit être extrêmement bonne, afin de limiter le mécanisme de recombinaison surfacique des porteurs [Sinton, 87]. Malgré ses excellentes propriétés de passivation de surface, le SiO₂ thermique n'est pas stable sous illumination [Swanson, 85]. Il convient de passiver la surface avec une couche de

SiO₂, puis de déposer une couche de a-SiNx:H pour ses propriétés anti-réfléctives et sa stabilité sous éclairage [Swanson, 85] [Engelhart, 06]. Une légère diffusion Phosphore permet la création d'un champ de surface avant (FSF) qui diminue les recombinaisons de surface et augmente la stabilité de la passivation [Gruenbaum, 88]. Ce FSF limite les pertes électriques, notamment en termes de V_{co} et de FF comparé aux surfaces uniquement passivées par un oxyde [King, 88]. Cependant, un dopage thermique peut introduire des défauts, ou une couche morte (surconcentration de dopants) à la surface. Ceci réduit fortement la durée de vie des porteurs. Pour éviter cela, le FSF peut aussi être simplement induit par des charges fixes présentes dans la couche diélectrique de passivation [Schwartz, 78].

- La longueur de diffusion des porteurs doit être assez élevée pour permettre leur collecte par la jonction en face arrière. Plusieurs études ont souligné l'influence de la durée de vie, et par conséquent de la qualité initiale du substrat, sur les paramètres électriques des cellules IBC [Nichiporuk, 05] [Dicker, 00] [Macintosh, 03].
- Les paramètres géométriques de la cellule doivent satisfaire la condition suivante: la distance parcourue par les porteurs minoritaires entre leur génération et leur collecte doit être plus petite que la longueur de diffusion des porteurs (directement liée à leur durée de vie).
- La résistivité du substrat et la géométrie de la face arrière sont à optimiser simultanément pour atteindre d'excellents FF ($\geq 80\%$). L'épaisseur et la résistivité du substrat, la géométrie et le dopage des zones actives, ainsi que les métallisations, apparaissent en effet comme les principaux paramètres influençant les pertes résistives des cellules IBC [Verlinden, 97].
- Pour la fabrication des cellules industrielles, les substrats utilisés sont fins (150 à 200 μ m) et les zones localisés assez larges (1mm) du fait des procédés de fabrication à bas coût [DeCeuster, 07]. Les porteurs de charge ont alors une longueur importante à parcourir latéralement dans le substrat de section réduite. Ceci peut entraîner des pertes résistives non négligeables. L'utilisation d'un Front Surface Field (FSF) permet d'augmenter la conductivité de la base, et donc de relâcher les contraintes sur la résistivité du substrat et la géométrie de la cellule [Granek, 08a].
- La passivation de la face arrière est également capitale pour réduire le courant de saturation des cellules. Sous les contacts métalliques, la vitesse de recombinaison est très élevée, c'est pourquoi Swanson a développé la technologie de (point contact) qui limite la surface des zones de contact. Ceci permet une très bonne

passivation d'une grande partie de la face arrière de la cellule [Swanson, 85]. Un oxyde thermique représente une excellente couche de passivation pour la face arrière lorsque des régions de polarité différentes sont présentes [Smith, 00].

- La surface d'émetteur doit être suffisamment importante pour permettre la collecte des porteurs. Ce paramètre dépend cependant de la qualité du substrat et de la passivation de surface dans les zones autres que l'émetteur. Cependant, sur la plupart des cellules IBC, les métallisations des zones de l'émetteur et du BSF ont les mêmes proportions que les zones elles-mêmes. Une asymétrie trop importante entre ces zones peut provoquer des pertes résistives dans la métallisation du BSF. La structure IBC à émetteur enterré, proposée récemment, permet de découpler la largeur zones dopées de celle de leurs métallisations [Harder, 08].

Cette structure présente donc beaucoup d'avantages par rapport aux cellules conventionnelles, et permet d'atteindre des très hauts rendements sur de grandes surfaces (150cm^2). Les procédés de localisation doivent cependant être assez fiables et précis pour éviter tout court-circuit entre les zones de polarité différente. Les principales techniques de localisation, dans le domaine du photovoltaïque, utilisent la photolithographie, la sérigraphie et le LASER.

I.3 : Différents types de passivation

La structure FSF (Front Surface Field) a été proposée pour réduire la recombinaison en face avant de la cellule par la formation d'une barrière de potentiel (jonction n^+/n ou p^+/p). En effet, la cellule photovoltaïque FSF utilise le même principe que La structure BSF, mais appliqué pour la face avant (figure II-5).

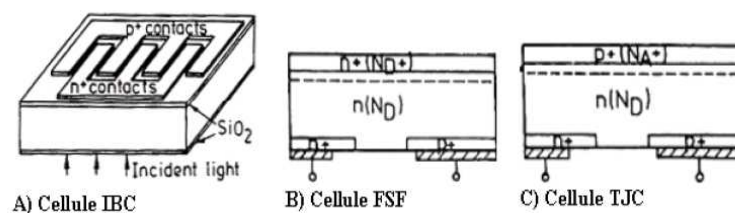


Figure II-5 : Cellules photovoltaïque interdigitée avec différents types de passivation face avant : par SiO₂ (A), par champ avant (B) et par jonction flottante (C). [Nichiporuk, 05]

La cellule photovoltaïque avec jonction tandem (TJC, Tandem Junction Cell) a été proposée pour réduire la recombinaison en surface. La structure TJC est présentée sur la figure (II-5). Toute la surface de la cellule (sauf le contact p^+ et l'espacement

entre les contacts) est couverte par la jonction p-n, qui sert de barrière de potentiel pour les porteurs générés.

Il est intéressant de noter qu'initialement le contact à la jonction p-n avant a été prévu dans la cellule TJC pour collecter le courant. Mais après la réalisation de la cellule, il a été mis en évidence que les contacts en face arrière assuraient la collection des porteurs photogénérés.

I.4 : Avantages et inconvénients

I.4.1 : Avantages

Les avantages de la cellule IBC sont les suivants :

- L'absence de jonction fortement dopée à l'avant permet d'atteindre une excellente qualité de surface et donc de forte tension en circuit ouvert ($>700\text{mV}$) grâce à la réduction du courant de saturation
- L'absence de contact à l'avant de la cellule permet de réduire la réflectivité donnant lieu à un plus grand courant de court circuit.
- La libre géométrie de courant à l'arrière permet d'obtenir d'excellente valeur de facteur de forme.
- Il n'y a pas de taux d'ombre des contacts.
- Les contacts étant réalisés sur la face arrière, ils peuvent être larges ce qui réduit la résistance série de la cellule et améliore le confinement optique car les contacts métalliques servent de réflecteur arrière.
- Le courant d'obscurité de la cellule (courant de diode) est réduit car la surface de la jonction p-n est plus petite.
- La recombinaison dans l'émetteur est diminuée puisqu'il est situé sur la face non illuminée.
- Grâce à la faible recombinaison dans l'émetteur, celui-ci peut être fortement dopé. L'avantage d'un émetteur fortement dopé est l'augmentation de la barrière de potentiel de la jonction (p-n). Par conséquent, la tension de circuit ouvert augmente et la recombinaison sur le contact à l'émetteur est réduite.
- L'assemblage des cellules photovoltaïques interdigitées est simplifié car tous les contacts sont situés sur une face de la cellule. son côté esthétique (aspect du module uniforme et sombre) entraîne un intérêt supplémentaire pour l'intégration dans le bâtiment.

I.3.2 : Inconvénients

Les désavantages de la structure IBC sont les suivants :

- La mise en place d'une technologie compliquée nécessite de nombreuses étapes de photolithographie et d'alignement difficilement adapté à une application industrielle.
- L'utilisation de substrat de très haute qualité électronique pour que la longueur de diffusion des porteur représente 2 à 4 fois l'épaisseur de la cellule.
- La complexité de la structure (pour réaliser de lithographie ou la sérigraphie alignée est nécessaire).
- La longueur de diffusion des porteurs minoritaires est plus grande que l'épaisseur de la cellule. Donc, la qualité du substrat doit être bonne.
- Les cellules photovoltaïques interdigitées sont très sensibles à la recombinaison en surface. Donc, la passivation de la face avant doit être très bonne.

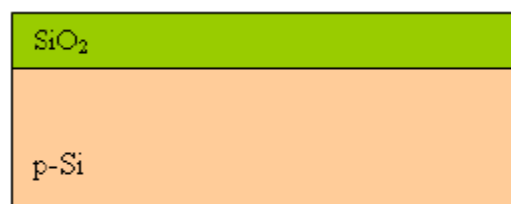
II-Élaboration des cellules solaires interdigitées ^[Nichiporuk, 05]

1.

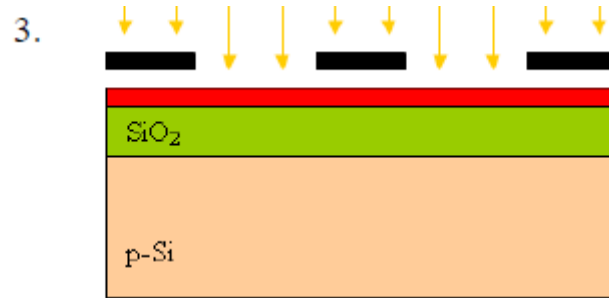


Nettoyage de la plaque initiale : 20 secondes dans BE7 (HF dilué à 5%) → 15 minutes dans H₂O₂+H₂SO₄ (1 :1) → 20 secondes dans BE7.

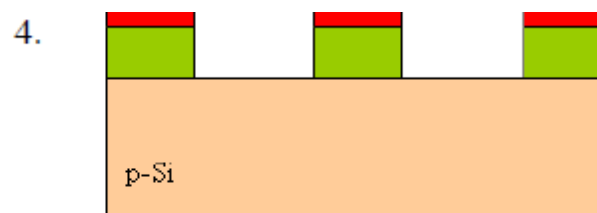
2.



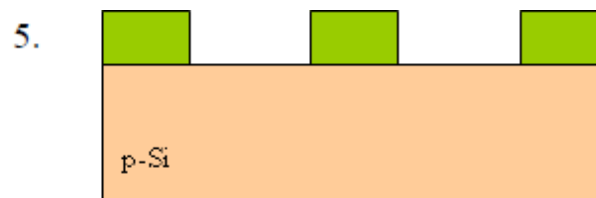
Formation d'une couche de SiO₂ épais (0,6µm) par oxydation humide. Paramètres D'oxydation : 50 min à 1050°C dans O₂ humide.



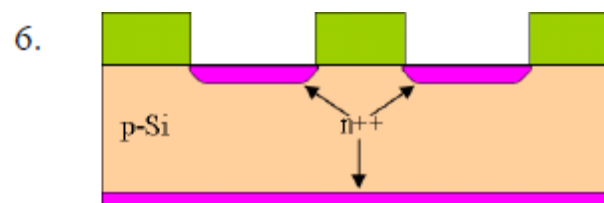
Dépôt de résine positive sur l'oxyde et séchage (1 minute à 120°C) ; insolation de la résine via le premier masque (masque 1) qui sert à délimiter l'émetteur. Le temps d'insolation est de 35 secondes. Humide.



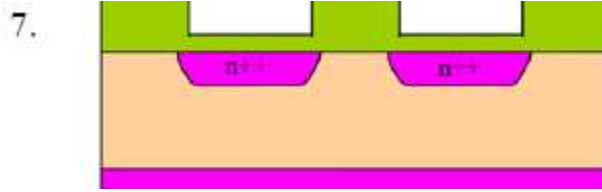
Développement de la résine insolée, durcissement de la résine (2 minutes à 120°C) ; ouverture de fenêtres dans l'oxyde par gravure dans BE7 pendant 5-6 minutes (fin de gravure contrôlée par le mouillage de la surface).



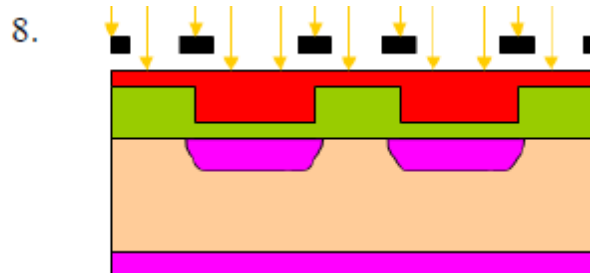
Gravure de la résine dans le remover. Le temps de gravure est de 10 minutes.



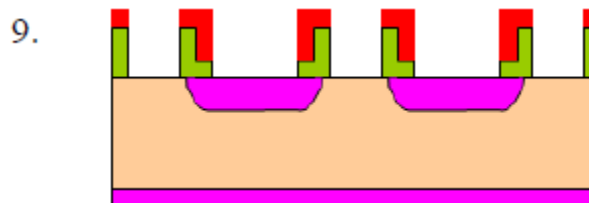
Création des zones n (peignes face arrière et émetteur flottant face avant) par diffusion de phosphore de POCl_3 à 950°C pendant 20 minutes.



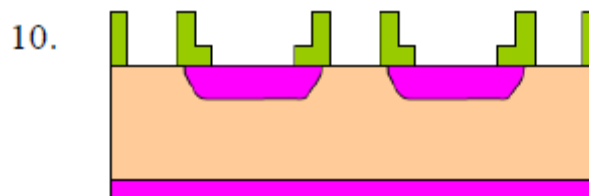
Redistribution à 1050°C pendant 60 minutes sous oxygène. Formation d'oxyde sec sur les zones n⁺⁺. Epaisseur de l'oxyde sec : $e_{ox} \sim 80\text{nm}$.



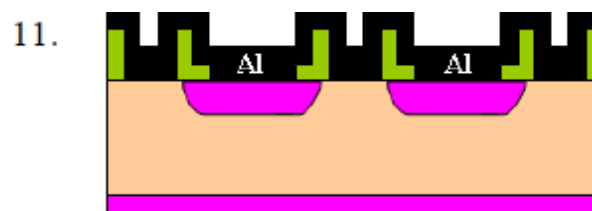
Dépôt de résine positive, séchage de la résine, alignement des motifs, insolation à travers le deuxième masque qui sert à délimiter les ouvertures de contact dans l'oxyde.



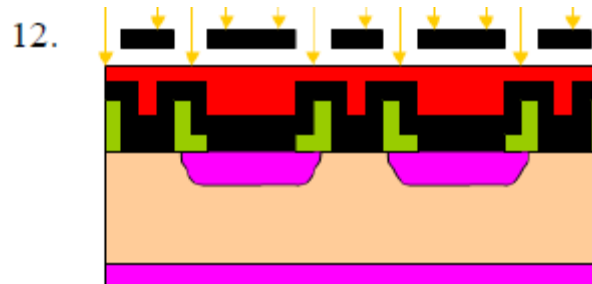
Développement de la résine insolée, durcissement de la résine ; ouverture des fenêtres dans l'oxyde par gravure dans BE7 (temps de gravure : 5-6 minutes).



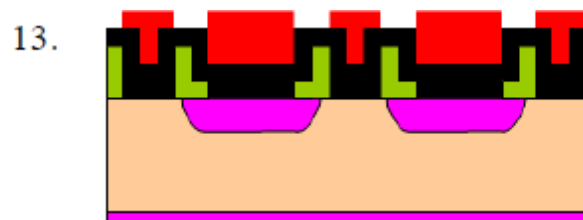
Enlèvement de la résine dans le remover. Le temps de gravure est de 10 minutes.



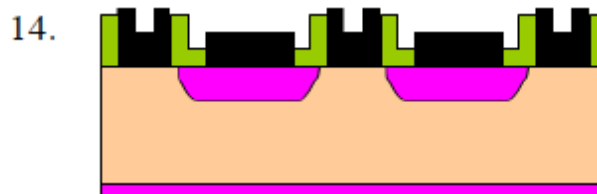
Dépôt d'aluminium sur toute la plaque par évaporation sous vide. L'épaisseur d'aluminium doit être de $1\mu\text{m}$ ou plus pour assurer une résistance série faible.



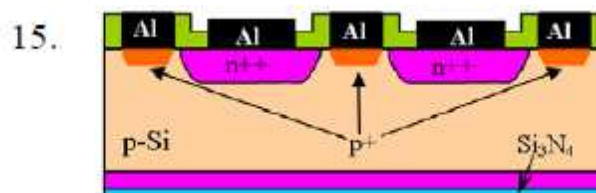
Dépôt de la résine positive, séchage de la résine ; alignement des motifs, insolation de la résine via le masque 3 qui sert à délimiter les contacts.



Développement de la résine insolée, durcissement de la résine.



Gravure de l'aluminium (dans les zones non protégées par la résine) par une solution acide ; enlèvement de la résine dans le remover.



Recuit (RTA) des contacts à 550°C pendant 30 secondes, formation d'une zone p^{+} ; dépôt d'une couche antireflet (SiN) par UV CVD.

II.1 : Exemples des cellules interdigitées à haut rendement

Comme exemples de cellules interdigitées on peut citer :

- Les cellules PEGASSUS et A300 industrialisées à Sun Power Corporation
- RCC (Rear Contact Cell) élaborées au Fraunhofer ISE

- les cellules OEEO à contacts arrière avec face arrière tranchée (OEEO, Oblique Evaporation Of Contacts) [53, 54] développées par R. Hezel à l'Institut für Solarenergie forschung Hameln Emmerthal (Allemagne);
- les cellules CISS interdigitées de structure simplifiée, réalisées au Center of Integrated Systems Laboratory at Stanford University (USA);
- les cellules(CIPAA) interdigitées élaborées par procédé auto-aligné à l'Université Catholique de Louvain, Laboratoire de Microélectronique (Belgique).
- Les cellules MAXIS BC+ sur silicium multicristallin avec contacts arrière sérigraphies industrialisées à Photovoltech (Belgique).

Le tableau suivant figure les paramètres principaux de ces cellules.

Tableau II-1 : Paramètres des cellules interdigitées à haut rendement ^{Nichiporuk, 05]}

	MAXIS BC+	PEGAS SUS	A300	RCC	OEEO	CISS	CIPAA1
μ	%15.4	22.5%	21.5%	21.1%	19.9%	21.9%	17%
surface (cm ²)	12.5*12.5	7*3	148.9	-	2*2	10.5	5
I _{CC} (mA/cm ²)	33.3	40.3	39.5	39.8	37.5	41.7	10160
V _{OC} (mV)	607	680	678	697.6	610	0.57	756
FF	0.76	0.8	0.803	0.794	0.738	0.8	0.674
Type	-	IBC	FSF	TJC	IBC	FSF	FSF
substrat	Multi-Si	n-type FZ	n-type FZ	p-type FZ 1.25Ωcm	n-type FZ 0.5Ωcm	n-type FZ 300Ωcm	-type FZ 10Ωcm
CAR	oui	double	SiN	SiO ₂	SiN	oui	SiN
Epaisseur (μm)	330	160	250	250	300	130	250
texturation	Attaque chim isotrope	Oui	Pyramides aléatoires	Pyramides aléatoires	Pyramide aléatoires	Oui	Pyramides aléatoires
Nbre de lithographies	0	5	-	5	0	2	1
Passivation	-	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	SiN	SiO ₂	SiN

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons décrit la structure et les différents modèles des cellules photovoltaïques à contact arrière interdigité. Nous avons donc étudié l'état de l'art de ces cellules et ainsi nous avons relevé leurs avantages et leurs inconvénients. Nous avons aussi décrit les étapes d'élaboration de ces cellules.

Dans le chapitre suivant, nous nous attacherons à optimiser l'architecture, la géométrie et les profils de dopage de la cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigité.

Pour cela, nous utiliserons la simulation à deux dimensions effectuée par le logiciel de simulation SILVACO.

Chapitre III :

Présentation de la structure simulée
et du logiciel Silvaco

INTRODUCTION

Quelque soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour prédire son meilleur rendement avant de passer à la phase technologique. Habituellement, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils de dopage, la configuration des contacts et le confinement optique. Les valeurs optimales des paramètres dépendent, bien sûr, de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau du substrat (durée de vie, mobilité), de la qualité des contacts ohmiques, de la vitesse de recombinaison en surface (faces avant et arrière), etc. L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximal.

La simulation numérique est couramment utilisée pour l'optimisation des systèmes et composants optoélectroniques. Pour les cellules photovoltaïques elle présente les avantages suivants :

- elle permet d'éviter la fabrication de plusieurs prototypes de cellules avec des paramètres différents. Ce qui est très coûteux ;
- elle est indépendante de la technologie utilisée (on peut donc faire varier largement les paramètres) ;
- on peut séparer l'influence de chaque zone de la cellule dans le cas de paramètres interdépendants (par exemple: mobilité, longueur de diffusion et durée de vie).

Elle permet donc un gain de temps, de matériau et par conséquent d'argent.

Dans le cadre de notre travail nous avons utilisé la simulation comme outil de prédiction en utilisant le logiciel SILVACO.

Celui-ci nous permet de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires interdigités. Par ailleurs il nous permet de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximal.

Dans ce type de structure, la difficulté majeure réside dans le grand nombre de paramètres qui sont en relation avec le rendement.

En effet, la cellule solaire interdigitée est caractérisée par les paramètres suivants :

- les dimensions géométriques des contacts et des régions diffusées (largeur de l'émetteur et du BSF, espacement entre l'émetteur et le BSF) ;

- L'épaisseur du substrat ;
- Les niveaux de dopage (substrat, émetteur, BSF, FSF ou émetteur flottant) ;
- La profondeur du dopage pour les régions diffusées (émetteur, BSF, FSF ou Émetteur flottant) ;
- Les paramètres qui interviennent dans les modèles de recombinaison (taux de recombinaison pour les faces avant et arrière, durée de vie des porteurs minoritaires) ;
- Les coefficients de réflexion pour les faces avant et arrière.

Par conséquent, pour décrire la cellule solaire interdigitée, 15 paramètres environ sont nécessaires.

Les logiciels les plus utilisés pour la simulation numérique des cellules photovoltaïques sont le PC1D, AFORS-HET, ISE/ TCAD, Silvaco. Nous avons choisi le « SILVACO » dans notre travail pour sa disponibilité dans notre unité de recherche, pour sa force et sa diversité de calcul et surtout pour son aptitude de nous offrir une modélisation à trois dimensions.

I-MODELISATION

La fiabilité de la simulation numérique et l'exactitude des résultats obtenus dépendent fortement du choix des modèles physiques utilisés pour décrire et prédire le fonctionnement de la cellule solaire. A cet effet nous choisissons un modèle de structure selon la littérature et on essaiera de caller nos résultats simulés sur des exemples expérimentaux réels pour calibrer notre logiciel et établir un code de calcul spécifique aux structures interdigitée étudiées.

Dans le cas de la structure interdigitée, nous prenons en compte les phénomènes suivants :

1. recombinaison Shockley Read Hall, recombinaison Auger, recombinaison en surface.
2. mobilité des porteurs dépendant du dopage (modèle de Masetti), saturation de la vitesse des porteurs dans le champ électrique (modèle de Canali) ;
3. variation de la largeur de bande interdite avec le dopage (modèle de Del Alamo)
4. formules de Fresnel pour calculer le passage de la lumière à travers les interfaces (air/Si, SiN/Si, Si/SiO₂).

- 5. pas d'ionisation par impact (chaque photon peut générer une paire électron/trou, si $h\nu > E_g$)
- 6. pas d'effet quantique.

II-STRUCTURE SIMULÉE, PARAMETRES, MAILLAGE

II-1 Structure simulée

En raison de la périodicité de la structure des cellules interdigitées nous n'avons simulé qu'une partie élémentaire de la surface de la cellule solaire (fig. III-1).

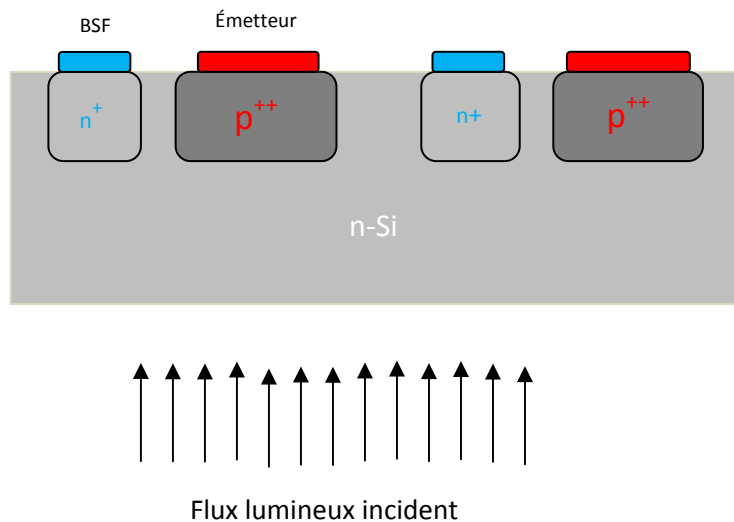


Figure III-1 : Partie élémentaire de la cellule e interdigitée simulée

Pour simuler l'influence des différents paramètres, nous avons tout d'abord choisie une cellule de référence (littérature) avec un ensemble des paramètres fixés, puis nous avons fait varier les paramètres un par un, tout en maintenant les autres fixes, afin d'analyser leur influence sur les caractéristiques de la cellule solaire.

La figure (III-2) représente la structure de la cellule de référence utilisée lors de la simulation.

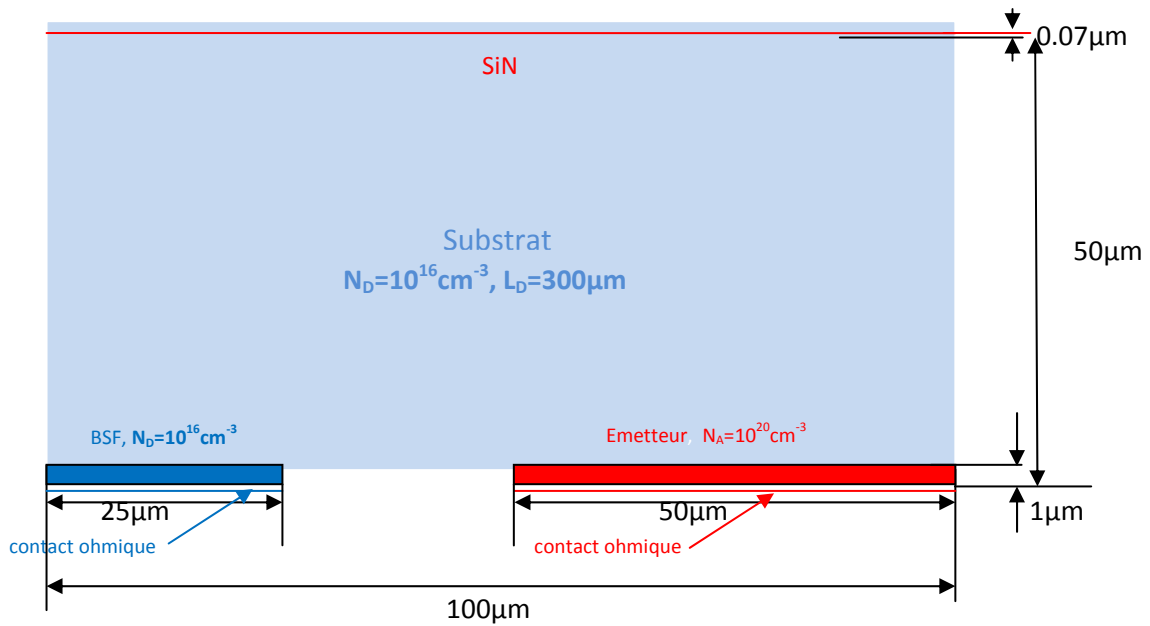


Figure III-2 : Structure et paramètres de la cellule simulée

II-2 : Paramètres de la structure simulée

Les paramètres de la cellule de référence sont donnés dans le tableau III-1 suivant :

Tableau III-1 : paramètres de la cellule simulée ^[Nichiporuk, 05].

substrat	
Dopage	$N_D = 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$
Longueur de diffusion	$L_D = 300\ \mu\text{m}$
Épaisseur	$W = 50\ \mu\text{m}$
Largeur de la structure	$L = 100\ \mu\text{m}$
Réflectivité arrière	90%
Couche antireflet	SiN avec une épaisseur $0.07\ \mu\text{m}$
Recombinaison face avant	$S_{0av} = 100\ \text{cm/s}$
Recombinaison face arrière	$S_{0ar} = 100\ \text{cm/s}$
texturisation	Non
Emetteur	
Dopage	$N_A = 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$
Demi - largeur de la zone dopée	$50\ \mu\text{m}$
Épaisseur	$1\ \mu\text{m}$
Demi - largeur du contact ohmique	$50\ \mu\text{m}$
Vitesse de recombinaison au contact	$S_e = 5.10^6\ \text{cm/s}$; $S_h = 3.10^6\ \text{cm/s}$
BSF	
Dopage	$N_D = 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$
Demi - largeur de la zone dopée	$25\ \mu\text{m}$
Épaisseur	$1\ \mu\text{m}$
Demi - largeur du contact ohmique	$25\ \mu\text{m}$
Vitesse de recombinaison au contact	$S_e = 5.10^6\ \text{cm/s}$; $S_h = 3.10^6\ \text{cm/s}$

II-3 Le maillage

Pour procéder à la simulation numérique, il est nécessaire de définir le maillage de la structure. L'outil ATLAS-SILVACO permet de définir les dimensions de la structure simulée, les paramètres des zones dopées (l'emplacement, le type, le niveau et le profil de dopage), de placer les contacts électriques sur la structure et de définir le maillage. Le maillage divise la structure simulée en petites cellules pour pouvoir résoudre les équations de poisson numériquement.

Pour assurer une bonne précision lors de la simulation, il faut avoir le maillage le plus fin possible. Malheureusement, si le maillage est très fin, on augmente le nombre d'éléments à calculer et par conséquent le temps de calcul est très long. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre le temps, et la précision de calcul. Pour cela on affine le maillage seulement au niveau des zones sensibles.

A cet effet nous avons procédé à la division de notre cellule photovoltaïque d'étude en 4 zones :

- face avant (a),
- zone de forte absorption (b),
- substrat et zones dopées (c),
- Face arrière (d).

Le maillage des zones (a) et (d) a été affiné pour avoir un calcul précis des pertes par recombinaison en surface. Celui de la zone (c) a été affiné en fonction du dopage. Ceci pour une meilleure définition des profils de dopage.

Les paramètres du maillage pour chaque région sont donnés dans le tableau III-2.

Tableau III-2 : paramètres de maillage

Région du maillage	Hauteur Max (μm)	Hauteur min (μm)	Largeur Max (μm)	Largeur min (μm)	Affinement Du maillage
Face avant (a)	0.005	0.005	2	0.01	Non
Zone de forte absorption (b)	0.1	0.05	2	1	Non
Substrat et zone dopée (c)	0.5	0.01	2	0.01	Oui
Face arrière (d)	0.005	0.005	2	0.01	Non

III- Présentation du logiciel SILVACO

Le Silvaco est un logiciel de simulation des dispositifs électronique il appartient au célèbre company américaine Silvaco-Tcad international, il est constitué d'une gamme d'outil de simulation formant ce qu'on appelle la VWF (virtuelle wafer fabrication).

III.1 La VWF: (virtual wafer Fab)

Parmi les différents logiciels qu'il forme la VWF on note les deux fameux les plus utilisé ATHENA et ATLAS, ces outils sont divisés en deux catégories principales.

- Outil principal
- Outil auxiliaire

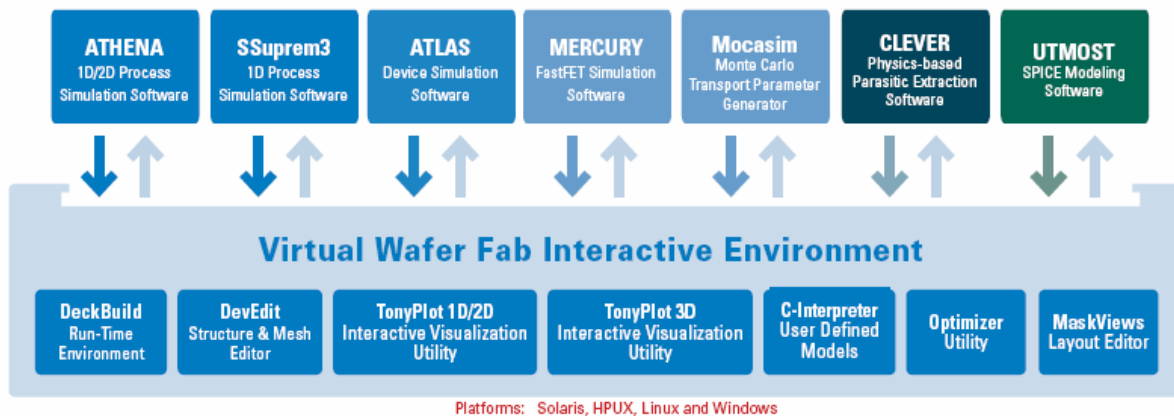


Figure III-3: La Virtual Wafer Fabrication [G. Baldomero, 07]

III.2 : ATHENA

C'est un logiciel de simulation y compris dans le silvaco et sert à la fabrication virtuelle des différente constituant d'un dispositif électronique, il traite la simulation comme une série d'événements consécutifs, et simule généralement en simultanéité avec Atlas

III.3 : ATLAS

C'est un logiciel de simulation traitant les systèmes (dispositifs) avec performance à base de 2D/3D et prédit le comportement électrique des structures des semi conducteurs divers, Il comprit une variété d'outils de simulation telle :

S-PISCES, BLAZE, GIGA, TFT, LUMINOUS, LASER, MIXEMODE, DEVICE3D, INTERCONNECT3D, THERMAL3D.

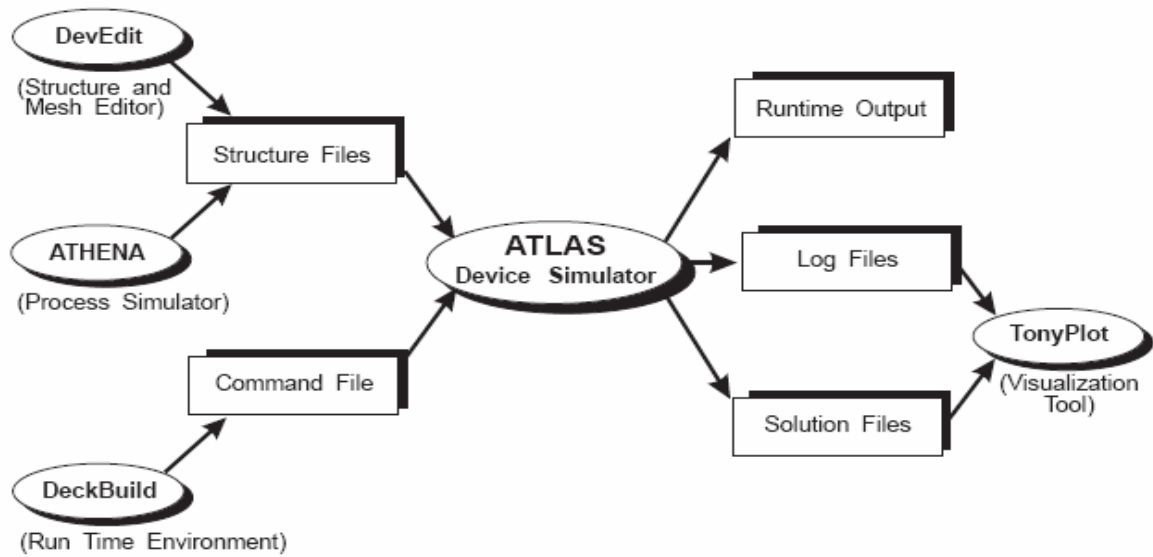


Figure III-4: les entrées et les sorties de Atlas [G. Baldomero, 07]

De plus amples explications de l'utilisation du logiciel vont être données en annexe.

Chapitre IV:

RESULTATS

ET

INTERPRETATIONS

Introduction

A partir de la cellule de référence décrite dans le chapitre précédent, nous avons tout d'abord fait varier le dopage du substrat puis le dopage et la profondeur de l'émetteur et finalement le dopage et la profondeur du BSF.

La simulation a été réalisée pour la cellule de référence définie au chapitre précédent (Substrat de type (n) et $L_D=300\mu\text{m}$). L'ensemble des variations est résumé dans le tableau IV.1.

Tableau IV-1 : Paramètres variables pendant la simulation

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
dopage du substrat	10^{15}cm^{-3}	10^{18}cm^{-3}
dopage de l'émetteur	10^{18}cm^{-3}	$5 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}$
épaisseur de l'émetteur	$0.1\mu\text{m}$	$4\mu\text{m}$
dopage du BSF	10^1cm^{-3}	$5 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}$
épaisseur du BSF	$0.5\mu\text{m}$	$4\mu\text{m}$

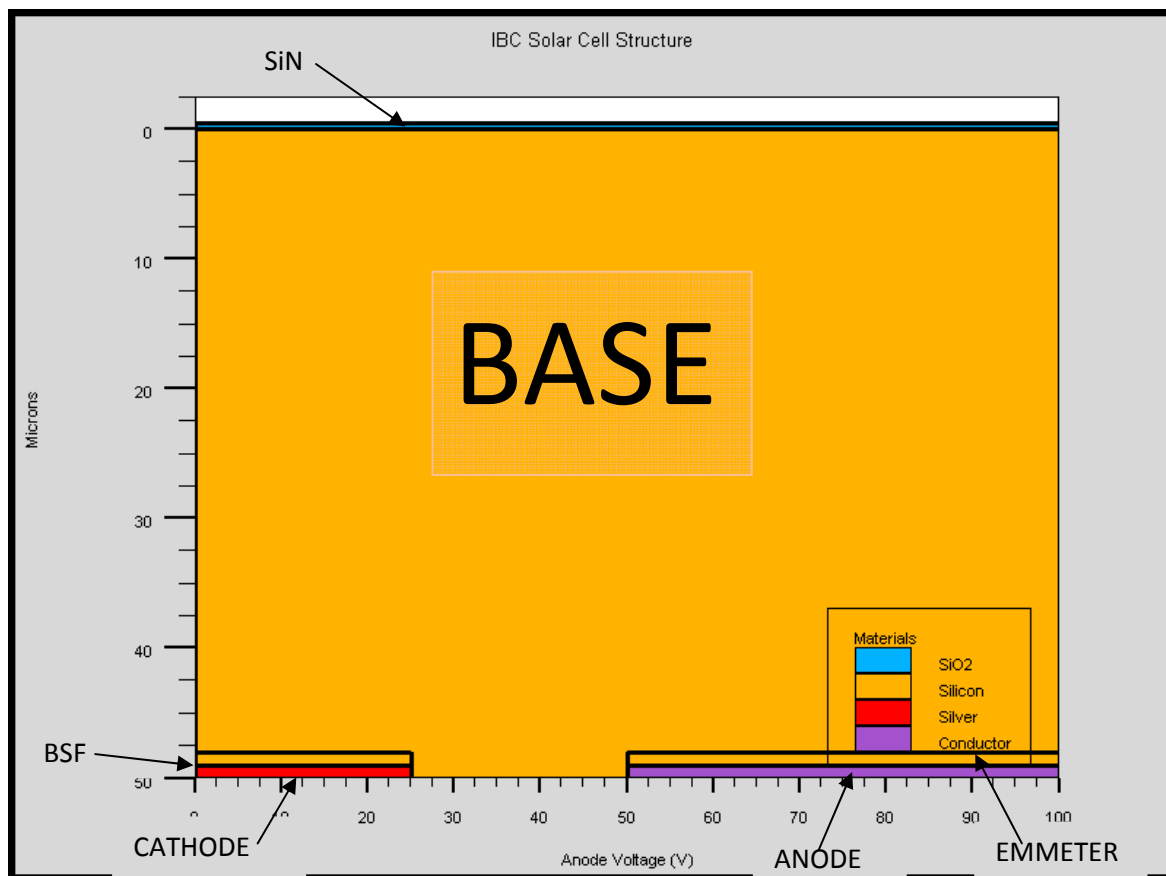


Figure IV-1 : Structure simulée sous SILVACO-Atlas

La figure IV-1 représente la structure de la cellule interdigitée simulée par Silvaco-Atlas. Elle est composée d'une couche antireflet à base de nitrure de silicium (SiN) d'épaisseur $0.07\mu\text{m}$, d'un substrat de type N avec une épaisseur égale à $50\mu\text{m}$ et une longueur de diffusion $L_D=300\mu\text{m}$. Elle est dopée à 1.10^{16}cm^{-3} , d'un BSF (Back Surface Field) épais de $1\mu\text{m}$ et dopé à 5.10^{19}cm^{-3} (coté gauche), et enfin d'un émetteur en face arrière épais de $1\mu\text{m}$ et dopé à 2.10^{20}cm^{-3} (coté droit).

I-Exploitation des résultats

I.1- caractéristique (I-V) de la structure non texturisée

La figure IV-2 représente la caractéristique (I-V) d'une cellule interdigitée non texturisée simulée par Silvaco-Atlas

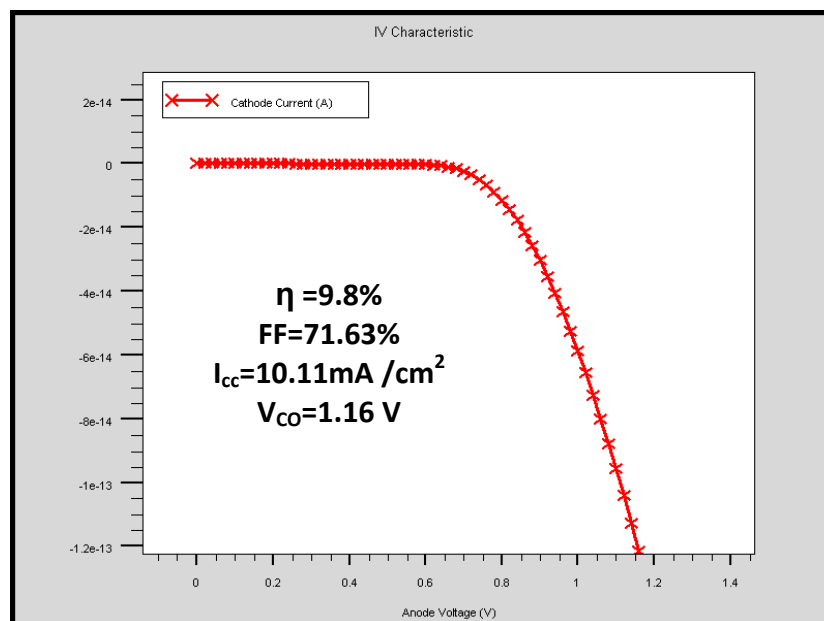


Figure IV-2 : caractéristique (I-V) de la cellule photovoltaïque non texturisée simulée.

Tableau IV-2 : Grandeurs physiques simulées et celles de la littérature.

	Littérature [Nichiporuk, 05] Structure Texturisé	Littérature [Nichiporuk, 05] Structure Non Texturisé(*)	Simulation par Silvaco Structure Non Texturisée
Rendement (η)	18.52%	9.19%	9.8%
Facteur de Forme (FF)	83.1%	71%	71.63%
Courant de CC (I_{CC})	35.39 mA /cm ²	10.08mA/cm ²	10.11mA /cm ²
Tension du CO (V_{CO})	0.63V	1.10mV	1.16 V

(*): Simulation de la structure de la littérature [Nichiporuk, 05] (texturisée) par PC1D pour obtenir une structure non texturisée équivalent pour la comparer avec nos résultats de simulation sous environnement Silvaco.

Nous remarquons sur la figure IV-2, que la forme de I-V est similaire à celle de la littérature.

Après calcul des grandeurs physiques (η , FF, I_{CC} et V_{CO}) de la structure texturisée [Nichiporuk, 05] par le PC1D et leur comparaison avec les grandeurs simulées de notre structure (cf. Tableau IV-2), nous remarquons qu'elles sont analogues.

I-2. Variation du dopage du substrat

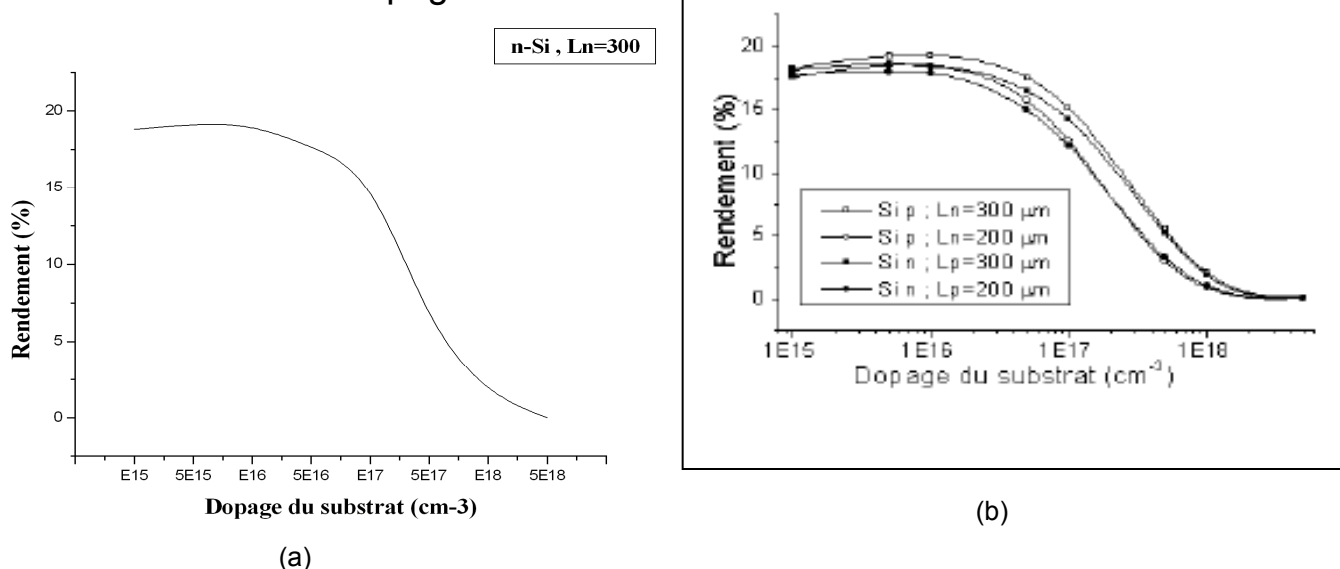


Figure IV-3 : Evolution du rendement de la cellule en fonction du dopage d'un substrat de qualité n-Si

(a) simulée

(b) littérature [Nichiporuk, 05]

On constate, d'après la figure IV-3, que le rendement varie d'une manière décroissante avec le dopage du substrat (type n). Il prend une valeur maximal égale

à 18.3 % pour un dopage de 10^{15}cm^{-3} est sa valeur minimale tend vers zéro pour un dopage égale à 510^{18} .

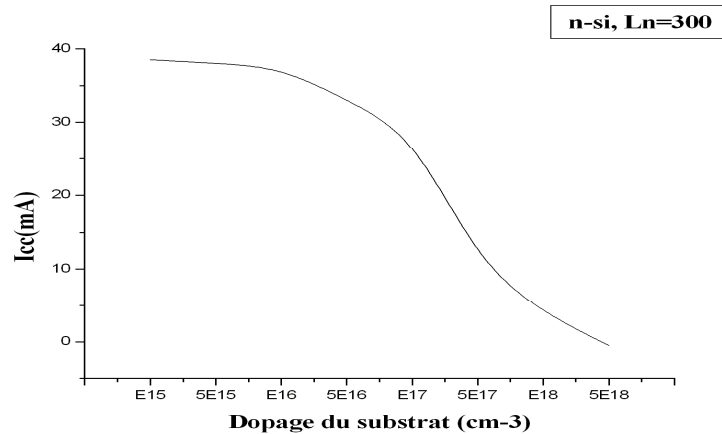


Figure IV-4 : Evolution du courant de court-circuit de la cellule en fonction du dopage d'un substrat de qualité n-Si.

On aperçoit sur la figure IV-4 que le rendement varie d'une manière décroissante avec le dopage du substrat (type n). Il prend une valeur maximale égale à 38mA pour un dopage de 10^{15}cm^{-3} est sa valeur minimale tend vers zéro pour un dopage maximal égal à 510^{18}cm^{-3} .

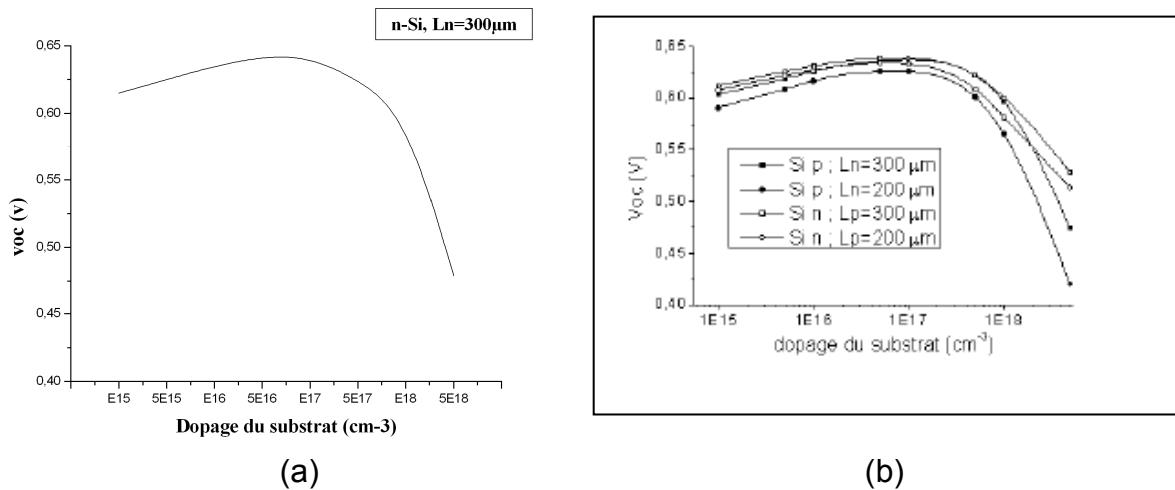


Figure IV-5 : Evolution de la tension du circuit ouvert de la cellule en fonction du dopage d'un substrat de qualité n-Si.

(a) simulée
(b) littérature [Nichiporuk, 05]

Nous avons tracé sur la figure IV-5 la variation de la tension du circuit ouvert en fonction du dopage du substrat (type n). Elle démarre avec une valeur égale à

0.617 v pour un dopage égale à 10^{15}cm^{-3} puis elle croit vers une valeur maximale égale à 0.63v pour enfin décroître vers une valeur minimale égale à 0.48v correspondant à un dopage maximal égal à 510^{18}cm^{-3} .

D'un point de vue théorique, l'augmentation du dopage du substrat provoque la dégradation de la durée de vie et celle de la mobilité des porteurs majoritaires ce qui implique l'augmentation des taux de recombinaison Schockley-Read-Hall et Auger. Cela entraîne une décroissance importante du rendement et de (I_{CC}) dans le cas de substrats fortement dopés. On voit clairement ceci dans les figures ci-dessus représentées.

Si le substrat est faiblement dopé (inférieur à 10^{15}cm^{-3}), 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 mauvaises.

I-3 Variation du dopage de l'émetteur

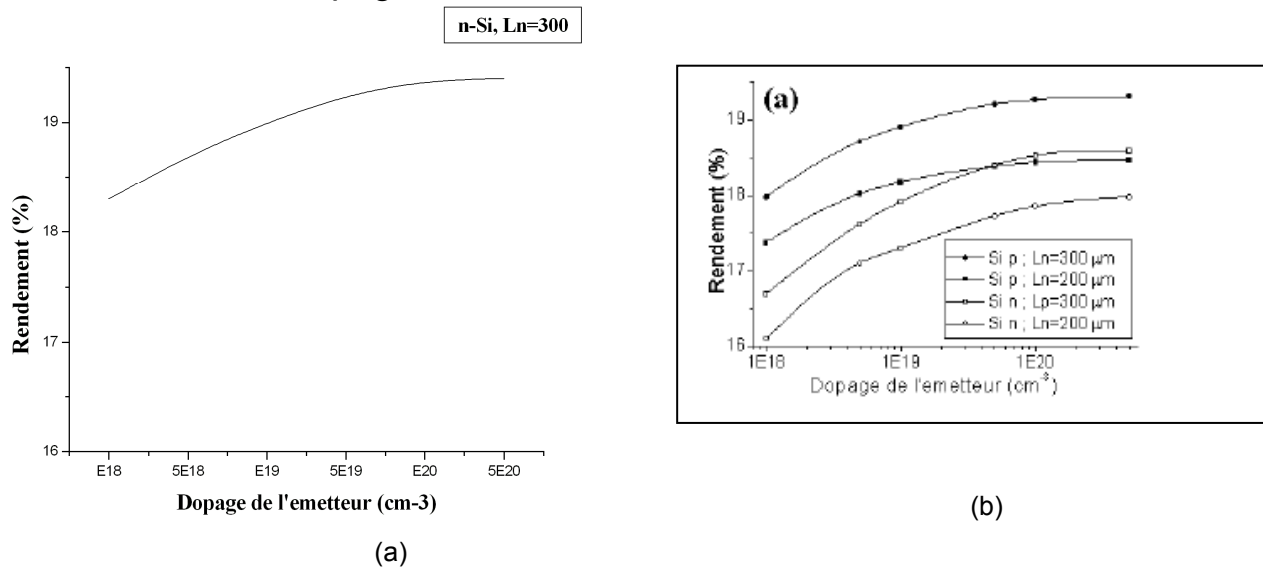


Figure IV-6 : Evolution du rendement de la cellule en fonction du dopage de l'émetteur pour un substrat de qualité n-Si.

(a) simulée

(b) littérature ^[Nichiporuk, 05]

L'architecture des cellules solaires interdigitée permet d'utiliser un niveau de dopage assez élevé de l'émetteur sans avoir de dégradation du rendement de la cellule.

On aperçoit sur la figure IV-6 que le rendement varie légèrement d'une manière croissante. Il commence à une valeur égale à 18.25% correspond à un dopage égal

à 10^{18}cm^{-3} et il termine avec une valeur égale de 19.2% pour un dopage maximal égal à 5.10^{20}cm^{-3} .

I-4 Variation de l'épaisseur de l'émetteur

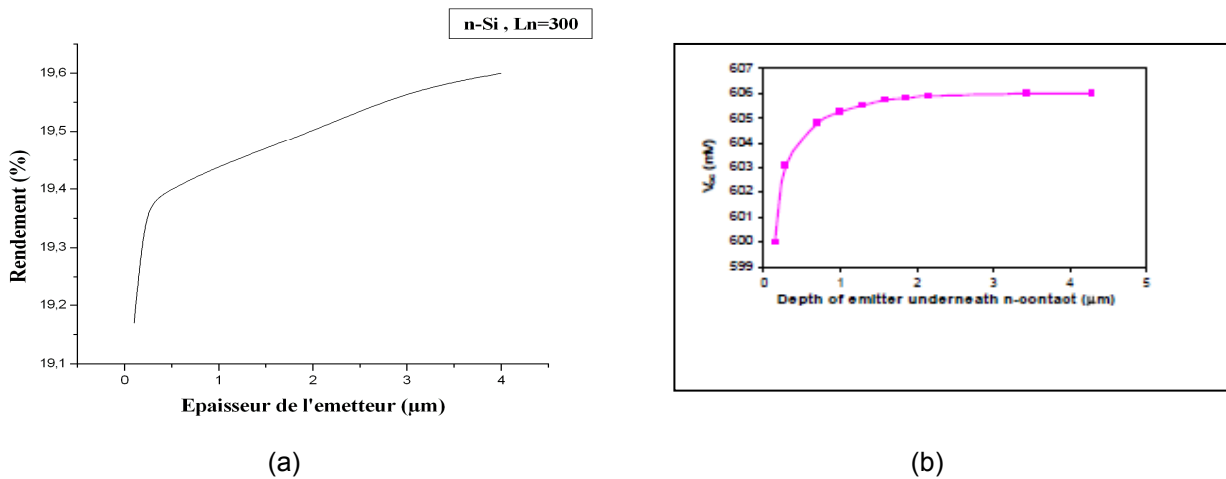


Figure IV-7 : Evolution du rendement de la cellule en fonction de l'épaisseur de l'émetteur pour les substrats n-Si.

(a) simulée

(b) littérature [M. M. Hilali et al, Advent Solar, Inc. NM 87106]

On constate d'après la figure IV-7 que l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur, provoque une amélioration rapide du rendement jusqu'à la valeur 19.37% et puis il continue sa croissance d'une manière un peu lente vers une valeur finale égale à 19.6% correspondant à une épaisseur maximale égale à 4 μm .

I-5 Variation du dopage du BSF

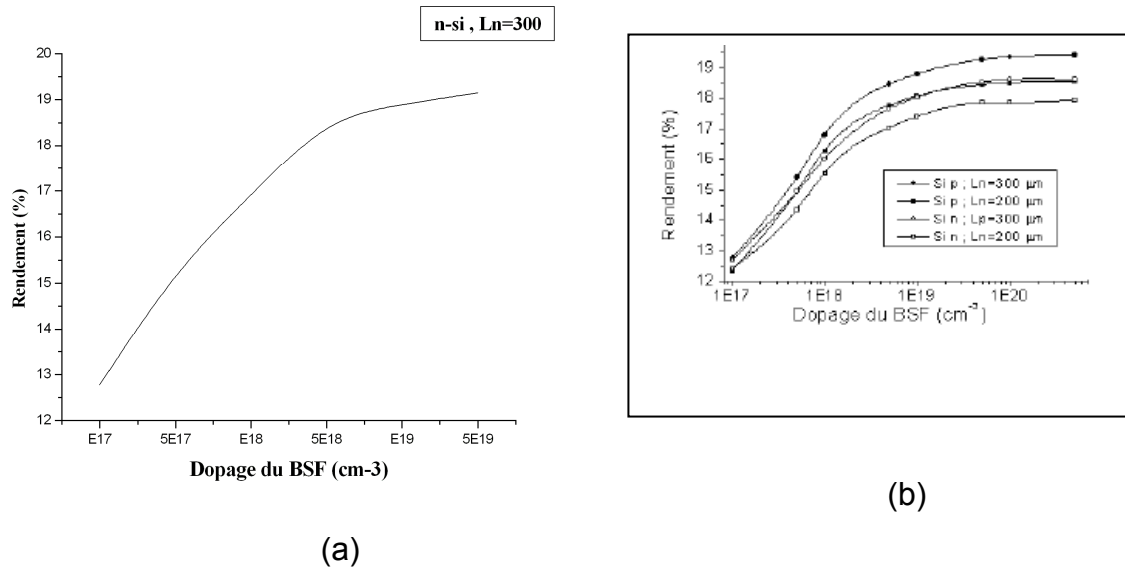


Figure IV-8 : Evolution du rendement, de la cellule en fonction du dopage du BSF pour les substrats n-Si (a) simulée, (b) littérature ^[Nichiporuk, 05].

L'augmentation du niveau de dopage du BSF donne une amélioration importante de toutes les caractéristiques de la cellule. Comme pour l'émetteur, la recombinaison dans le BSF est très faible étant donné son emplacement sur la face arrière de la cellule. De plus, un BSF fortement dopé permet de réduire la recombinaison au niveau du contact métal semi-conducteur.

On aperçoit d'après la figure IV-8 que le rendement croit de façon presque logarithmique avec le dopage du BSF. Il commence par la valeur initiale 12.75% correspondant à un dopage égal à 10^{17} cm^{-3} et il se termine par un seuil égal à 19%.

Dans le cas du «fort» BSF (fortement dopé) pratiquement tous les électrons sont repoussés par le BSF du contact au substrat. Par contre, dans le cas du «faible» BSF (faiblement dopé), les électrons générés au dessus du contact du substrat rentrent dans le contact p+ et pas dans l'émetteur.

I-6 Variation de l'épaisseur du BSF

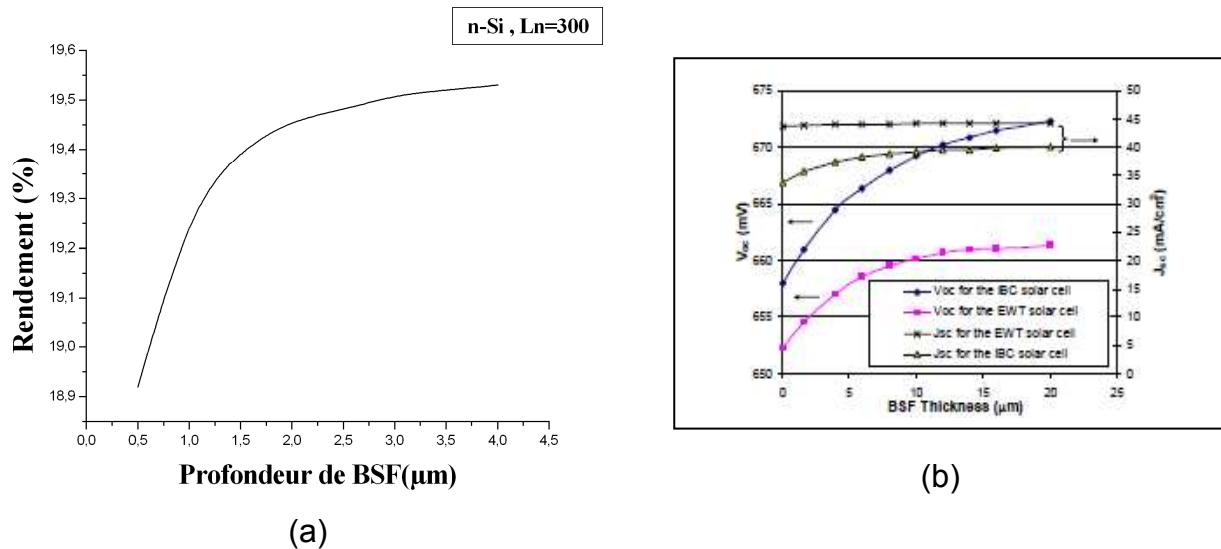


Figure IV-9 : Evolution du rendement en fonction de la profondeur du BSF pour un Substrat de qualité n-Si.

(a) simulée

(b) littérature [M. M. Hilali et al, Advent Solar, Inc. NM 87106]

On constate sur la figure IV-9 que la variation du rendement en fonction de la profondeur de BSF est la même que celle du rendement en fonction du dopage. Il commence par la valeur initiale 18.91% correspondant à 0.5μm de profondeur et il se sature à une valeur égale à 19.54%.

Habituellement le BSF, dans les cellules solaires, est réalisé par formation d'un alliage entre le silicium et l'aluminium, par exemple par Recuit Thermique Rapide (Rapid Thermal Annealing, RTA) du contact p-Si/Al. Les valeurs du dopage et de la profondeur du BSF, obtenues par cette méthode sont de l'ordre de : $NA(\text{BSF}) \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$ et $d_{\text{BSF}}=0,3\text{-}3\mu\text{m}$ [1].

L'épaisseur du BSF doit être importante pour assurer une réduction de la recombinaison sur le contact au substrat. On constate également que la recombinaison dans le BSF ne joue pas un rôle important, même pour une épaisseur de 4μm.

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence des paramètres des cellules solaires interdigités sur leur rendement à l'aide de la simulation numérique en 2D.

Le but de cette étude est de chercher les paramètres géométriques des cellules et les dopages qui donnent un rendement maximal.

Nous avons trouvé que pour certains paramètres comme l'épaisseur du substrat, le dopage du substrat et de l'émetteur, les valeurs optimales existent.

Il a été démontré que les cellules solaires interdigitées sont beaucoup plus sensibles à la recombinaison en face avant et à la longueur de diffusion des porteurs minoritaires que les cellules solaires conventionnelles (biface). Ceci en raison de l'emplacement des contacts ohmiques sur la face arrière de la cellule solaire interdigitée. La plupart des porteurs photogénérés doivent traverser tout le substrat pour être collectés. La recombinaison en surface et la longueur de diffusion sont donc les paramètres clés pour le fonctionnement de la cellule photovoltaïque à contacts arrière. Par conséquent, une bonne passivation de la surface et un substrat de bonne qualité sont nécessaires pour avoir un bon rendement.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE

ET PERSPECTIVES

A travers cette étude, nous avons décrit les cellules photovoltaïques interdigitées à contacts arrière (IBC) en procédant à une simulation bidimensionnelle par le logiciel « Silvaco-Atlas ».

Notre travail a été mené de la façon suivante :

Dans le premier chapitre on a exposé des généralités concernant les cellules photovoltaïques conventionnelles, leur principe de fonctionnement, les différents types et technologies, et les facteurs limitant leurs rendements, ce dernier dégrade progressivement avec les Pertes optiques, résistives ainsi qu'avec les Recombinaisons volumiques, surfaciques et au niveau des contacts.

- Le second chapitre est dédié aux cellules photovoltaïques interdigitées à contact arrière, caractérisant par leur forme esthétique et leurs avantages marquant dans L'absence de jonction et contact au face avant, l'absence d'ombre des contacts qui sont déplacé à la face arrière ; se qui favorise une augmentation remarquable au niveau de la rentabilité électrique. Leur inconvénients ainsi que la technologie de fabrication sont mentionnés.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de la structure référence tirée dans la littérature, qui nous a permis d'avoir des valeurs réels concernant les grandeurs physiques qu'ils caractérise notre système et de caler notre simulateur par des modèles physiques concrets et mettre des affinements exacte sur notre structure. nous avons aussi présenté succinctement le logiciel silvaco dans cette partie. Par ailleurs nous essayerons d'écrire un code fiable de calcule sur silvaco ; marquant que nous avons rencontré une difficulté de simuler les structure texturisées. Pour résoudre ce problème nous savons fait appel à la simulation du modèle théorique de la littérature ^[Nichiporuk, 05] par PC1D pour passé à une structure non texturisée et la comparer à celle simulé par silvaco.

- Dans le quatrième chapitre nous avons exposé et commenté les résultats obtenus, en les comparants à ceux de la littérature. Nos résultats sont probants et

notre code de calcul du simulateur est fin près à la prédiction des paramètres physique et géométrique des structures interdigitées non texturisées à deux démentions.

Pour ce qui est des perspectives, nous espérons dans l'avenir approfondir ce domaine prometteur en effectuant une simulation tridimensionnelle en faisant varier d'autre paramètres telle que la vitesse de recombinaison la réflectivité, les dimensions et les résistances des contacts et élargir le modèle physique à des effets quantique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[Aflatooni K., 11]: Koorosh Aflatooni, Virtual Wafer Fab (VWF) Framework from Silvaco,
http://www.ee.byu.edu/support/silvaco/pdfs/athena/at_toc.pdf, mars 2011.

[Baldomero G, 07]: Baldomero Garcia, Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco atlas, thèse, 2007, U. Monterey, California.

[CAZARRE A., 05] : A. CAZARRE et al, Initiation à la simulation bidimensionnelle environnement SILVACO (Athéna – Atlas), Université Paul SABATIER TOULOUSE III, J3eA - Vol. 4 (2005) DOI : 10.1051/bib-j3ea:2005015, pp (1, 12).

[Crespin, 04]: Aaron L. Crespin, A novel approach to modeling the effects of radiation in gallium-arsenide solar cells using Silvaco's Atlas software, thèse, 2004, U. Monterey, California.

[Damon-Lacoste J., 07] : Jérôme Damon-Lacoste, Vers une ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonctions a-Si:H/c-Si. Rôle prépondérant de l'hydrogène, Thèse, 2007, *Laboratoire LPICM*, École polytechnique France.

[Desrues, 09] : Thibaut DESRUES, Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière, 2009, thèse, INSA Lyon.

[Fuller L., 10]: L. Fuller, 2D Process Modeling with Silvaco ATHENA, Webpage: <http://people.rit.edu/lffeee>, Microelectronic Engineering, Rochester Institute of Technology 82 Lomb Memorial Drive Rochester, NY 14623-5604, 11-15-2010 silvaco.ppt, mars 2011.

[Granek P., 09]: Philip Granek, High-efficiency back contact back-junction silicon solar cells, thèse, 2009, Universität Freiburg im Breisgau.

[Hilali M., 06]: Mohamed M. Hilali et al, Two-dimensional modeling of EWT multicrystalline silicon solar cells and comparison with the ibc solar cell, Advent Solar, INC,
http://www.solarsemiconductor.ca/Modeling_of_Silicon_Solar_Cells_2006.pdf, Mars 2011.

[Kim D. S., 06]: Kim, D. S., Meemongkolkiat, V., Ebong, A., Rounsaville, B., Upadhyaya, V., A. Das & Rohatgi, A., "2D-Modeling and development of interdigitated back contact solar cells on low-cost substrates", Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaics, Hawaii, May 8-12, 2006

[King L., 96] : David L. King et al, A Simulation Program for Photovoltaic Cells, Modules, and Arrays, Journal IEE, Vol 26 , pp 1295-1297, (1996).

[Koduvelikulathu I. J., 11] : I. J. Koduvelikulathu et al, 2-D modeling of n-type IBC solar cells using Silvaco Atlas simulation, 11th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, NUSOD, ROME, (2011).

[Lush G.B., 04]: G.B. Lush et al, Fabrication, characterization, and simulation of solar cells, Meeting DOE Solar Energies Technologies, October 25-28, 2004, Denver Marriott Tech Center, Colorado, USA.

[Meijun Lu, 07]: Meijun Lu et al, a-si/c-si heterojunction for interdigitated back contact solar cell, Journal IEE, Vol 22, pp 20-23, (2007).

[Meijun Lu, 08] : Meijun Lu et al, Rear surface passivation of interdigitated back contact silicon heterojunction solar cell and 2d simulation study, Journal IEE, Vol 33, pp 11-16, (2008).

[Michalopoulos, 02]: Panayiotis Michalopoulos, A novel approach for the development and optimization of state-of-the-art photovoltaic devices using silvaco, thèse, 2002 U. Monterey, California.

[Nichiporuk, 05] : Nichiporuk Oleksiy, Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigitées, thèse, 2005, INSA Lyon.

[Padmanabhan, 08]: Balaji Padmanabhan, Modeling of solar cells, thèse, 2008, Arizona state university.

[Pape, 07] : Pierre Pape, Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigitées sur substrats minces en silicium cristallin, thèse, 2007, INSA Lyon.

[Radbeh, 08] : Roshanak Radbeh, Réalisation et caractérisation de cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones, thèse, 2008, université de Limoges.

[Silvaco_Atlas, 04]: Silvaco Copyright 2004 Atlas User's Manual by SILVACO_PACK2013D1F, SILVACO International, Device Simulation Software September 2004.

[Silvaco_Athena, 09]: Guide to using TCAD Version Windows 2005 Santa Clara, Silvaco international by SILVACO_PACK20133411Z, September 16, 2009. www.silvaco.com.

[Silvaco_TCAD_vwf, 99] : Installation, Migration and Troubleshooting Guide Windows version, SILVACO International Copyright 1999, 4701 Patrick Henry Drive, Building Santa Clara, CA 95054, Internet: www.silvaco.com

[Silvaco, 08] : Simulation Standard,(A Journal for Process and Device Engineers), Simulating Solar Cell Devices Using Silvaco TCAD Tools, Volume 18, Number 2, April, May, June 2008, pp (1-3).

[Spee D.A., 08]: D.A.Spee, Preparations for making back contacted heterojunction solar cells, MSc, USA, thesis, 2008.

[Stangl R., 07]: R. Stangl et al, Afors-HET 3.0: first approach to a Two-dimensional simulation of solar cells, Hahn-Meitner-Institute Berlin, Kekuléstr.5, D-12489 Berlin, 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3-7 September 2007, Milan, Italy

[Van Kerschaver E., 06] : Emmanuel Van Kerschaver et al ,Back-contact Solar Cells, Appl. 2006, A Review, IMEC vzw, Kapeldreef 75, B-3001 Heverlee, Belgium, pp(3,4).

[Vasileska, 11]: Dragica Vasileska (Associate Professor at Arizona State University), Introduction to Silvaco ATLAS, www.nano hub.org, mars 2011.

[Veschetti, 05] : Yannick Veschetti, Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince, thèse, 2005, U Strasbourg.

[Wang T.H., 02] : T.H. Wang et al, Two-Dimensional Simulations of Thin-Silicon Solar Cells, National Renewable Energy Laboratory 1617 Cole Blvd., Golden, CO 80401, NREL/BK-520-32717, August 2002, pp(1, 3).

Annexe

I : présentation du logiciel « silvaco »

Le Silvaco est logiciel de simulation des dispositifs électronique crée par la compagnie américaine Silvaco-Tcad international, il est constitué d'une gamme d'outils de simulation formant ce qu'on appelle la VWF (virtuelle wafer fabrication).

I.1: VWF (Virtual Wafer Fab)

La VWF et une abréviation anglaise signifie la fabrication virtuelle des substrats, elle se compose d'une série de simulateurs notant parmi lesquelles ATHENA et ATLAS. On peut diviser ces outils on deux catégorie : principales et auxiliaire.

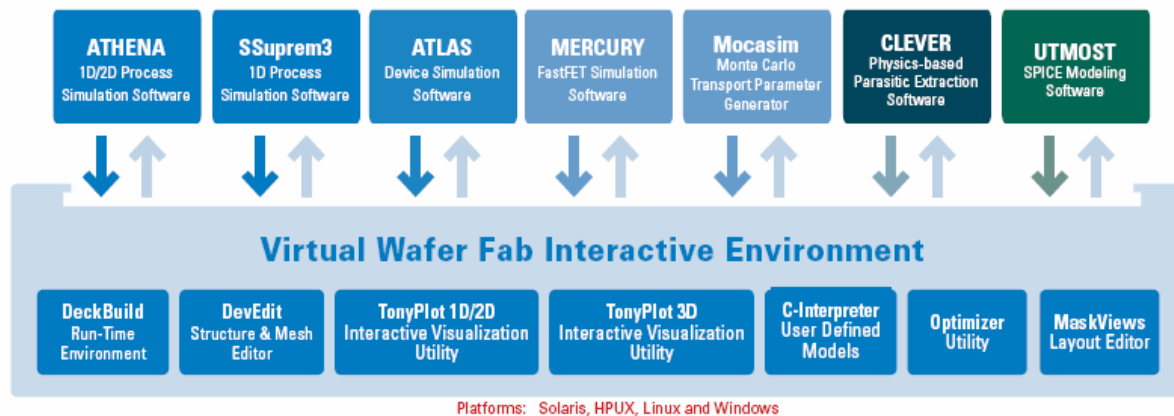


Figure (A-1): La VWF du Silvaco [G. Baldomero, 07]

I.2 : ATHENA

C'est un logiciel de simulation y compris dans le silvaco et sert à la fabrication virtuelle des différente constituant d'un dispositif électronique, il traite la simulation comme une série d'événements consécutifs, et simule généralement en simultanéité avec Atlas

I.3 : ATLAS –(statement)

C'est un logiciel de simulation traitant les systèmes (dispositifs) avec performance à base de 2D/3D et prédit le comportement électrique des structures des semi conducteurs divers, Il comprit une variété d'outils de simulation telle

S-PISCES, BLAZE, GIGA, TFT, LUMINOUS, LASER, MIXEMODE, DEVICE3D, INTERCONNECT3D, THERMAL3D. S-PISCES, BLAZE, GIGA, TFT, LUMINOUS, LASER, MIXEMODE, DEVICE3D, INTERCONNECT3D, THERMAL3D.

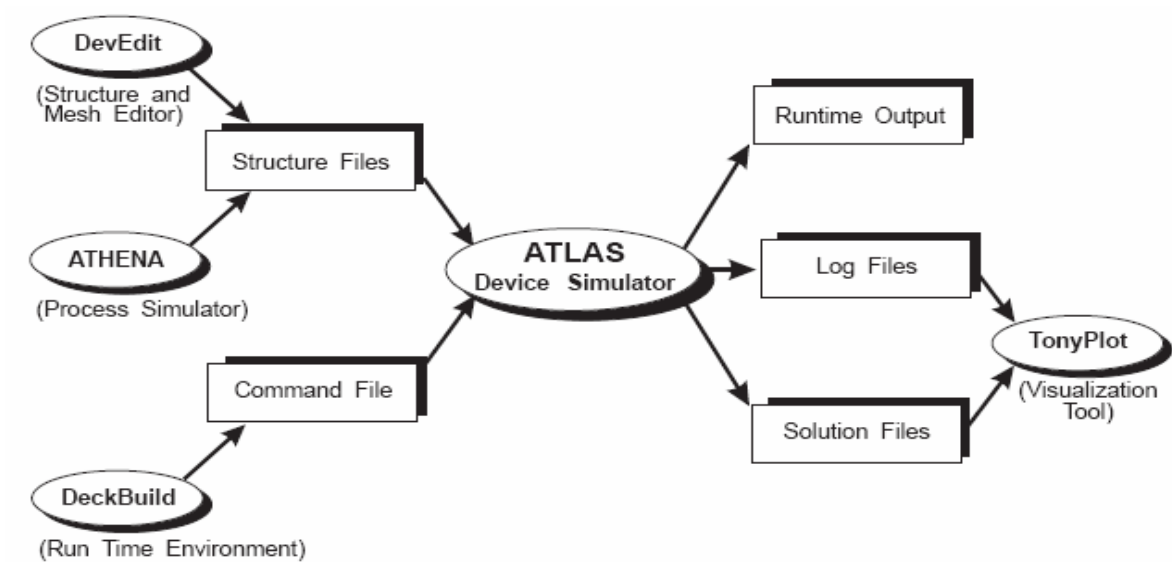


Figure Figure (A-2): les chemins d'entrés et de sortie de Atlas [G. Baldomero, 07]

<i>Group</i>		<i>Statements</i>
1. Structure Specification	—————	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material Models Specification	—————	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical Method Selection	—————	METHOD
4. Solution Specification	—————	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results Analysis	—————	EXTRACT TONYPLOT

Figure Figure (A-3): Les commandes d'Atlas [G. Baldomero, 07]

La forme des instructions des fichiers d'entrée à Atlas est:

<STATEMENT> <PARAMETER> = <VALUE>

Le paramètre peut être: réel, entier, caractère ou logique, l'ordre dans laquelle elle s'exécute est :

I.3.1 Structure statement

MESH, REGION, ELECTRODE, DOPING

I.3.2 material statement : spécification du Matériel et modèle

MATERIAL, MODELS, CONTACT, INTERFACE

I.3.3 Method statement : Sélection de la méthode numérique

METHOD

I.3.4 solution statement : la spécification des Solution

LOG, SOLVE, LOAD, SAVE

I.3.5 : Analyse des résultats :

EXTRACT, TONYPLOT

Les fichiers d'entrées sont criés en utilisant le DeckBuild Command Menu:

I.4 : Dekc build command Menu : [site web, nano HUB.org]

I.4.1-MESH : Spécification de la Structure :

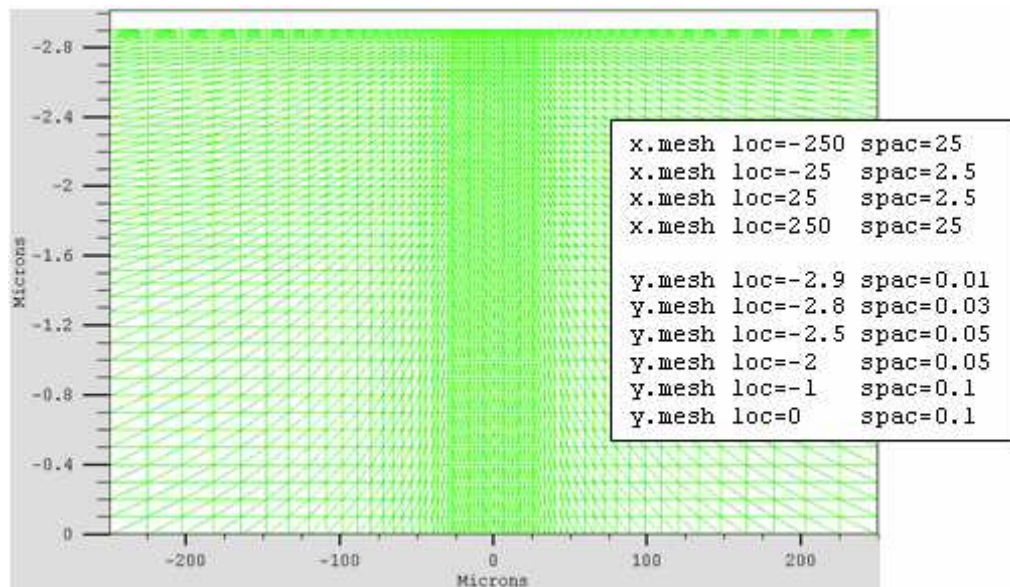


Figure (A-4):La structure dans Atlas [G. Baldomero, 07]

INFILE: fichier avec grille enregistré précédemment.

OUTFILE : fichier de sortie

SPACE.MULT : Facteur scaleur appliquée à toute l'espace de la grille spécifié .

CYLINDRICAL, RECTANGULAR : décrit la symétrie de la grille

NX, NY : nombre de nœuds le long de x et y direction.

Ex : Mesh $n_x=36$ $n_y=30$

I.4.2-X.MESH, Y.MESH:

Instructions indiquez l'emplacement du quadrillage le long des axes x et y.

NODE : spécifie l'index de la ligne de grille.

LOCATION : spécifie l'emplacement de la ligne de la grille.

RATIO : ratio à utiliser lors de lignes de la grille d'interpolation entre des lieux donnés.

SPACING : Précise l'espacement du maillage à un endroit donné

Ex : x.mesh $l_{oc}=0.0$ spacing=0.2, X.mesh $l_{oc}=0.85$ spacing=0.01, X.mesh $l_{oc}=2$ spacing = 0.3

I.4.3-ELIMINATE statement:(Éliminé)

Relevé tous les points du maillage secondes dans une grille rectangulaire spécifiée

par : X.MIN, X.MAX, Y.MIN and Y.MAX

COLUMNS, ROWS : l'élimination des lignes et Colonnes,

Ex : eliminate x.min=0 x.max=4 y.min=0 y.max=3

I.4.4-REGION : statement - Indique les régions et les matériaux considérer

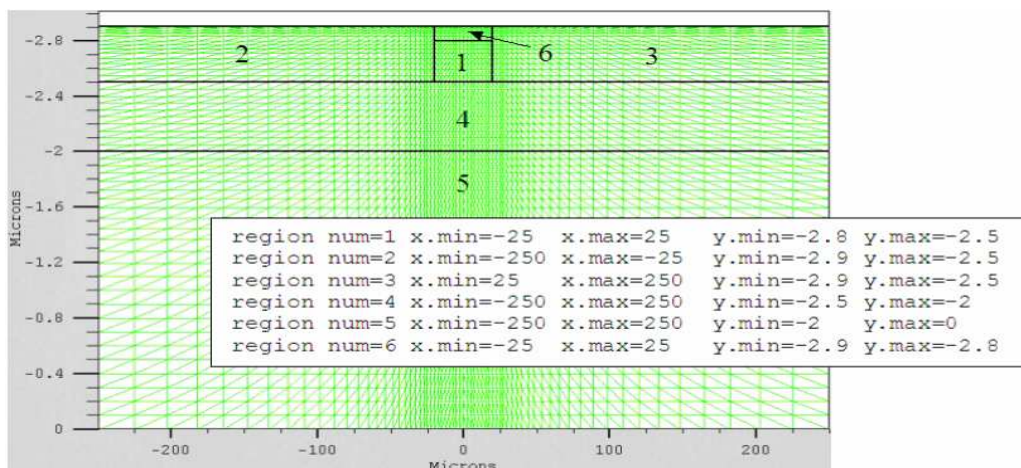


Figure (A-5): régions de la structure dans Atlas [G. Baldomero, 07]

Number : désigne le numéro de région

material : silicium, l'oxyde...etc

position : définit l'emplacement de la région.

EX : region num=1 ix.lo=1 ix.hi=25 iy.lo=1 iy.hi=20 silicon, region num=1 y.max=0 oxide, region num=2 y.min=0 silicon

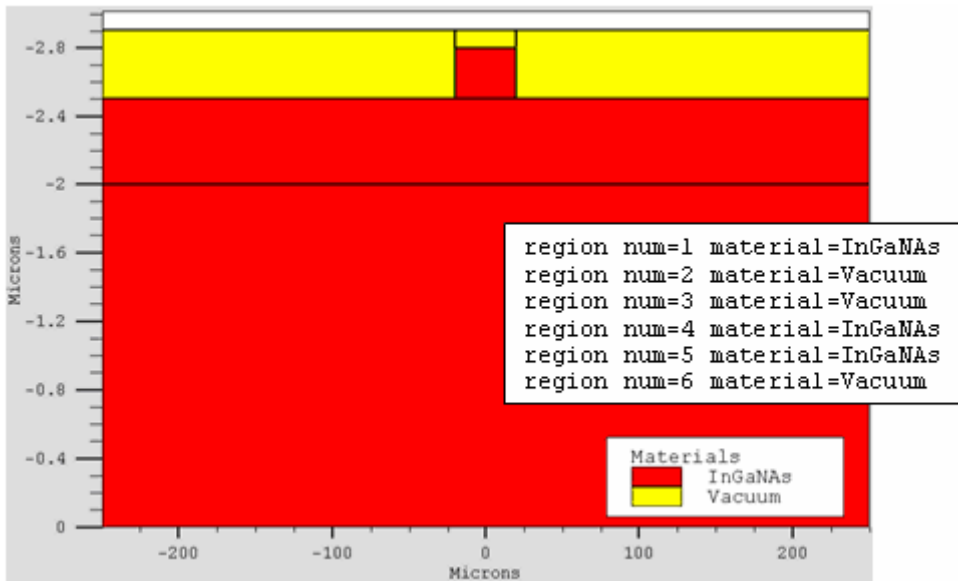
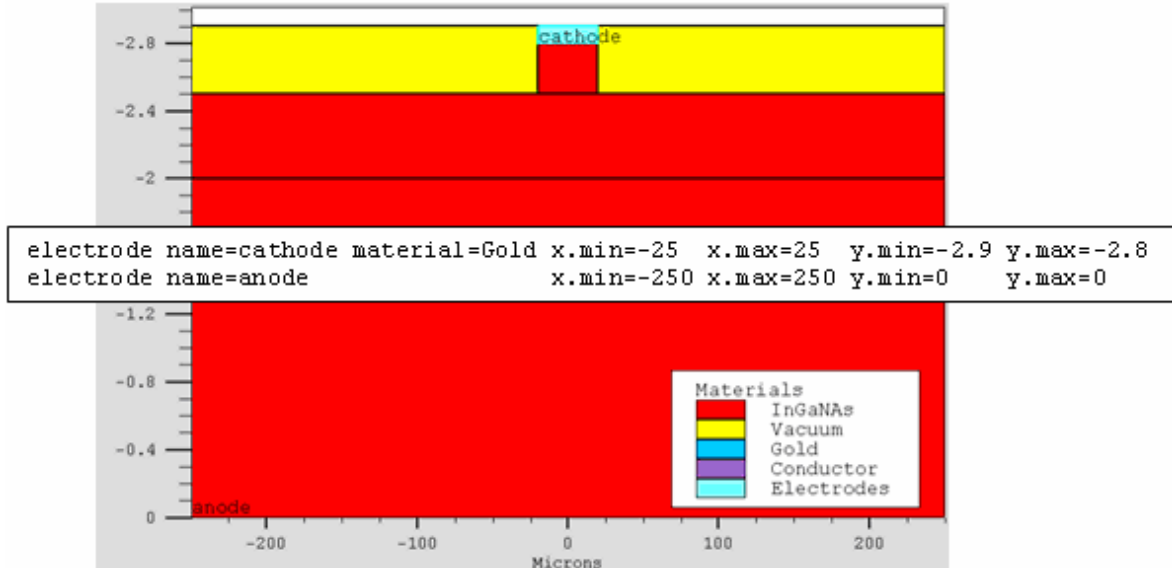


Figure (A-6): matériel et region dans Atlas [G. Baldomero, 07]

1.4.5 –ELECTRODE statement : doit préciser au moins une électrode dans le domaine de la simulation.



Fig

Figure (A-6): les électrodes dans Atlas [G. Baldomero, 07]

Name : définit le nom de l'électrode: SOURCE, DRAIN, GATE

position parameter :(position du paramètre)

(BOTTOM(BAS), LEFT(GAUCHE), RIGHT(DROITE), TOP(HAUT), SUBSTRATE

(substrat).

I.4.6-DOPING: statement : Instruction utilisée pour définir le profil de dopage

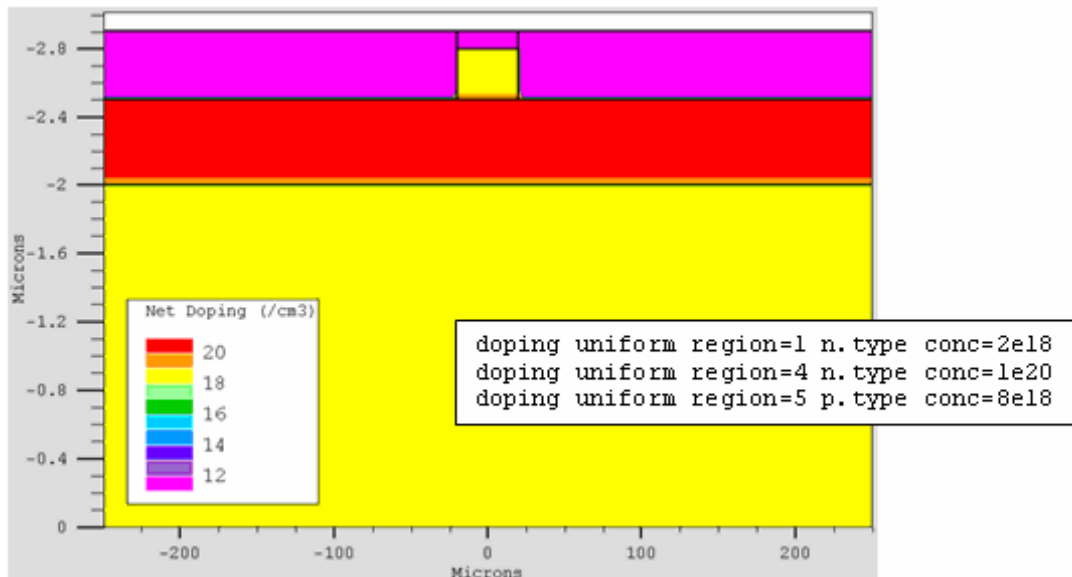


Figure (A-7): le dopage avec Atlas [G. Baldomero, 07]

Analytiquement le profil de dopage est défini avec les paramètres suivants:

Distribution type : UNIFORME, GAUSSIEN (type de la distribution).

Doping type : type n, type p (type de dopage)

CONCENTRATION : spécifié le pic de la concentration pour le Profil Gaussien .

CHARACTERISTIC : longueur caractéristique principale

PEAK : spécifie la localisation du pic d'un profil gaussien.

Position REGION : X.LEFT (GAUCHE), X.RIGHT (DROITE),

Ex: doping uniform concentration=1E16 n.type region=1, Doping Gaussian concentration=1E18 characteristic=0.05 \p.type x.left=0 x.right=1.0 peak=0.1

Définition d'un bon maillage est une question cruciale dans les simulations des systèmes. Il ya plusieurs facteurs qui doivent être prises en compte lors de la position de la grille notant :

Precision : grille fine est nécessaire pour résoudre correctement la structure

Efficacité : pour terminer la simulation dans un délai raisonnable, moins de points de la grille doit être utilisé, les zones critiques dans la grille est nécessaire comprennent: les régions de déplétion: les régions de champ électrique élevé ,les interface Si/SiO₂ ; émetteur / base et les zone de recombinaison.

I.4.7-REGRID statement : instruction permet la création d'une grille fine dans les zones périphériques critiques. Cette instruction est utilisée après les instructions MESH, REGION, LE MATÉRIEL, ELECTRODE, et DOPAGE.

Il ya deux façons de remaillage peut se faire: regrid sur DOPAGE, regrid en utilisant des variables : SOLUTION

I.4.8-CONTACT statement:

Nom: spécifie le nom du contact: GRILLE, DRAIN, ANODE...

EX: contact name=gate n.polysilicon, contactname=drain, current,contact name=drain resistance=40.0 \

I.4.9-MATERIAL : statement :

Atlas fournit également une liste par défaut des paramètres pour les propriétés du matériaux utilisé dans la simulation,par exemple: affinité électronique, l'énergie de bande interdite, la densité d'états, la vitesse de saturation, la durée de vie des porteurs minoritaires, le coefficients d'ionisation par impact, etc

REGION :statement : spécifie le nombre de région à laquelle décrits ci-dessus Parameters(Paramètre) Certains des paramètres les plus couramment utilisés sont : AFFINITY, EG300, MUN, MUP, NC300, NV300, Permittivité, TAUN0, TAUP0, VSATN, VSATP.

EX :material taun0=5.0E-6 taup0=5.0E-6 mun=3000 \ mup=500 region=2,material material=silicon eg300=1.2 mun=1100.

I.4.10-INTERFACE statement – INTERFACE instruction - Indique la densité de charge interfaciale et la vitesse de recombinaison à la surface pour les électrons et les trous (QF, S_n, S_p).

Ex : interface qf=3E10 x.min=1. x.max=2. y.min=0. y.max=0.5, interface y.min=0 s.n=1E4 s.p=1E4.

I.4.11-MODELS and IMPACT : statement : (instructions MODELE) :

Les modèles physiques qui sont spécifiés avec l'instruction modèles et IMPACT comprennent :

- Mobility model :(la mobilité modèle)
CONMOB, ANALYTIC, ARORA, FLDMOB, TASCH, etc.
- Recombination models : (modèles de recombinaison)
SSR, CONSRH, AUGER, OPTR .
- Carrier statistics : statistiques des porteurs électriques (BOLTZMANN, FERMI, INCOMPLETE, IONIZ, BGN)
- Impact ionization ; CROWELL, SELB
- Tunneling model :(modèle d'effet tunnel) FNORD, BBT.STD (bande à bande - transitions directe) BBT.KL (directe et indirecte transitions) HEI and HHI (l'injection des électrons et trous chaud).

D'autres paramètres importants qui peuvent être spécifiées dans l'instruction modèles incluent :

- NUMCARR : indique le nombre des porteurs, spécifié (électrons, trous ou les deux)
MOS, BIPOLAR modèle standard utilisé pour les MOSFET et les bipolaires .
EX :models MOS numcarr=1 hole ,models BIP print.

I.4.12-METHOD statement – Instruction de méthode indique Les méthodes numériques qui sont utilisé dans la simulation par exemple :

- GUMMEL :Elle résout l' équations de manière séquentielle, en fournissant de convergence linéaire.elle est utile quand il y a un faible couplage entre les équations qui en résultent..
- NEWTON : Fournit la convergence quadratique, et doit être utilisé dans le cas d'un couplage fort entre les équations résultante.
- BLOCK NEWTON : plus efficace que la méthode de Newton ;

Method gummel block newton

Method carriers=0

On peut également modifier les paramètres pertinents pour la procédure de résolution numérique:

- CLIMIT.DD : Spécifie la valeur minimale de la concentration à être résolu par le solveur. CLIMIT.DD:
- DVMAX : Maximale potentielle mise à jour par itération, sa valeur par défaut est de 1V.

I.5 : procédures de solution

ATLAS permet à quatre différents types de solutions à calculer: DC, AC, petit signal et les solutions transitoires.

I.5 .1: DC procedures solution and statements (les procédure de solution DC)

Une solution stable DC est obtenue avec deux étapes de procédures :

- Trouver une bonne estimation initiale par la résolution de cas d'équilibre (estimation initiale est trouvée en fonction de la densité locale du dopage)
solve init
- Étape de la tension sur une électrode donnée pour une solution convergente:
solve vcollector=2.0

solve vbase=0.0 vstep=0.05 vfinal=1.0 name=base

Pour résoudre les problèmes avec estimation initiale, on peut utiliser le TRAP statement (instruction TRAP, où MAXTRAPS) est le maximum autorisé de nombre d'essais (valeur par défaut est 4)

Pour générer une famille de courbes, on utilise les commandes suivantes :

Solve vgate=1.0 outf=solve_vgate1

Solve vgate=2.0 outf=solve_vgate2

Load infile=solve_vgate1 log outfile=mos_drain_sweep1 \

Solve name=drain vdrain=0 vfinal=3.3 vstep=0.3

Load infile=solve_vgate2 log outfile=mos_drain_sweep2 \

Solve name=drain vdrain=0 vfinal=3.3 vstep=0.3

I.5 .2 : AC solution procedures and statements

La simulation AC est simplement une extension de la procédure de simulation DC.

Le résultat final de cette analyse est la conductance la capacitance entre chaque paire d'électrodes. Les deux types de simulations sont:

- Solution à fréquence unique au cours d'une rampe DC
solve vbase=0. vstep=0.05 vfinal=1 name=base AC freq=1e6
résoudre VBASE = 0. VSTEP = 0,05 vfinal = 1 name = AC de base freq = 1E6
- La fréquence rampes à une polarisation unique
solve vbase=0.7 ac freq=1e9 fstep=1e9 nfsteps=10

solve vbase=0.7 ac freq=1e6 fstep=2 mult.f nfsteps=10

I.5.3 :-Transient solution procedures and statements

Pour les solutions transitoires, il faut utiliser une fonction linéaire par morceaux, exponentielle et biais sinusoïdale. Pour une rampe linéaire, il faut préciser les paramètres suivants: TSTART, TSTOP, TSTEP et RAMPTIME.

solve vgate=1.0 ramptime=1e-9 tstop=10e-9 tstep=1e-11

I.5.4 :Les procédures des solutions avancées

- Obtention de solutions autour d'un point de rupture - utilise MAXTRAPS
- Utilisation de conditions aux limites actuelles Au lieu de tension, on peut également spécifier les conditions aux limites actuelles.

Ceci est important, par exemple, lors de la simulation BJTs:

solve ibase=1e-6

solve ibase=1e-6 istep=1e-6 ifinal=5e-6 name=base

✓ Le paramètre de conformité :

Ce paramètre est utilisé pour arrêter la simulation, le cas d' échéant le niveau actuel est atteint.

solve vgate=1.0

solve name=drain vdrain=0 vfinal=2 vstep=0.2 \

compl=1e-6 cname=drain.

✓ La courbe trace capacité - permet le traçage de courbes IV complexes
Trois types de sorties sont produites par l'outil ATLAS: sorties d'exécution, fichier log, et les fichiers solution.

I.5.5 :Le sorties : run-time(déroulement du temps)

Les différents paramètres affichés lors de l'instruction SOLVE sont énumérés ci-dessous:

proj : méthodologie utilisée l'estimation initiale (précédente, local ou init) .

i, j, m : nombre d'itération.

i = nombre d'itération de boucle externe

j = nombre boucle interne de solutions découplées

m= méthode de solution *m* = utilisés: G = Gummel, B = Block, N = Newton

x, rhs= normes des équations être résolu

I.5 .6 :Log files(fichier log)

log outfile=<file_name>

Le paramètre LOG est utilisé pour stocker les caractéristiques calculée avec ATLAS du dispositif :

outfile = log <nom_de_fichier>

I.5 .7 : Solution files (fichier solution)

La syntaxe pour produire des fichiers solution qui peut être utilisé en conjonction avec TonyPlot est la suivante:

```
save      outfile=<file_name>],(enregistrer      outfile      =      <nom_de_fichier>)
solve outfile=<file_name>.sta master [one file only](résoudre. . . outfile =
<nom_de_fichier>. maître sta [onefileonly]).
```

I.5 .8 :Invoking TonyPlot (appelle TONYPLOT)

Pour créer des courbe superposées avec TonyPlot, il faut utiliser les commandes suivants :

```
tonyplot -overlay file1.log file2.log
```

Pour charger les fichiers de structure, contenant en grille, le dopage des informations de profil, etc on peut utiliser l'instruction suivante:

```
tonyplot file.str -set mx.set iv.data
```

Cette commande permet de charger le fichier appelé "file.str» et définit son affichage à une configuration précédente stockée dans le "mx.set" fichier, puis charge le fichier contenant I-V-données.

L'extraction des paramètres peut se faire de trois manières différentes:

1) Utilisation de la commande EXTRACT.

```
extract init infile="<file_name>"
```

```
extract name="nvt" xintercept (maxslope (curve (v."gate", (i."drain")))) -(ave (v."drain"))/2.0)
```

```
extract ... . Datafile="<file_name>"
```

2) Utilisation du menu de fonctions en TonyPlot qui permet d'utiliser les données enregistrées.

3) Utilisation de l'instruction LOG pour l'extraction de paramètres AC.

3.1)L' instruction extract peut être utilisé en conjonction avec:

✓ le processus d'extraction, après l'exécution du simulateur Silvaco ATHENA

✓ extraction de système ; après avoir obtenu les caractéristiques électriques de la structure du système simulé.

- Log-files: fichiers log: contient les informations électriques, plus précisément, I-V données obtenues par le processus de simulation ATLAS.

- Structure files: fichiers Structure: contenir les renseignements supplémentaires électrique, tels que le champ électrique, potentiel électrostatique, etc,

3.2) on peut construire une courbe en utilisant les axes distincts X et Y ; Pour chacune des électrodes, on peut choisir une des options suivantes: Tension (V), courant (i), Capacité (c), conductance (g), le temps pour les simulations transitoires AC (heure), Fréquence des simulations AC (fréquence), température (température), etc

3.3) EXTRACT statement:

- *Curve* :

Courbe, élément de base dans instruction EXTRACT. La syntaxe est la suivante:

Extract name="curve_name" curve(v."name", i."name")

- Axes manipulation:

- Algèbre avec un constant (multiplication, division,)

- Application des opérateurs (abs, log, log10, sqrt)

- Curve manipulation primitives:

Manipulation primitives des courbe:

(min, max, ave, minslope, maxslope, la pente, x intercept, y intercept,)

II-Liste des symboles de Silvaco [P. Michalopoulos, 02]

Symbol	Description	Unit
a	Angle	deg
α	Absorption coefficient	m ⁻¹
α	Lattice constant	Å
AUGN / AUGP	Electron / hole Auger coefficients	cm ⁶ /s
C	Capacitance	F
c	Speed of light	m/s
COPT	Radiative recombination rate	cm ³ /s
E	Energy	eV
ϵ	Dielectric function	-
$\epsilon_1, \epsilon_2, n, k$	Optical constants	-
ϵS	Permittivity	F/cm
EC	Bottom of conduction band	eV
EF	Fermi energy level	eV
Eg	Energy bandgap	eV
EV	Top of valence band	eV
f	Frequency	Hz
f(E)	Fermi-Dirac distribution function	-
h	Plank's constant	J·s
hv	Photon energy	eV
I	Current	A
ID / IS	Diffusion / drift current	A
ISC	Short circuit current	A
k	Boltzmann's constant	J/K
kT	Thermal energy	eV
m*	Effective mass	m _e
μ_n (MUN) / μ_p (MUP)	Electron / hole mobility	cm ² /V·s
n	Power conversion efficiency	-
ν	Photon frequency	Hz
NC / NV	Electron / hole density of states	cm ⁻³
ND / NA	Donor / acceptor impurity atom concentration	cm ⁻³
n_i^2	Majority · minority carrier concentration product	cm ⁻³
n_{n0} / p_{p0}	Majority carrier (electrons / holes) concentration	cm ⁻³
n_{p0} / p_{n0}	Minority carrier (electrons / holes) concentration	cm ⁻³
n_r / n_r^*	Refraction / complex refraction index	-
P	Power	W
R	Reflectivity	-
ρ	Resistivity	Ω·m
σ	Conductivity	S/m
T	Absolute temperature	oK
TAUN / TAUP	Electron / hole lifetimes	s
V	Voltage	V
VOC	Open circuit current	V
χ	Absorption index	-
χ	Affinity	eV

Résumé :

Ces dernières années un engouement particulier a été donné au remplacement des énergies fossiles et fissiles, épuisables, dangereuses et polluantes, par les énergies renouvelables et en particulier le solaire, propres et inépuisables.

Grace à l'effet photovoltaïque la conversion de l'énergie solaire en électricité est possible. Depuis les années cinquante plusieurs travaux et élaborations des dispositifs photovoltaïques ont été élaborés. Les premiers travaux étaient destinés surtout à l'aérospatial. Aujourd'hui les applications du photovoltaïque sont multiples. Parmi ces dispositifs celui qui nous intéresse dans ce travail est la cellule photovoltaïque interdigitée à contact arrière.

Se travail est consacré à l'état de l'art des cellules photovoltaïques, puis à l'étude théorique des cellules interdigitées à contact arrière et la simulation de certains de ses paramètres physiques (épaisseurs du substrat, de l'émetteur et du BSF ainsi que le dopage), par le logiciel Silvaco-Atlas.

Mots clés : Cellule, photovoltaïque, interdigité, simulation, Silvaco-Atlas.

ملخص:

في السنوات الأخيرة ظهر اهتمام خاص باستبدال الطاقة الأحفورية ذات المخزون المحدود والمسببة للتلوث، والطاقة النووية الخطيرة بالطاقات البديلة، المتجددة، لاسيما الشمسية منها والتي تتميز بالوفرة والنظافة. بعد اكتشاف الفولت الكهروضوئي أصبح من الممكن تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء، فظهرت عدة أبحاث في هذا المجال في مطلع الخمسينات وطورت عدة أجهزة عرفت بالخلايا الشمسية، خصصت الأوائل منها لأبحاث الفضاء ثم عمت لاستخدامات أخرى.

من بين هذه الخلايا نذكر على سبيل المثال الخلية الشمسية المتشابكة ذات الربط الخلفي والتي هي محل بحثنا هذا الذي نظمناه على النحو الآتي:

1. دراسة نظرية وصفية للخلايا الشمسية بصفة عامة.
2. دراسة وصفية و محاكاة للخلية الشمسية المتشابكة ذات الربط الخلفي باستعمال برنامج المحاكاة سيلفاكو (أبعاد الخلية و نسبة الشوائب المضافة لإثراء رقائق السليكون).

مفاتيح الكلمات: الخلايا الكهروضوئية ، الخلايا المتشابكة، المحاكاة، سيلفاكو أطلس

Abstract :

In recent years a particular interest was given to the replacement of fossil fuels (exhaustible and polluting) and fissile material (more dangerous) by the clean and inexhaustible solar energy.

Thanks to the photovoltaic effect to convert solar energy into electricity is possible. Since the fifties several studies and development of photovoltaic devices have been developed. The first works were intended primarily to aerospace. Today's photovoltaic applications are numerous. Among the devices that we are interested in this work is the photovoltaic interdigitated back contact cell.

To work is devoted to the state of the art solar cells, then the theoretical study of interdigitated back contact cells and simulation of some of its physical parameters (thickness of the substrate, the emitter and the BSF and that doping), the software Silvaco-Atlas.

Clef word: photovoltaic cell, interdigitated cell, simulation, Silvaco-Atlas.