



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

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

THÈSE

Présentée à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Physique

Par :

YESREF Djamel

Sur le thème

Contribution à la simulation de nouvelles structures photovoltaïques à base de silicium cristallin en couches minces épitaxié sur un substrat silicium monocristallin

Soutenue publiquement le 11.01.2024 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr AMARA Sofiane	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mme OULD ABBAS Amaria	Professeur	Université de Tlemcen	Directeur de thèse
Mme ZEBENTOUT Baya	Professeur	Université de Sidi Belabbes	Examinatrice
Mr BAGHDADLI Tewfik	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
Mr MIHOUB Sofiane	MCA	Université de Tiaret	Examineur
Mr KHAROUBI Abdelmalek	MCA	Université de Tiaret	Examineur

*Unité de recherche matériaux et énergies renouvelables (URMER)
BP 119, 13000 Tlemcen - Algérie*

Remerciements

Je remercie **ALLAH** le tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail. Ce travail dépend de l'Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables (URMER) de l'université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen.

Quelle meilleure façon de conclure l'aboutissement d'un projet qu'en remerciant l'ensemble des personnes qui y ont contribué.

Je voudrais commencer par remercier tout particulièrement ma directrice de thèse Mme BENSAOULA Amaria qui a eu la patience d'encadrer ce travail, qui m'a guidé pour le développement dans ce domaine de travail et qui a encore eu la patience de me suivre ces dernières années. Merci pour l'ensemble de tes conseils avisés et tes encouragements habituels.

J'exprime toute ma gratitude aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux :

Monsieur AMARA Sofiane, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il m'a fait de présider le jury de ma thèse,

Mme ZEBENTOUT Baya, Professeur à l'Université de Sidi Belabbes, Mr BAGHDADLI Tewfik, maître de conférence à l'université de Tlemcen, Mr MIHOUB Sofiane, maître de conférence à l'université de Tiaret, Mr KHAROUBI Abdelmalek, maître de conférence à l'université de Tiaret pour leur participation au jury et d'avoir accepté d'examiner ce travail en l'enrichissant par ses remarques hautement pédagogiques et scientifiques.

C'est d'abord avec chaleur et sympathie que je tiens à remercier l'ensemble du personnel (enseignants et administratif) du département de physique de l'université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen et aussi de l'unité de recherche des matériaux et des énergies renouvelables URMER avec qui j'ai eu de la chance pour s'intégrer dans l'équipe de recherche scientifique dans le domaine photovoltaïque.

Un grand merci à Mr MIHOUB Sofiane et Mr KHAROUBI Abdelmalek pour leur soutien, leurs encouragements et de m'avoir redonné confiance et remonté le moral dans les moments de doute. Merci aussi à tous le personnel de l'annexe Sougueur en particulier Mr DJELLOULI Abdelkader et Mr SAFA Abdelkader avec qui j'ai passé d'excellents moments.

Je voudrais également remercier Mr DEHBI Abdelkader Doyen de la faculté des sciences de la matière de l'université d'Ibn Khaldoun Tiaret et son staff et tout le personnel de cette faculté (Enseignants collègues du département de physique et de chimie - Personnel

administratif), avec qui j'ai pu partager des moments de réflexion scientifique et administrative.

Enfin, je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance à mes parents, mes frères, mes sœurs, ma belle-famille et mes amis *qui m'ont eu de cesse de demander « alors quand est-ce que tu soutiens »*. Merci infiniment pour m'avoir toujours soutenu et encouragé dans les moments difficiles.

Ma dernière pensée sera pour ma petite famille, mon épouse et mes enfants, qui m'ont soutenu de manière inconditionnelle et habituelle.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

Dans la filière des cellules solaires de silicium cristallin en couches minces, l'idée de base est de réaliser une couche de Silicium de très haute qualité structurale et électronique de faible épaisseur (10-50 μm) par un procédé de croissance épitaxiale sur un substrat silicium monocristallin bas-coût. La couche de silicium est caractérisée par une longueur de diffusion égale à son épaisseur, valeur envisageable pour les couches épitaxiées.

Notre contribution consiste à optimiser les paramètres physiques et technologiques d'une cellule photovoltaïque à base de silicium cristallin en couches minces ($X_B = 56\mu\text{m}$, $\eta = 15.2\%$) déposé sur un substrat Mc-Si d'une épaisseur assez importante vaut 500 μm a pour but d'étudier l'influence des différents paramètres sur les performances de la cellule simulée. Aussi, doit-on trouver une nouvelle structure par laquelle on garde sa stabilité et la performante électrique après la réduction de l'épaisseur de la couche active du silicium.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de réduire l'épaisseur du matériau du silicium de 56 à 30 μm tout en préservant leurs performances.

Mots clés :

Cellule solaire, Silicium cristallin, Couches minces, Epitaxie, Epaisseur, Performances, Simulation PC1D

Abstract

In the photovoltaic field, research is focused on two important axes: increasing cell efficiency, and reducing fabrication costs. To reduce the cost of the base materials, it is necessary to reduce the thickness of the active layers. The basic idea is to make a layer of high structural and electronic quality silicon of small thickness (10–50 μm). This layer could be grown by epitaxial techniques on a low-cost monocrystalline silicon substrate with an emitter formed by phosphorus diffusion. The silicon layer is characterized by a diffusion length comparable to its thickness, a value that can be expected for the epitaxial layers. This study aims to optimize the physical and technological performances of a crystalline silicon solar cell deposited by an epitaxial process on a low-cost monocrystalline silicon substrate with large thicknesses since there is no reflector on the backside.

This structure is characterized by the following parameters : (Thickness of the base layer $X_B = 56 \mu\text{m}$, the efficiency $\eta = 15.2\%$, the open-circuit voltage $V_{oc} = 623 \text{ mV}$ and the short-circuit current $I_{sc} = 30 \text{ mA}$). The calculations were carried out by the PC1D software, aiming to find a new solar cell structure by keeping the same characteristic parameters mentioned above (η , I_{sc} , and V_{oc}) while decreasing the thickness of this solar cell. The effect of the different parameters on the performance of the solar cell was investigated. The obtained results showed that it is possible to reduce the substrate thickness from 56 to 30 μm while keeping the same characteristics parameters of the cell ($\eta = 15.2\%$, $V_{oc} = 622.7 \text{ mV}$, $I_{sc} = 30.1 \text{ mA}$).

Keywords: Epitaxy, PC1D software, performance, silicon solar cell, thickness, thin film

Tables des matières

Remerciements	I
Résumé	II
Abstract	III
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XIII
Liste des symboles	XIV
Introduction générale.....	01
Références bibliographiques	04
Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque.....	05
Introduction.....	06
I.A Un survol de l'atmosphère.....	07
I.A.1 Définition	07
I.A.2 Structure verticale : couches atmosphériques	07
I.A.2.1 La troposphère	07
I.A.2.2 La stratosphère	07
I.A.2.3 La mésosphère	07
I.A.2.4 La thermosphère	07
I.A.2.5 L'exosphère	08
I.A.2.6 L'ionosphère	08
I.A.2.7 La magnétosphère	08
I.A.3 Composition moléculaire de l'atmosphère	08
I.B Notions préliminaire sur le rayonnement solaire.....	09
I.B.1 L'énergie solaire	09
I.B.1.1 L'origine de l'énergie solaire	09
I.B.1.2 Généralités sur le soleil	09
I.B.1.3 Constante solaire	10
I.B.1.4 L'air masse	12
I.B.1.5 Répartition spectrale du rayonnement solaire	13
I.B.2 Effets atmosphérique sur le rayonnement – Rayonnement global	13
I.C La conversion photovoltaïque.....	14
I.C.1 Une brève histoire des photopiles	14
I.C.2 La conversion photovoltaïque	15
I.C.2.1 Les trois événements optiques d'un rayon lumineux	15
I.C.2.2 L'interaction photon/semiconducteur	16
I.C.2.3 Propriétés du gap	17
I.C.2.4 L'absorption du rayonnement	18
I.C.2.5 Structure de la cellule standard	19
I.C.2.6 Principe de fonctionnement des dispositifs photovoltaïques	20
I.C.2.7 La cellule idéale	21
I.C.3 Caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque	21

I.C.3.1 Paramètres d'une cellule photovoltaïque	21
I.C.3.2 Rendement quantique	23
I.C.3.3 Influence de la température	24
I.D Limitations du rendement.....	24
I.D.1 Pertes physiques	24
I.D.1.1 Pertes des photons de faible énergie inférieure au gap	24
I D.1.2 Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons supérieure au gap	24
I.D.2 Pertes optiques	26
I.D.3 Pertes par recombinaison des porteurs de charges	26
I.D.3.1 Recombinaisons en volume	27
-a) Les recombinaisons Shockley-Read-Hall (SRH)	27
-b) Les recombinaisons radiatives	27
-c) Les recombinaisons Auger	28
I.D.3.2 Les recombinaisons en surface	28
I.D 4 Pertes résistives	29
I.E Limitation des pertes.....	30
I.E.1 La couche anti-reflet	30
I.E.2 La texturisation en surface	31
I.E.3 Formation de l'émetteur	32
I.E.4 La région de la base	32
I.E.5 BSF	32
I.E.6 Les contacts métalliques	32
I.F Procédé de fabrication de la cellule standard.....	33
I.G Les générations de cellules solaires.....	34
I.G.1 Les cellules solaires de la première génération	34
I.C.2 Les cellules solaires de la deuxième génération	34
I.C.3 Les cellules solaires de troisième génération	35
Conclusion du chapitre I	36
Références bibliographiques du chapitre 1	38
Chapitre II : Silicium et techniques de dépôts dans la réalisation de cellules solaires en couches minces.....	40
Introduction	41
II.A Filières et matériaux pour la conversion photovoltaïque.....	42
II.A.1 Filière température	42
II.A.1.1 Filière basse température	43
II.A.1.2 Filière haute température	44
II.A.2 Matériau de base : Silicium	45
II.A.2.1 Historique	46
II.A.2.2 Propriétés du silicium	46
II.A.2.3 Types de silicium cristallin	47
a) Silicium monocristallin	47
b) Silicium polycristallin	48
c) Silicium Amorphe	49
II.B Fabrication des cellules solaires.....	50

II.B.1 Le sable	51
II.B.2 Extraction et purification du silicium	52
II.B.2.1 Extraction du silicium à partir de la silice	52
II.B.2.2 Purification du silicium	52
a) Silicium métallurgique (MG-Si)	53
b) Silicium de qualité électronique (EG-Si)	54
c) Silicium de qualité solaire (SoG-Si)	54
II.B.3 Tirage de lingots de silicium	55
II.B.3.1 Tirage de lingots monocristallins	56
a) Tirage CZ	56
b) Tirage FZ	57
II.B.3.2 Moulage de lingots polycristallins	57
II.B.4 Le sciage des plaques (mc-Si et sc-Si)	58
a) Loi de Scheil – Ségrégation des impuretés	58
II.B.5 Dopage du silicium	60
II.B.5.1 Dopage de type N	60
II.B.5.2 Dopage de type P	60
a) La diffusion thermique	61
b) La croissance de couche par épitaxie	61
c) L'implantation ionique	61
II.C Les cellules solaires en couches minces.....	61
II.C.1 Définition d'une « couche mince »	62
II.C.2 Les matériaux absorbants pour les applications photovoltaïques	62
II.C.2.1 Les couches minces inorganiques	62
II.C.2.2 Les couches minces organiques	62
II.C.2.3 Les couches minces à base de matériaux III-V	62
II.C.3 Avantages des cellules solaires en couches minces	63
II.C.4 Les cellules solaires en couches minces de silicium cristallin	64
II.C.4.1 L'élaboration de silicium cristallin en couches minces	65
II.C.4.2 Choix du substrat	65
II.C.5 Les structures pour le confinement optique	65
II.D L'épitaxie des couches minces de silicium cristallin.....	67
II.D.1 Notions théoriques	67
II.D.2 Définition	67
II.D.3 Les avantages	67
II.D.4 Les différentes techniques	68
II.D.4.1 L'épitaxie par jet moléculaire	68
II.D.4.2 L'épitaxie en phase liquide EPL	69
II.D.4.3 L'épitaxie en phase vapeur CVD	69
II.D.5 Dopage des couches durant le procédé d'épitaxie	71
II.D.6 Passivation des défauts cristallographiques	71
II.D.7 Epitaxie sur substrat Si bas coût	72
Conclusion du chapitre II	73
Références bibliographiques du chapitre II	74

Chapitre III : Présentation du programme PC1D	78
III.A Introduction	79
III.B Equation de base du semiconducteur	80
III.B.1 Equation de Poisson	80
III.B.2 Equation de Continuité	80
III.B.3 Equations de Transport	81
III.C Aperçu des programmes de simulation P.V	83
III.D Aperçu sur le logiciel PC1D	83
III-D.1 Fonctionnement du PC1D	84
III.D.2 Etapes à suivre pour simuler une cellule solaire avec PC1D	84
III.D.2.1 Paramètres du dispositif (Device)	86
III.D.2.2 Paramètres des régions	87
III.D.2.3 Paramètres d'excitation	88
III.D.2.4 Paramètres des résultats	89
Références bibliographiques du chapitre III	91
Chapitre IV : Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de silicium cristallin en couche mince déposé sur un substrat silicium monocristallin.....	93
IV.A Introduction	94
IV.B Structure et outils de simulation	95
IV.C Résultats et discussions	97
IV.C.1 Influence des paramètres de la base	98
IV.C.1.1 L'effet de l'épaisseur de la base	98
IV.C.1.2 L'effet de la longueur de diffusion L_D	99
IV.C.1.3 L'effet de la concentration de la base	100
IV.C.2 Influence des paramètres de l'émetteur	101
IV.C.2.1 L'effet de l'épaisseur	101
IV.C.2.2 Effet du profil d'émetteur dopage	102
IV.C.3 L'influence du substrat	103
IV.C.3.1 Effet de la résistivité du substrat	103
IV.C.3.2 Effet de l'épaisseur du substrat	104
IV.C.4 L'influence de la vitesse de recombinaison en face avant et arrière	105
IV.C.5 Résistance série	106
IV.C.6 Caractéristiques I(V)	107
Conclusion du chapitre IV	109
Références bibliographiques du chapitre IV	110
Conclusion générale et perspectives	111

Liste des figures

Figure I.1	Vue d'artiste de la Structure interne du Soleil	09
Figure I.2	Rayonnement solaire	11
Figure I.3	Variations du rayonnement solaire	11
Figure I.4	Définition de l'air masse	12
Figure I.5	Répartition spectrale du rayonnement solaire et représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5	13
Figure I.6	Composantes du rayonnement global reçu par une surface inclinée	13
Figure I.7	Les trois événements optiques d'un rayon lumineux	16
Figure I-8	Effet de l'énergie d'un photon incident pour un matériau semi-conducteur	17
Figure I-9	Transitions inter-bandes d'électrons dans un semiconducteur	18
Figure I.10	Evolution du coefficient d'absorption dans le silicium selon la longueur d'onde du photon incident	19
Figure I.11	Structure d'une cellule standard au silicium cristallin de type P	20
Figure I-12	Caractéristique courant-tension sous éclairement typique d'une cellule solaire	21
Figure 1.13	Rendement quantique d'une cellule solaire en silicium (total IQE)	23
Figure I- 14	Comparaison entre le spectre solaire AM1.5G et le spectre réellement exploité par une cellule silicium	25
Figure I.15	Principales pertes intrinsèques pour une cellule photovoltaïque en silicium	25
Figure I.16	Shématisation de réflectivité sur une surface plane et texturée	26
Figure I.17	Représentation des différents mécanismes de recombinaisons	28
Figure I-18	Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire	29
Figure 1.19	Caractéristiques I-V sous éclairement mettant en valeur les effets des résistances parasites	30
Figure I.20	Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium	31
Figure I.21	Exemples de texturisations classiques réalisées sur des substrats de silicium cristallin	31
Figure I.22	Procédé de fabrication d'une cellule solaire au silicium cristallin de type <i>p</i>	33

Figure II.1	Différents axes technologiques développés pour la réalisation des cellules photovoltaïques à base du silicium cristallin	42
Figure II.2	Architecture d'une cellule photovoltaïque réalisée à basse température sur substrat transparent : verre	43
Figure II.3	Architecture d'une cellule photovoltaïque réalisée à basse température sur substrats opaques : acier inox, aluminium, polymère	43
Figure II.4	Structure classique d'une cellule photovoltaïque sur substrat conducteur	45
Figure II.5	Structure d'une cellule photovoltaïque sur substrat isolant	45
Figure II.6	Module Silicium Monocristallin	47
Figure II.7	Module Silicium polycristallin	48
Figure II.8	Vue générale du silicium polycristallin	48
Figure II.9	Représentation de la structure atomique du silicium cristallin et du silicium amorphe hydrogéné	49
Figure II.10	Structure d'une cellule solaire P-i-N à simple jonction	50
Figure II.11	La chaîne de fabrication de cellule photovoltaïque	51
Figure II.12	Extraction du silicium	52
Figure II.13	Structure schématique d'un four à arc	53
Figure II.14	Présentation des différentes filières d'approvisionnement en SoG-Si, EG-Si et de Si métallurgique amélioré.	55
Figure II.15	Fragment de silicium métallurgique (Pureté : 99,0 %) et fragment de polysilicium (Pureté : 99,999 999 9 %)	55
Figure II.16	Croissance de lingots monocristallins (Cz) - Procédés de croissance de lingots de silicium classiques : (Czochralski-Bridgman)	56
Figure II.17	Schémas du procédé de découpe de plaquettes	58
Figure II.18	Cellule solaire en couches minces	64
Figure II.19	Schéma d'une cellule couche mince de silicium cristallin par comparaison avec une cellule de silicium cristallin conventionnelle	64
Figure II.20	Piégeage optique	66
Figure II.21	Bâti d'épitaxie par jet moléculaire	68
Figure II.22	Les différents types de réacteurs d'épitaxie en phase gazeuse	70
Figure II.23	Défauts typiques de l'épitaxie	71

Figure II.24	Section transversale d'une cellule solaire à base de Si en couche mince	72
Figure III-1	Fenêtre du logiciel PC1D	85
Figure III-2	Fenêtre de la texturisation dans PC1D	86
Figure III-3	Fenêtre de la couche anti réfléchissante dans PC1D	86
Figure III-4	Fenêtre de la cellule simulée par PC1D	89
Figure III-5	Caractéristique I-V d'une cellule solaire tracée par PC1D	90
Figure III-6	Rendement quantique d'une cellule solaire tracé par PC1D	90
Figure IV.1	Structure d'une cellule solaire à base de silicium cristallin en couches minces sur substrat silicium	95
Figure IV.2	Coupe transversale schématique de la structure de cellule solaire épitaxiale - processus industriels des cellules solaires épitaxiales	95
Figure IV.3	Structure de la cellule solaire sans texturisation avec émetteur réalisé par diffusion	96
Figure IV.4	Structure de la cellule simulée à base du silicium cristallin sous PC1D	96
Figure IV.5	Évolution du court-circuit, de la tension de circuit ouvert et du rendement, en fonction de la variation de l'épaisseur de la base	98
Figure IV.6	Evolution du rendement en fonction de la longueur de diffusion	99
Figure IV.7	Evolution du court-circuit et la tension de circuit ouvert en fonction de la longueur de diffusion	99
Figure IV.8	Evolution du court-circuit et la tension de circuit ouvert en fonction de la concentration de la base	100
Figure IV.9	Evolution du rendement en fonction de la concentration de la base	100
Figure IV.10	Evolution du court-circuit et la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de l'émetteur	101
Figure IV.11	Evolution du rendement en fonction de l'épaisseur de l'émetteur	101
Figure IV.12	Evolution du court-circuit et la tension de circuit-ouvert en fonction du dopage de l'émetteur	102
Figure IV.13	Evolution du rendement en fonction du dopage de l'émetteur	103
Figure IV.14	Evolution du court-circuit et la tension de circuit ouvert en fonction de la résistivité du substrat	103
Figure IV.15	Evolution du rendement en fonction de la résistivité du substrat	104
Figure IV.16	Evolution du court-circuit, de la tension du circuit ouvert et du rendement, en fonction de la variation de l'épaisseur du substrat	104

Figure IV.17	Evolution du court-circuit et la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison de la face avant	105
Figure IV.18	Evolution du rendement en fonction de la vitesse de recombinaison de la face avant	105
Figure IV.19	Evolution du rendement, court-circuit et la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison de la face arrière	106
Figure IV.20	Evolution du rendement en fonction de la résistance série	106
Figure IV.21	Evolution du court-circuit et la tension de circuit ouvert en fonction de la résistance série	107
Figure IV.22	Caractéristique I-V obtenue par la simulation de la cellule solaire	107

Liste des tableaux

Tableau I.1	Principaux composantes de l'atmosphère	08
Tableau I.2	Valeurs physique des régions du soleil	10
Tableau II.1	Propriétés des différents matériaux retenus comme substrat - filère haute température	44
Tableau II.2	Données atomiques du silicium	46
Tableau II.3	Données physiques du silicium	46
Tableau II.4	Concentration d'impuretés avant et après solidification	59
Tableau IV.1	Paramètres physiques et technologiques utilisés par PC1D	97
Tableau IV.2	Paramètres de la cellule solaire après simulation et optimisation	108
Tableau IV.3	Vue d'ensemble sur les rendements atteints à partir de l'approche Si par épitaxie sur substrat bas coût	108

Liste des symboles

$P_{re\grave{c}ue}$	Puissance reçue par la terre
$P_{surfacique}$	Puissance surfacique
S_{disque}	Surface du disque
R_T	Rayon de la terre
$Intensit\acute{e}_{Terre}$	L'intensité du rayonnement au niveau de la terre
AM	L'Air masse
$AM0$	L'irradiante hors atmosphère
$AM1$	Le soleil est au zénith du lieu d'observation ($\theta = 0^0$, $AM = 1$)
$AM1.5$	Rayonnement fait un angle de $41,8^\circ$ du soleil par rapport au zénith,
$AM2$	Rayonnement fait un angle de 60° par rapport au zénith
$AM1.5D$	Rayonnement direct
$AM1.5G$	Rayonnement global
E_{ph}	Energie du photon
h	La constante de Planck = $6,626.10^{-34}J.s$
c	La vitesse de la lumière = $2,998.10^8$ m/s.
λ	La longueur d'onde (m).
E_g	Energie du gap
E_v	Bande valence
E_c	Bande de conduction
I_0	Intensité lumineuse incidente
I	Intensité lumineuse transmise
Z	Profondeur (cm)
α	Coefficient d'absorption dépendant de longueur d'onde et
k	Coefficient d'extinction du matériau (cm^{-1})
λ	Longueur d'onde (m)
p	Silicium de type p
n	Silicium de type n
np	Jonction n-p
CAR	Couche anti reflet
n^+	Emetteur fortement dopé
ZCE	Zone de charge d'espace

AV	Contact avant
AR	Contact arrière
I_{ph}	Courant photo généré
D_0	Courant de saturation de la diode
Q	Charge de l'électron
K	Constante de Boltzmann
T	Température en Kelvin
I	Courant
V	Tension
I_{cc}	Courant de court-circuit
V_{co}	Tension du circuit ouvert
P	Puissance
P_m	Puissance maximale
P_i	Puissance incidente
R_s	Résistance série
R_{sh}	Résistance parallèle
FF	Facteur de forme
S	Surface de la cellule
η	Rendement de conversion de la cellule solaire
R	Coefficient de réflexion
IQE	Rendement quantique interne
SRH	Shockley-Read-Hall
τ	Durée de vie
τ_{eff}	Durée de vie effective
d_{base}	Epaisseur de la base
L_D	Longueur de diffusion
e-	Electron
h+	Trou
Δn	Concentrations d'électrons en excès
Δp	Concentrations de trous en excès
c-Si	Silicium monocristallin
p-Si	Silicium polycristallin
a-Si	Silicium amorphe
$\tau_{volumique}$	Recombinaison volumique

τ_{SRH}	Recombinaison Shockley-Read-Hall
τ_{auger}	Recombinaison Auger
$\tau_{radiative}$	Recombinaison radiative
$\tau_{surfacique}$	Recombinaison surfacique
I_{01}	Courant de génération-recombinaison dans la ZCE
I_{02}	Courant de diffusion dans les zones neutres (zone n et zone p)
n_1	Facteur d'idéalité de la diode 1
n_2	Facteur d'idéalité de la diode2
d_{car}	Epaisseur de la couche antireflet
n_{car}	Indice optique de la couche antireflet
BSF	Back surface field
CZ	Czockralski
FZ	Fusion de zone
MG-Si	Silicium métallurgique
SoG-Si	Silicium de qualité solaire
EG-Si	Silicium de qualité électronique
k_0	Coefficient de ségrégation
C_s	Concentrations en impuretés phase solide
C_l	Concentrations en impuretés phase liquide
k_{eff}	Coefficient de ségrégation effectif
v	Vitesse de la solidification
D	Epaisseur de l'interface entre la phase solide et la phase liquide
C_0	Concentration initiale de l'impureté dans la charge
χ	Fraction solidifiée
R_{av}^{ext}	Réflectivité externe en face avant
R_{ar}^{int}	Réflectivité interne en face arrière
W	Epaisseur de la couche active
n_i	Indice de réfraction
e_i	Epaisseur de la couche
VPE	Epitaxie en Phase Vapeur
EPL	Epitaxie en Phase Liquide
MBE	Epitaxie par jet moléculaire
PC1D	Personnel one dimensionnel
ρ	Charge électrique

ϵ_0	Permittivité dans le vide
ϵ_r	Permittivité absolue
ϵ	Permittivité du matériau
ϕ	Potentiel électrostatique
N_D^+	Densités donneurs ionisés
N_A^-	Densité accepteur ionisés
\vec{E}	Champ électrique
n	Concentrations des électrons
p	Concentrations de trous
\vec{J}_p	Densité du courant des électrons
\vec{J}_n	Densité du courant des trous
G_n	Taux de génération optique des électrons
G_p	Taux de génération optique des trous
R_n	Taux de recombinaison des électrons
R_p	Taux de recombinaison des trous
D_n	Constante de diffusion des électrons
D_p	Constante de diffusion des trous
μ_n	Mobilité des électrons
μ_p	Mobilité des trous
K_b	Constante de Boltzmann

Introduction Générale

I. Introduction Générale

L'enjeu énergétique de notre siècle est triple : faire face à l'épuisement attendu des réserves d'énergie fossile, notamment sous ses formes liquides (pétrole) ou gazeuses (gaz naturel) ainsi à une consommation énergétique toujours croissante, tout en préservant notre environnement des risques liés aux rejets de CO₂ dans l'atmosphère. Il est impossible de continuer à utiliser des ressources fossiles pour la production de l'électricité sans aller vers une catastrophe humaine et écologique. Une partie importante de la solution à cette problématique réside dans le développement de la part des énergies renouvelables dites également propres dans le bouquet énergétique.

Plusieurs formes d'énergies renouvelables ont vu le jour ces dernières années, parmi lesquelles l'énergie photovoltaïque. Elle repose sur la conversion des rayons lumineux du soleil en électricité par le biais d'un dispositif appelé cellule solaire. Cette cellule solaire est fabriquée généralement par des matériaux semiconducteurs comme le silicium, c'est le plus dominant dans le marché photovoltaïque. Ce matériau est utilisé sous différentes formes : monocristallin, polycristallin et amorphe [1,2]. Toutefois, la contribution de cette forme d'énergie au bilan énergétique mondial reste coûteuse. De plus, les étapes de découpe et de sciage à fils utilisées en production entraînent la perte d'environ 1/3 de la matière première silicium. Ces problèmes d'approvisionnement et de consommation d'énergie ont conduit de nombreuses équipes de recherche et d'industrie à s'engager dans le développement d'une nouvelle voie de production de cellules photovoltaïques : les couches minces.

Pour diminuer les coûts de production, il est nécessaire de réaliser une couche de silicium de faibles épaisseurs et de très haute qualité structurale et électronique sur un substrat bas coût [3,4,5]. Ce substrat peut être fait de silicium ou bien d'un autre matériau. Ce substrat doit supporter les hautes températures des étapes de fabrication comme l'épitaxie et avoir un coefficient d'expansion proche du Si afin d'éviter les contraintes dans le matériau. Il doit, de plus, conduire l'électricité et ne pas contaminer la cellule en impuretés et doit être aussi de moindre qualité, donc peu coûteux [6]. La plupart de ces cellules sont fabriquées par l'épitaxie directe d'une couche de silicium (<50µm) sur un substrat silicium monocristallin ou multicristallin de basse qualité avec des épaisseurs assez importantes (car il n'y a pas un réflecteur en face arrière) [6,7,8]. Ce substrat est généralement obtenu par refonte des chutes de silicium de l'industrie de la microélectronique. Cette technologie permet aussi l'utilisation de silicium caractérisé par une longueur de diffusion L_D égal à l'épaisseur de la cellule au niveau de la couche active [6].

Le rendement d'une cellule solaire à base du silicium est affecté par différents types de pertes, plus de 40% de la lumière incidente est réfléchi et génère des pertes de réflectance. Ainsi, et dans le cas du silicium, la réduction de l'épaisseur entraîne naturellement une perte du rendement d'absorption et par suite une perte de rendement de conversion, des pertes liées aussi à son gap indirect. Ces pertes peuvent être compensées par un piégeage optique de la lumière, appelé confinement optique, à travers un dépôt d'une couche anti réfléchissante et aussi une texturisation sur la face avant de la cellule.

Ainsi la caractéristique I-V d'une cellule élémentaire modélisée par un circuit équivalent. Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série R_s et parallèle (shunt) R_{sh} pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule. La résistance série R_s influe légèrement sur la tension en circuit ouvert V_{co} qui diminue à partir d'une certaine valeur de R_s [9,10].

Objectifs

Deux aspects principaux structurent ce travail. Le premier est de montrer l'intérêt de la technologie des couches minces pour la fabrication des cellules solaires. Particulièrement, les techniques qui permettent de déposer une couche mince de silicium à faible épaisseur sur un substrat silicium moins coûteux par une croissance épitaxiale. Le second est d'étudier l'influence des paramètres physiques et électriques sur les performances d'une cellule solaire réalisée dont l'architecture de cette cellule est compatible avec l'ensemble des étapes de ce procédé utilisées dans l'industrie photovoltaïque.

Une simulation sera effectuée à l'aide du logiciel PC1D pour déterminer les meilleurs paramètres obtenus afin de réduire encore l'épaisseur de la cellule choisie pour cette étude sans perdre ses performances photovoltaïque (I_{cc} , V_{co} et η).

Le manuscrit s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre est destiné à constituer une base théorique et bibliographique afin d'aider à la compréhension des chapitres suivants de notre sujet. Dans un premier temps, nous aborderons quelques notions sur la source d'énergie que représente le soleil, et son application dans le domaine photovoltaïque. Ensuite, nous allons présenter le principe général du fonctionnement de la cellule solaire, les caractéristiques courant-tension souvent utilisées pour déterminer les performances des cellules réalisées. Puis nous décrirons les différents phénomènes limitant le rendement de conversion des cellules solaires, ainsi, les structures et procédés mis en place lors de la réalisation de cellules photovoltaïques afin de limiter ces pertes.

Le second chapitre est consacré aux matériaux et procédés destinés pour les applications photovoltaïques en couches minces à savoir les filières « basse et haute température ». Nous décrirons d'abord les propriétés du silicium optiques et électriques, ensuite, notre stratégie consiste à nous conduire à présenter une étude globale sur les différentes techniques de croissance par épitaxie utilisées dans la fabrication des cellules solaires homojonction en couches minces à base du silicium cristallin. Ce procédé est central dans notre étude car plusieurs cellules solaires se sont réalisées par cette technique, qui seront actives pour la conversion photovoltaïque.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation descriptive et illustrée du simulateur PC1D utilisé dans notre étude afin de simuler et optimiser une cellule solaire à base du matériau semiconducteur silicium cristallin en couches minces déposé sur un substrat silicium monocristallin.

Le quatrième chapitre présente les travaux réalisés et la discussion des résultats obtenus dans cette étude. Au cours de ce chapitre notre démarche nous a conduit à étudier par simulation à l'aide du logiciel PC1D une cellule solaire de type $n^+/p/p^+$ en couches minces. Elle est à base du silicium cristallin d'une épaisseur de $56\mu\text{m}$ déposé sur un substrat monocristallin fortement dopé de type p et moins coûteux, avec des épaisseurs assez importantes de $500\mu\text{m}$ pour composer l'absence du réflecteur en face arrière. Ce concept est le plus simple et compatible avec le prototype utilisé à l'échelle industrielle dont le but c'est de réduire l'épaisseur de la couche active et diminuer leur impact sur les performances électriques.

Les résultats obtenus sont discutés afin d'identifier les meilleurs paramètres pour obtenir une structure par la quelle son épaisseur sera réduit et d'avoir par suite une cellule stable et performante électriquement.

Enfin, L'ensembles des études et résultats présentées ont mis en évidence la possibilité d'améliorer la structure étudiée afin d'abaisser les coûts de production à travers une réduction de l'épaisseur du matériau de silicium tout en gardant leurs performances électriques (I_{cc} , V_{co} et η). Plusieurs paramètres ont été testés dans cette visée.

Références bibliographiques

- [01] **Frédéric JAY**, "Nouveaux substrats de silicium cristallin destinés aux cellules photovoltaïques à haut rendement – Cas du silicium mono-like et du dopage aux donneurs thermiques liés à l'oxygène pour les cellules à hétérojonction de silicium", Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes - 2016
- [02] **Alice Defresne**, "Amélioration de la passivation de cellules solaires de silicium à hétérojonction grâce à l'implantation ionique et aux recuits thermiques", Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud-2016
- [03] **Beaucarne, G., Duerinckx, F., Kuzma, K., Van Nieuwenhuysen, K., Kim, H. J., Poortmans, J.**, "Epitaxial thin-film Si solar cells, Thin Solid Film", 511-512, 533-542 (2006).
- [04] **M. Stemmer, G. Wagner, S. Martinuzzi, D. Ginley, A. Catalano, H.W.Schock, C. Eberspacher, T.M. Peterson, T. Wada**, "Thin Films for Photovoltaic and Related Device Applications". Symposium, 1996, p. 123.
- [05] **T. Vermeulen, J. Poortmans, M. Caymax, J. Nijs, R. Mertens, J. Szlufcik, S. Maene, F. Duerinckx**, "Proceedings of 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion", 1998, p. 1209.
- [06] **Sévak AMTABIAN**, "Du transfert de films minces de silicium monocristallin vers un procédé cellule à faible budget thermique", Thèse de Doctorat, Université des Sciences appliquées-Lyon - 2008.
- [07] **C.-C. Chiang & Benjamin T.-H. Lee**, "Annihilating Pores in the Desired Layer of a Porous Silicon Bilayer with Different Porosities for Layer Transfer" – 2019
- [08] **Stephen BORDAIS**, "Etude du Dépôt et des Propriétés Physiques du Silicium Polycristallin obtenu par le procédé RTCVD sur Substrats de Mullite. Application aux Cellules Photovoltaïques en Couches Minces ", Thèse de Doctorat-l'université Louis Pasteur de Strasbourg (2000).
- [09] **Bissels, GMMW, Asselbergs, MAH, Dickhout, JM, et al.** "Experimental review of series resistance determination methods for III–V concentrator solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells" 2014; 130(0): 364– 374.
- [10] **W.C. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga**, "Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin", Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 301 – 306

Chapitre I
***Généralités sur l'énergie
photovoltaïque***

I.1 Introduction

Ce premier chapitre est destiné à constituer une base théorique et bibliographique afin d'aider à la compréhension des chapitres suivants de notre sujet. Dans un premier temps, nous aborderons quelques notions sur la source d'énergie que représente le soleil, et son application dans le domaine photovoltaïque. Ensuite, nous allons présenter le principe général du fonctionnement de la cellule solaire, les caractéristiques courant-tension souvent utilisées pour déterminer les performances des cellules réalisées. Puis nous décrirons les différents facteurs limitant le rendement de conversion des cellules solaires, ainsi, les structures et procédés mis en place lors de la réalisation de cellules photovoltaïques afin de limiter ces pertes.

I.A Un survol de l'atmosphère

I.A.1 Définition :

Atmosphère Ensemble de couches, principalement gazeuses, qui entourent la masse condensée, solide ou liquide, d'une planète. Les sciences de l'atmosphère font principalement appel à des notions de physique, chimie, et mécanique des fluides [I.1]

I.A.2 Structure verticale : couches atmosphériques

Les variations verticales de température sont très différentes des variations de pression et de densité : la température décroît et augmente alternativement avec l'altitude, de façon quasi-linéaire, en restant comprise entre environ 200 et 300 K. Cette structure verticale de la température permet de diviser l'atmosphère en un certain nombre de couches en partant de la surface vers l'espace détaillées ci-dessous.

I.A.2.1 La troposphère s'étend jusqu'à environ 11 km d'altitude et contient 80% de la masse de l'atmosphère. La température y décroît en moyenne de 6.5°C par kilomètre. La troposphère est une couche relativement bien mélangée sur la verticale. Elle est la couche où ont lieu la plupart des phénomènes météorologiques accessibles à l'expérience humaine (exemple, les nuages). La partie inférieure de la troposphère contient la couche limite atmosphérique située juste au-dessus de la surface, d'épaisseur variant de quelques centaines de m à 3 km et définie comme la partie de l'atmosphère influencée par la surface.

I.A.2.2 La stratosphère est située au-dessus de la troposphère. L'altitude au-dessus du sol de la tropopause peut varier entre 5 et 15 km. Contrairement à la troposphère, la stratosphère contient très peu de vapeur d'eau (à cause des températures très basses rencontrées à la tropopause) mais la majorité de l'ozone O_3 . L'absorption par l'ozone du rayonnement solaire ultraviolet, de longueur d'onde moindre que le rayonnement visible et plus énergétique, explique que la température dans la stratosphère est d'abord isotherme, puis augmente avec l'altitude jusqu'à un maximum à la stratopause.

I.A.2.3 La mésosphère se situe sur Terre à des altitudes entre 50 et 85 km. Contrairement à la troposphère, elle ne contient pas de vapeur d'eau et contrairement à la stratosphère, elle ne contient que peu d'ozone. La mésopause est souvent le point le plus froid de l'atmosphère terrestre, la température peut y atteindre des valeurs aussi basses que 130 K.

I.A.2.4 La thermosphère s'étend jusque des altitudes très élevées (800 km), sa température contrôlée par l'absorption du rayonnement solaire ultraviolet. La température dans la thermosphère varie souvent d'un facteur deux suivant l'activité solaire et l'alternance jour-nuit.

I.A.2.5 L'exosphère est située au-dessus de la thermosphère à partir d'une altitude d'environ 800 km sur Terre. Elle constitue la dernière zone de transition entre l'atmosphère et l'espace. Il s'agit de la zone où l'atmosphère subit un échappement : les molécules peuvent s'échapper vers l'espace sans que des chocs avec d'autres molécules ne les renvoient dans l'atmosphère [I.1].

I.A.2.6 L'ionosphère se situe entre 50 et 1000 kilomètres d'altitude (elle s'étend donc de la mésosphère à la thermosphère). C'est une région de notre haute atmosphère contenant des ions et des électrons formés par photo-ionisation des molécules neutres qui s'y trouvent. C'est le Soleil, et plus particulièrement ses rayonnements énergétiques ultraviolets et X, mais aussi les particules du vent solaire et le rayonnement cosmique, qui sont à l'origine de cette ionisation de la haute atmosphère.

I.A.2.7 La magnétosphère démarre au-dessus de l'ionosphère, à plusieurs milliers de kilomètres de la surface du sol, et s'étend jusqu'à 70 000 kilomètres environ du côté du Soleil. Notre planète génère son propre champ magnétique, ce champ magnétique protège la Terre des agressions extérieures comme les rayons cosmiques et les particules énergétiques du vent solaire. Cette zone protégée s'appelle magnétosphère.

I.A.3 Composition moléculaire de l'atmosphère

L'azote et l'oxygène dominent largement la composition de l'atmosphère terrestre de 78% de 21% successivement (tableau I.1), suivis par l'argon et d'autres gaz rares beaucoup moins abondants. Les rapports de mélange de vapeur d'eau et d'ozone sont très variables : la vapeur d'eau est présente surtout dans la troposphère, avec un maximum près de la surface et dans les tropiques, alors que l'ozone est principalement présenté dans la stratosphère.

Tableau I.1 : Principaux composants de l'atmosphère
Les gaz à effet de serre sont indiqués en gras [I.1]

Constituant	Masse molaire	Rapport de mélange
Azote (N ₂)	28	78%
Oxygène (O ₂)	32	21%
Argon (Ar)	40	0.93%
Vapeur d'eau (H₂O)	18	0-5%
Dioxyde de carbone (CO₂)	44	380 ppmv
Néon (Ne)	20	18 ppmv
Hélium (He)	4	5 ppmv
Méthane (CH₄)	16	1.75 ppmv
Krypton (Kr)	84	1 ppmv
Hydrogène (H ₂)	2	0.5 ppmv
Oxide nitreux (N₂O)	56	0.3 ppmv
Ozone (O₃)	48	0-0.1 ppmv

I.B Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

I.B.1 L'énergie solaire

I.B.1.1 L'origine de l'énergie solaire.

Dans le soleil, la principale source d'énergie est dûe aux réactions proton – proton qui transmutent 4 noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium, et cette réaction qui dégage 26.2 MeV s'accompagne de la production de neutrinos et de rayons gamma [I.2].

Le développement, l'optimisation et la caractérisation de cellules solaires impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée : le soleil.

I.B.1.2 Généralités sur le soleil

L'astre solaire est une étoile de diamètre de 1.392.000 km, soit 109 fois celui de la terre. Avec une masse de 2.10^{30} kg, il contient à lui seul 99.97% de la masse du système solaire. Sa densité moyenne est de $1,4 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$. La puissance rayonnée total est de l'ordre de 4.10^{26} W soit environ $2.6.10^8 \text{ W/m}^2$, dont la terre ne reçoit au niveau des nuages que $1.743 \cdot 10^{17}$ W ou encore 1367 W/m^2 . Ce dernier nombre est aussi appelé constante solaire [I.3].

L'hydrogène est le composant majoritaire du soleil. Par abondance décroissante, on trouve l'hydrogène (93.96%), l'hélium (5.9190%), l'oxygène (0.0648%), le carbone (0.0395%), l'azote (0.082 %), le silicium (0.0042%), le magnésium (0.0037%), le néon (0.0035), le fer (0.0030%), le soufre (0.0015%), l'aluminium (0.0003%), le calcium (0.0002%), le sodium (0.0002%), le nickel (0.002%) et enfin l'argon (0.0001%) [I.3].

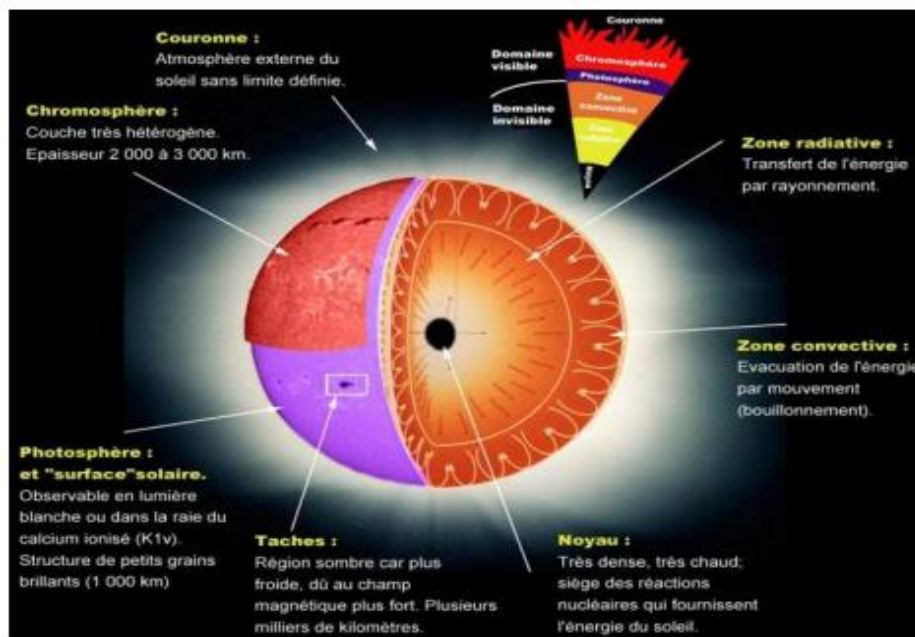


Figure I.1 : Vue d'artiste de la Structure interne du Soleil (noyau jusqu'à 0.25 R, zone radiative de 0.25 à 0.8 R, zone convective) et de son atmosphère (photosphère à 5750 K, chromosphère à 8000 K, couronne à 106 K puis vent solaire) [I.2]

Le cœur du soleil est la seule partie qui produise une quantité notable de chaleur par fusion : le reste de l'étoile tire sa chaleur uniquement de l'énergie qui en provient. La totalité de l'énergie qui y est produite doit traverser de nombreuses couches successives jusqu'à la photosphère, avant de s'échapper dans l'espace sous forme de rayonnement solaire ou de flux de particules. Les photons de haute énergie (rayons X et gamma) libérés lors des réactions de fusion mettent un temps considérable pour atteindre la surface du Soleil, ralentis par l'interaction avec la matière et par le phénomène permanent d'absorption et de réémission à plus basse énergie dans le manteau solaire. On estime que le temps de transit d'un photon du cœur à la surface se situe entre 17 000 et 50 millions d'années. Après avoir traversé la couche de *convection* et atteint la *photosphère* [I.4], la surface visible du soleil (source de rayonnement solaire) où les photons sont éjectés du soleil dans l'espace, en grande partie sous forme de lumière visible. Elle est source de 99% du rayonnement total. Elle s'étend sur une épaisseur d'environ 500 km, au gré des mouvements granulaires. C'est une zone dans laquelle la température décroît de 5700 à environ 4200 K [I.3].

La lumière du soleil est l'énergie là mieux répartie sur terre, la ressource est illimitée. L'énergie solaire est disponible partout sur notre planète. La quantité d'énergie lumineuse que fournit le soleil à notre terre couvre dix mille fois le besoin en énergie nécessaire pour alimenter tous les habitants de la planète. Certaines valeurs physiques des régions du soleil sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.2 valeurs physique des régions du soleil [I.3]

	Concentration [m ⁻³]	Pression [atm]	Température [K]	Altitude [km]
Photosphère	$6.6 \cdot 10^{19}$	0.12	$5.8 \cdot 10^3$	0
Interface zones Connective/ radiative	$1.7 \cdot 10^{28}$	$6 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^6$	-1500
Interface zone Radiative/cœur	$1.4 \cdot 10^{31}$	$3 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^6$	$-500\ 000$
Centre	$5 \cdot 10^{31}$	$2.2 \cdot 10^{11}$	$15 \cdot 10^6$	$-700\ 000$

I.B.1.3 Constante solaire

L'expression de la puissance reçue par la terre est :

$$P_{reçue} = P_{surfactive} \times S_{disque} = P_{surfactive} \times \pi \times R_T^2 \quad \text{I.1}$$

$$\text{avec : } P_{surfactive} = \frac{P_{totale}}{P_{sphère}} = \frac{P_{totale}}{4 \times \pi \times D^2} \quad \text{I.2}$$

$$P_{reçue} = \frac{P_{totale}}{4 \times \pi \times D^2} \times S_{disque} = \frac{3.86 \times 10^{26} \times \pi \times (6370 \times 10^3)^2}{4 \times \pi \times (150 \times 10^9)^2} = 1.74 \times 10^{17} W$$

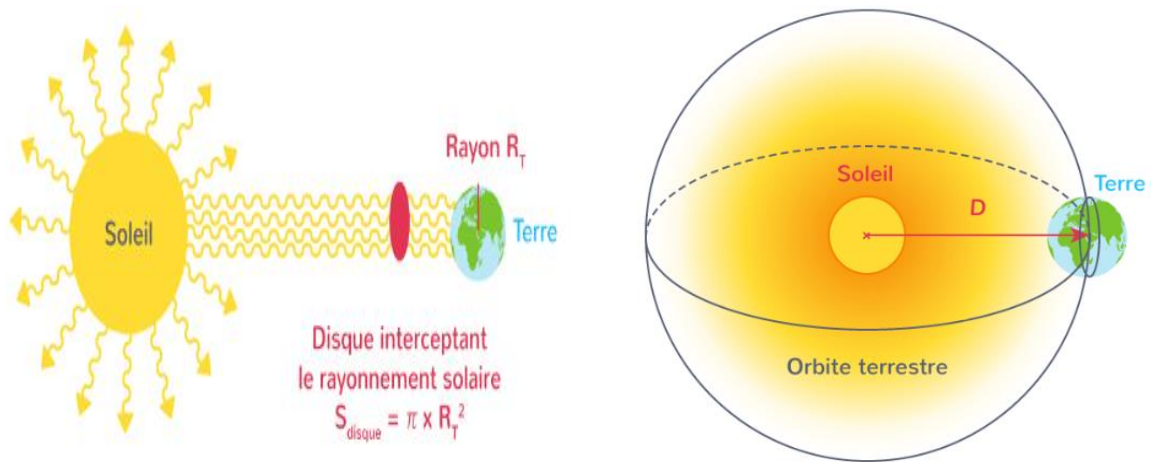


Figure I.2 : Rayonnement solaire [I.5]

L'intensité par m² du rayonnement au niveau de la terre est la puissance du soleil / l'air de surface de la sphère de rayon Terre-soleil :

$$Intensité_{Terre} = 3.85 \times 10^{26} / (4\pi \times 149600000000^2) \approx 1396 w/m^2 \tag{I.3}$$

Le rayonnement solaire n'est pas conforme au sol, il dépend de période de l'année, de l'heure, de la localisation (longitude, latitude) et des conditions atmosphériques.

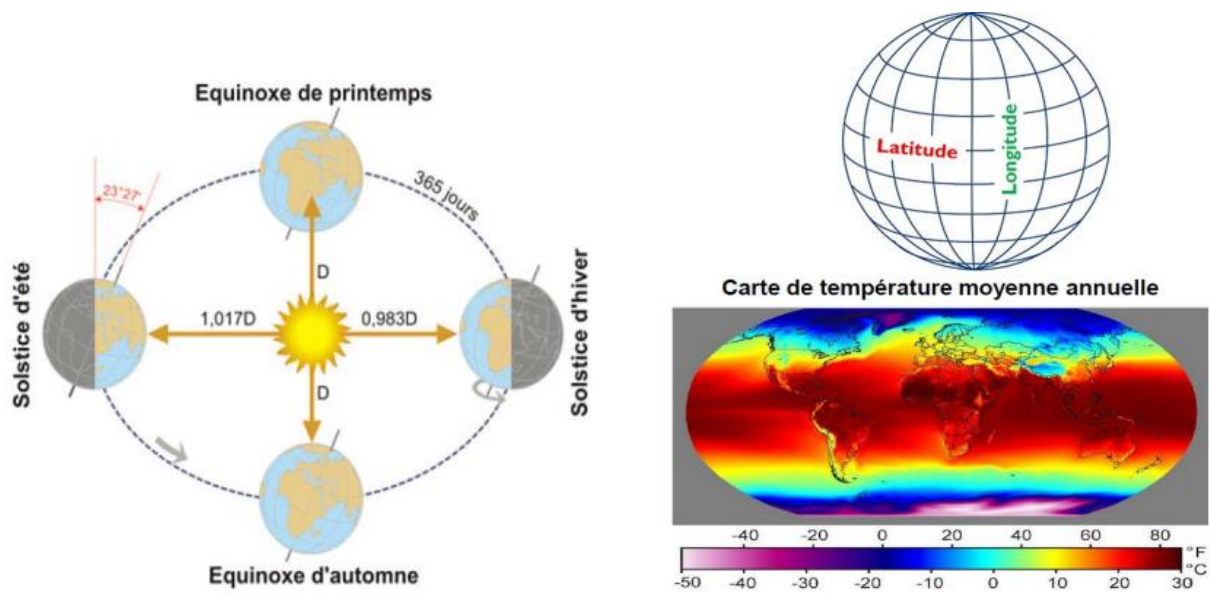


Figure I.3 : Variations du rayonnement solaire

I.B.1.4 L'air masse AM

Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Mass (AM). Elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle du soleil par rapport au zénith voir figure I.4

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (\text{I.4})$$

- **AM0** correspond à l'irradiance hors atmosphère, et est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour applications spatiales.
- **AM1** correspond à l'irradiance du soleil, si le soleil est au zénith du lieu d'observation ($\theta = 0^\circ$, $AM = 1$) distance minimum à parcourir par les photons à travers l'atmosphère.
- **AM1.5G** c'est la référence la plus utilisée, définit un rayonnement faisant un angle de $41,8^\circ$ du soleil par rapport au zénith, elle correspondant à un rayonnement traversant 1,5 fois l'épaisseur de la couche atmosphérique. G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des directes. AM1.5G donne une irradiance de 970 W/m^2 , mais a été arrondi à 1 kW/m^2 .
- **AM2** c'est lorsque le rayonnement fait un angle de 60° par rapport au zénith [I.6].

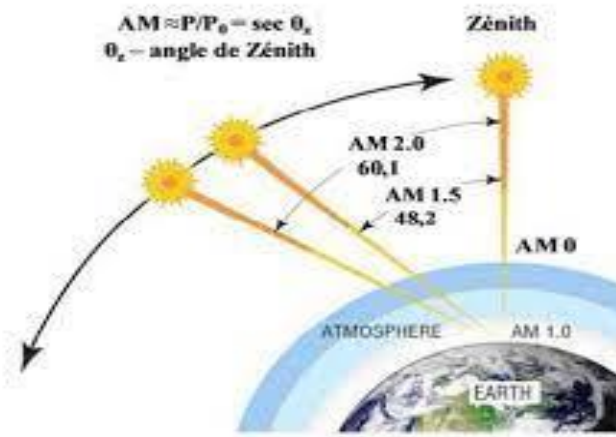


Figure I.4 : Définition de l'air masse

I.B.1.5 Répartition spectrale du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire moyen obtenu en dehors de l'atmosphère terrestre est d'environ 1.36 kW/m^2 . Lorsqu'il pénètre dans l'atmosphère, le rayonnement solaire sera pondéré par divers facteurs existant à la surface de la terre : l'atmosphère, les conditions climatiques, la longitude

et l'altitude d'observation, et l'absorption saisonnière. Des gaz comme l'ozone (O_3) pour des longueurs d'onde inférieures à $0.3 \mu\text{m}$, le dioxyde de carbone (CO_2) et la vapeur d'eau (H_2O) pour les infrarouges au-dessus de $2 \mu\text{m}$, absorbent les énergies proches de leurs énergies de liaison, ce qui conduit à des « trous » dans le spectre solaire visible au sol, Figure (I-5). De plus, la présence de poussières et d'aérosols dans l'atmosphère entraîne une répartition de l'absorption sur presque tout le spectre, ce qui entraîne une diminution globale de la puissance incidente [I.7].

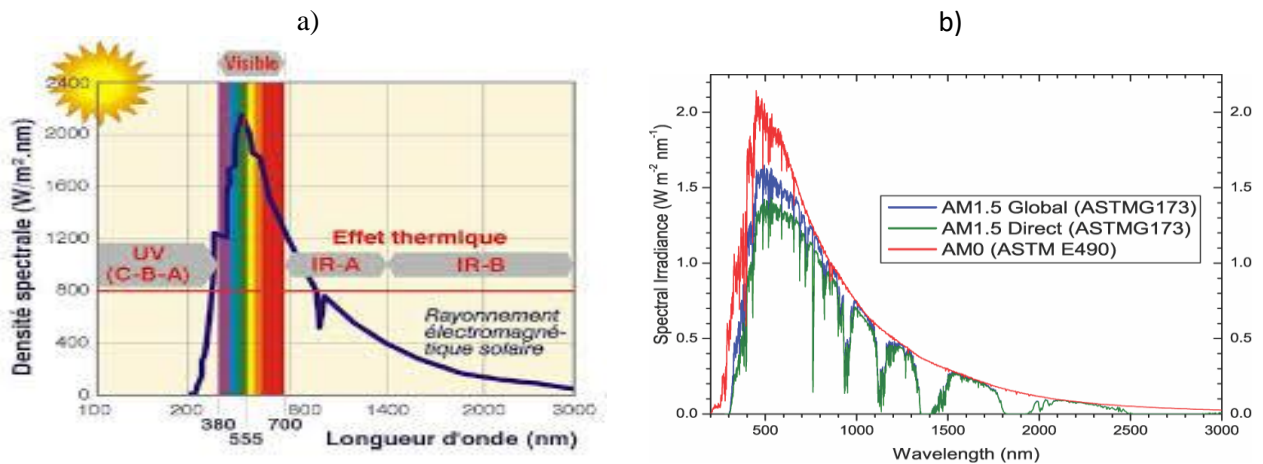


Figure I.5 : a) Répartition spectrale du rayonnement solaire b) Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 [I.7]

I.B.2 Effets atmosphérique sur le rayonnement – Rayonnement global

Le rayonnement solaire global reçu par une surface inclinée peut être calculé par la sommation des composantes suivantes :

- ◆ la composante directe : rayonnement reçu directement du soleil,
- ◆ la composante diffuse : rayonnement reçu par le reste de la voûte céleste,
- ◆ la composante réfléchi : rayonnement reçu par le sol, il dépend du type de sol (Albédo)

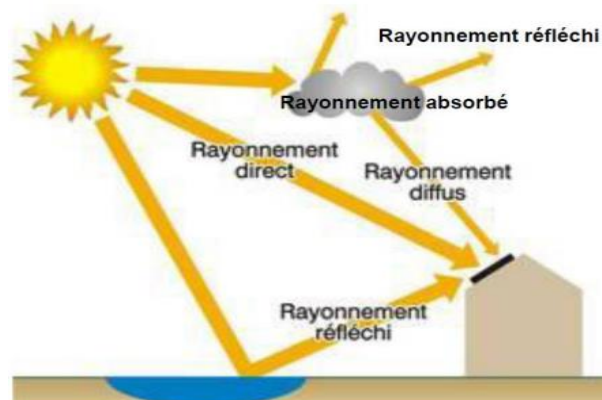


Figure I.6 : Composantes du rayonnement global reçu par une surface inclinée

I.C la conversion photovoltaïque

I.C.1 Une brève histoire des photopiles [I.8-I.9]

✂ **1839** : Le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel (père du pionnier de la radioactivité Henri Becquerel) décrit le premier l'effet photovoltaïque : découvre que certains métaux sont photoélectriques : ils produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière.

✂ **1873** : L'ingénieur anglais Willoughby Smith découvre que le sélénium est un photoconducteur particulièrement efficace (il sera utilisé plus tard par Chester Carlson dans son invention du photocopieur).

✂ **1905** : Le physicien d'origine allemande Albert Einstein élucide la physique de l'effet photoélectrique en expliqua le phénomène, une découverte qui lui vaudra le prix Nobel.

✂ **1916** : Le physicien américain Robert Millikan prouve expérimentalement la théorie d'Einstein.

✂ **1940** : Russell Ohl, des laboratoires Bell, découvre accidentellement qu'un semi-conducteur à délivrent une petite quantité d'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière.

✂ **1954** : Les chercheurs des Bell Labs, Daryl Chapin, Calvin Fuller et Gerald Pearson, fabriquent la première cellule solaire photovoltaïque en silicium à partir du procédé de tirage Czochralski, dont le rendement est d'environ 6 % (une version ultérieure atteint 11 %).

✂ **1958** : Les programmes spatiaux donnèrent à cette technique ses premières applications commerciales. Le satellite artificiel américain Vanguard emportait un petit panneau de cellules solaires pour alimenter sa radio.

✂ **1962** : 3600 unités de batteries solaires de Bell sont utilisées pour alimenter Telstar, le premier satellite de télécommunications.

✂ **1970** : Développement de l'industrie photovoltaïque : la taille des photopiles accompagna d'ailleurs la progression de la dimension des wafers de l'industrie des circuits intégrés, de 2 pouces dans les débuts des années 70, à 3 pouces à la fin des années 70, 4 pouces au début des années 80, avant de s'émanciper par la découverte de la croissance de lingots multicristallins qui atteigne aujourd'hui couramment 12.5 à 15 cm de côté.

✂ **1997** : Le gouvernement fédéral américain annonce son initiative « Million Solar Roofs », qui vise à construire un million de toits solaires - 2010.

✂ **2002** : La NASA lance son avion solaire Pathfinder Plus.

✂ **2009** : Les scientifiques découvrent que les cristaux de pérovskite ont un grand potentiel en tant que matériaux photovoltaïques de troisième génération.

✂ **2014** : Une collaboration entre des scientifiques allemands et français produit un nouveau record d'efficacité de 46 % pour une cellule solaire à 4 jonctions.

✂ **2020** : Les cellules en pérovskite-silicium promettent une forte augmentation de l'efficacité solaire.

I.C.2 La conversion photovoltaïque

Le fonctionnement d'une cellule solaire repose sur l'effet photoélectrique, découvert par A. Becquerel en 1835 qui a mis en évidence pour la première fois la propriété de certains matériaux à convertir directement la lumière en énergie électrique. Ce phénomène fut expliqué plus tard en 1912 par A. Einstein. En 1954, la première cellule photovoltaïque a été mise au point par des chercheurs du laboratoire Bell aux USA, elle n'affichait alors à l'époque qu'un rendement de 4,5 % [I.10].

Il s'agit de l'absorption de photons par un matériau, qui convertit cette énergie lumineuse en énergie électrique. Pour obtenir une conversion photovoltaïque efficace, les matériaux choisis doivent satisfaire les conditions suivantes :

- En premier lieu, ils doivent absorber les photons issus du rayonnement solaire incident,
- Création des charges libres à l'intérieur de ces matériaux,
- Ces charges doivent ensuite rejoindre les électrodes ce qui suppose des mobilités de porteurs suffisamment élevées associées à une collection de charges efficace.

Dans le cas qui nous intéresse, le matériau est un semi-conducteur, le silicium, et la source d'énergie lumineuse est le soleil [I.11].

I.C.2.1 Les trois événements optiques d'un rayon lumineux

Tous flux solaire incident sur la surface de la cellule solaire subit trois phénomènes : une partie de rayonnement sera réfléchi ou diffusée, une autre sera absorbée c'est-à-dire transformée en énergie interne et une dernière sera transmise c'est-à-dire le flux incident traverse la couche active de cette cellule sans interactions (sans être absorbée), comme schématisé dans la figure ci-dessous.

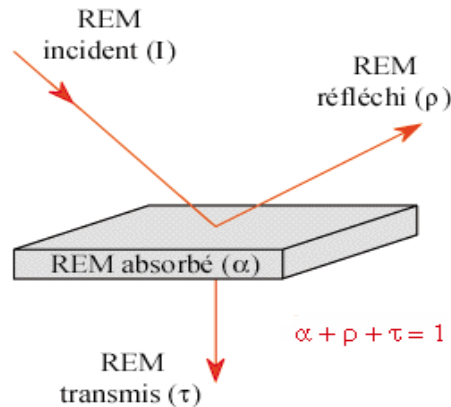


Figure I.7 : Les trois événements optiques d'un rayon lumineux

I.C.2.2 L'interaction photon/semiconducteur [I.12]

L'énergie solaire nous parvient sous forme de photons (ou d'ondes électromagnétiques) sur un large spectre de longueurs d'onde, tel que montré sur la Figure I-5 (b) et l'énergie solaire totale correspond à l'aire sous la courbe de cette figure. Ces photons ont une énergie E_{ph} (J) qui dépend de la longueur d'onde λ (m) telle que :

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.5)$$

avec h : la constante de Planck = $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s

c : la vitesse de la lumière = $2,998 \cdot 10^8$ m/s.

λ : la longueur d'onde (m).

Or, l'énergie en physique s'exprime souvent en eV, qui est l'énergie acquise par un électron lorsqu'il est soumis à un potentiel de 1 V ($1,602 \cdot 10^{-19}$ J), et qui permet de faire le lien avec les matériaux utilisés dans la conversion photovoltaïque. De ce fait, E_{ph} en eV peut s'écrire en fonction de la longueur d'onde en μm de la façon suivante :

$$E_{ph} = \frac{1.24}{\lambda} \quad (I.6)$$

Les photons de basse longueur d'onde et donc plus énergétiques (Ultra-Violet) seront absorbés dans les premiers micromètres de la cellule tandis que les photons de plus grande longueur (Infra rouge) peuvent atteindre de la face arrière et être réfléchis par cette dernière. Dans le silicium à gap indirect, l'absorption se fait par transition indirectes non-radiatives pour des longueurs d'onde entre 700nm et 1100 nm. Pour les photons plus énergétiques (Au-delà de l'énergie du gap \approx 1100 nm), il est possible d'exciter verticalement des électrons du sommet de la bande de valence vers le minimum central de la bande de conduction. Les

électrons ainsi excités, se thermalisent ensuite dans le minimum absolu de la bande de conduction et peuvent participer aux phénomènes de conduction.

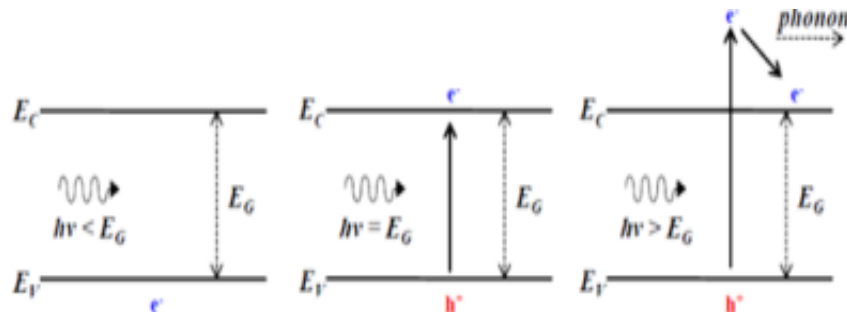


Figure 1-8 : Effet de l'énergie d'un photon incident pour un matériau semi-conducteur [I.12]

I.C.2.3 Propriétés du gap

Le gap qui sépare la bande de conduction et la bande de valence n'est pas constant dans l'espace des vecteurs d'onde (k). Les valeurs de gap direct usuelles correspondent au maximum de la bande de valence et au minimum de la bande de conduction (c'est-à-dire la valeur de gap minimale) [I.13]. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (figure I-9 (a)). Ceci illustre le fonctionnement des semiconducteurs binaires III-V, tels que le GaAs. Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement de vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (figure I-9 (b)). Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de 1.12 eV à 300 K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut 3.4 eV (soit 365 nm) [I.6].

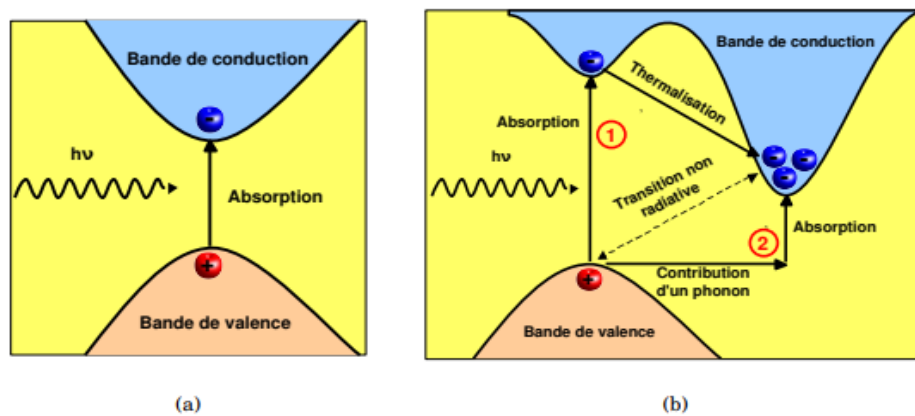


Figure I-9 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semiconducteur.
 a) Correspond à un semiconducteur à gap direct -b) à un gap indirect [I.14]

I.C.2.4 L'absorption du rayonnement

Les photons incidents sont absorbés par le silicium en fonction de leur longueur d'onde, et ce phénomène est décrit par la loi de Lambert :

$$I = I_0 \exp(-\alpha z) \tag{I.7}$$

$$\alpha = \alpha(\lambda) = \frac{4\pi k}{\lambda} \tag{I.8}$$

avec I_0 : Intensité lumineuse incidente

I : Intensité lumineuse transmise

z : profondeur (cm)

α : coefficient d'absorption dépendant de longueur d'onde et de k coefficient d'extinction du matériau (cm^{-1})

λ : longueur d'onde (m)

Le silicium est un semi-conducteur ayant une structure de bandes à gap indirect d'une valeur de 1.12 eV à température ambiante ce qui signifie qu'un photon d'une longueur d'onde inférieure à 1107 nm pourra générer une paire électron-trou¹. On parle de la photogénération.

Le silicium possède également un gap direct à 3.4 eV qui donnera lieu à des transitions radiatives pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm. Concrètement, ces deux gaps vont permettre l'absorption des photon incidents (création de paires électrons-trous) par le silicium dont l'efficacité dépendra de la longueur d'onde de ces photons (figure I.10).

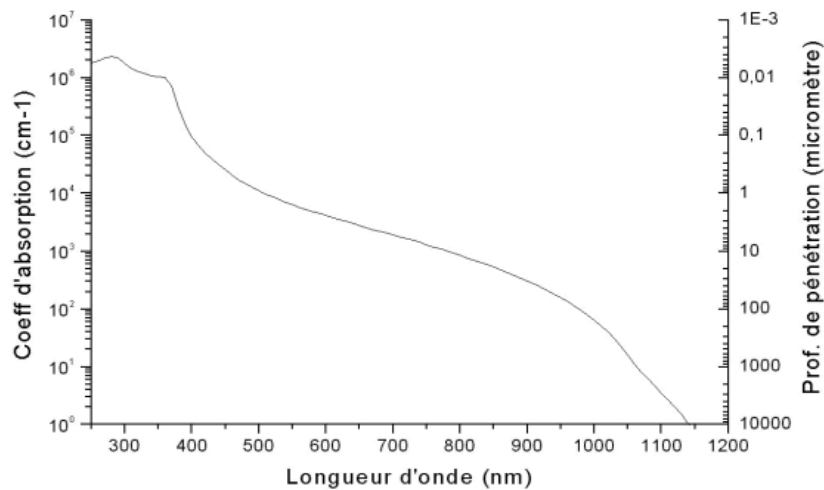


Figure I.10 : Evolution du coefficient d'absorption dans le silicium selon la longueur d'onde du photon incident [I.15]

Pour les longueurs d'onde inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbés dans les cents premiers angströms du matériau. Dans ce cas, les transitions sont radiatives car elles impliquent le gap direct. Au-delà de 365 nm, les seules transitions possibles sont celles impliquant le gap indirect, moins probables, ce qui entraîne la diminution du coefficient d'absorption.

I.C.2.5 Structure de la cellule standard

Les matières premières utilisées lors de la réalisation des cellules solaire sont des wafers de silicium mono ou multi-cristallins, des plaques rondes, carrées ou « pseudo-carré » d'une épaisseur variant de 180 à 300 μm . Une cellule solaire « standard » au silicium cristallin est composée des éléments suivants :

- un substrat de silicium de type p , appelé base,
- un émetteur homogène n^+ ,
- une couche antireflet,
- des contacts métalliques pour collecter les charges

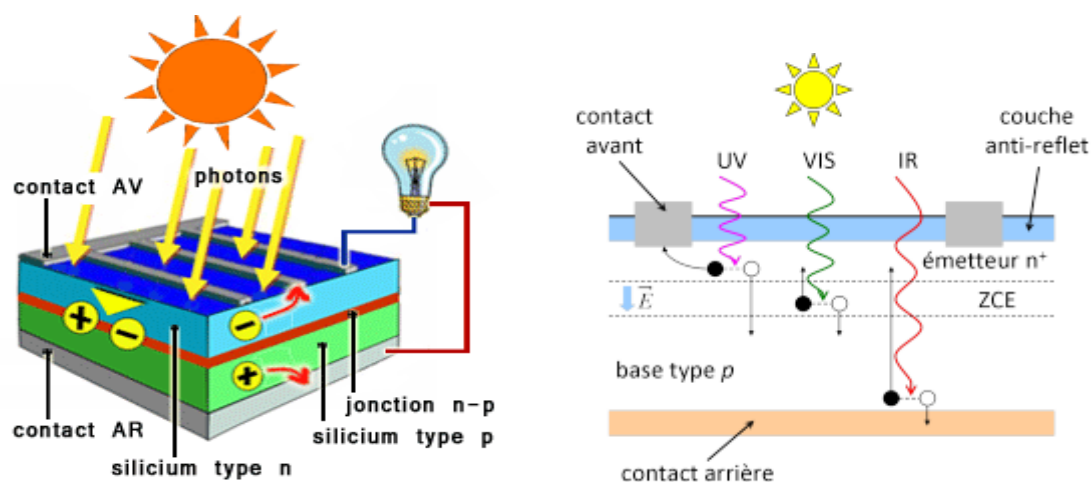


Figure I.11 : Structure d'une cellule standard au silicium cristallin de type P [I.16]

I.C.2.6 Principe de fonctionnement des dispositifs photovoltaïques

Dans la cellule solaire, la jonction PN est la clé de la production d'énergie photovoltaïque. Il s'agit de mettre en contact deux semi-conducteurs de dopage différent, l'un de type P comportant un excès de trous libres (fort défauts d'électrons) dû au dopage par un élément de la colonne III du tableau périodique (bore) et l'autre de type N comportant un excès d'électrons en raison du dopage par un élément de la colonne V (phosphore).

Lorsque la cellule est exposée à la lumière, les photons incidents d'une énergie supérieure à l'énergie de gap du silicium ($E_g = 1.12 \text{ eV}$) sont absorbés par le matériau et créent des porteurs libres dans les régions P et N. Les porteurs de charges minoritaires diffusent jusqu'à la jonction : Les électrons se diffusent vers la zone P (e- sont majoritaires dans la couche n se diffusent vers la couche p ou ils sont minoritaires) et les trous vers la zone n (trous majoritaires p diffusent vers minoritaires n) et se rencontrent dans une zone appelée Zone de Charge d'Espace (ZCE).

La différence de concentration (dû au dopage) entre les deux zones P et N produit un potentiel de diffusion V_d , qui conduit à la création d'un champ électrique intrinsèque à la jonction. On distingue alors dans la diode p/n, deux types de zones : les zones neutres (émetteur et base) où il n'y a aucun champ électrique, et la zone de charge d'espace ZCE où le champ électrique sert à éviter toute recombinaison entre les porteurs, il repousse les porteurs minoritaires vers la zone où ils sont majoritaires [les électrons vers la zone n et les trous vers la zone p]. Ces

porteurs de charges seront collectés par les contacts métalliques, créant un courant de photogénération qui peut être acheminé jusqu'au réseau électrique [I.17].

Lorsque la base et l'émetteur de la diode sont réalisés dans un seul et même matériau, on parle d'une structure à homo-jonction. Les structures à hétérojonction consistent quant à elles à mettre en contact deux matériaux différents pour réaliser la jonction.

I.C.2.7 La cellule idéale

Les performances d'une cellule solaire sont principalement évaluées à partir de sa caractéristique courant-tension sous un éclairage normalisé (spectre solaire AM1.5G, d'une puissance de 1000 W/m², à 25°C). La courbe courant-tension, représentée sur la Figure I-8, suit dans le cas idéal l'équation de la diode.

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qv}{kT}} - 1 \right) \quad (I.9)$$

Où I_{ph} est le courant photo généré
 I_0 le courant de saturation de la diode
 q la charge de l'électron
 k la constante de Boltzmann
 T la température en Kelvin

I.C.3 Caractéristique courant-tension de la cellule solaire

I.C.3.1 Paramètres de la cellule solaire

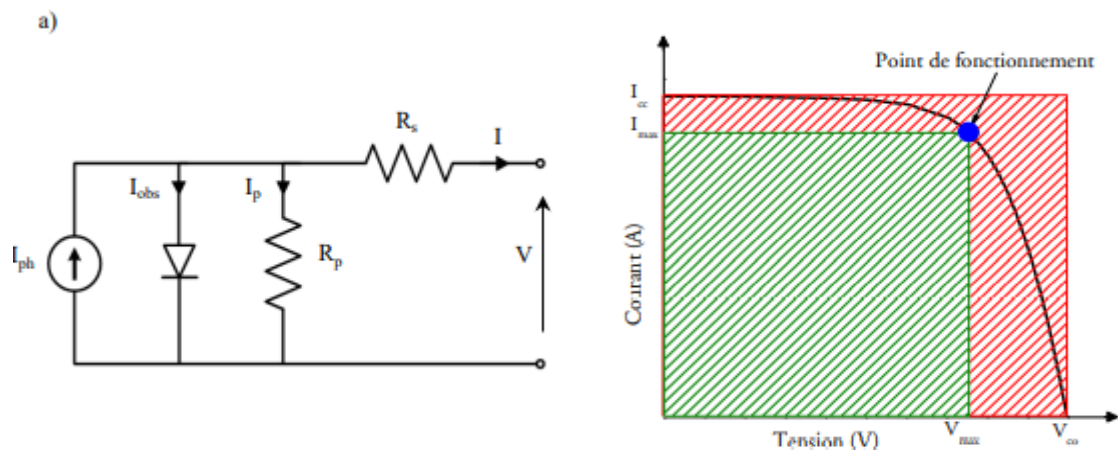


Figure I-12 : Caractéristique courant-tension sous éclairage typique d'une cellule solaire

Comme le montre la Figure I.12, une cellule photovoltaïque idéale peut être modélisée comme une source de courant (I_{ph} le courant photo généré) mise en parallèle avec une diode. Pour

correspondre davantage à la réalité, une résistance parallèle (ou résistance de shunt, notée R_{SH}) et une résistance série (notée R_S) sont ajoutées à ce modèle à une diode. Une cellule photovoltaïque performante a une résistance série la plus faible possible pour réduire les pertes en tension et une résistance parallèle la plus élevée possible pour minimiser le courant de fuite I_{sh} . A partir de la mesure (I-V) d'une cellule photovoltaïque sous illumination, différents grandeurs caractéristiques sont extraite :

I_{cc} : Le courant de court-circuit correspond au courant lorsque la tension aux borne de la cellule est nulle ($V=0$)

V_{co} : La tension de circuit ouvert représente la valeur maximale de tension que peut produire la cellule lorsque le courant de sortie est nul ($I=0$).

P_m : Quand la puissance délivrée par la cellule est maximale, on dit qu'il s'agit du point de puissance maximale P_m . Il correspond à un courant maximum I_m et une tension V_m .

FF : Le facteur de forme « Fill Factor (FF) » en anglais) exprimé en %, équivaut au rapport entre la puissance maximale débitée et la puissance idéale (voir équation I-10). Il dépend des pertes résistives qui limitent le passage des charges dans le dispositif, de la présence de courants de fuite mais également de certains phénomènes de recombinaison. Il est exprimé par :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.10)$$

η : Le rendement de conversion, exprimé en %, représente le rapport entre la puissance générée et la puissance du rayonnement solaire incident sur la cellule exprimé par :

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i S} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_i S} \quad (I.11)$$

Le rendement d'une cellule dépend aussi à la base du nombre de photons y pénétrant. Cette quantité est limitée par le coefficient de réflexion R de la surface de la cellule, qui pondère toutes les équations des courants photo-générés par un coefficient $(1-R)$. Pour diminuer les réflexions, la surface de la cellule doit être texturée et aussi recouverte d'une couche anti-reflet.

R_s : Les résistances séries, qui quantifient les pertes de tension dans les métallisations, au niveau des contacts et du substrat. Une valeur correcte de $0.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

R_p : La résistance parallèle, qui met en évidence les courants de fuite au niveau de la jonction pn. Des valeurs élevées sont préférables, supérieures à $10\,000 \Omega \cdot \text{cm}^2$

I.C.3.2 Rendement quantique

La courbe courant-tension d'une cellule solaire permet d'obtenir une multitude d'informations sur le fonctionnement de la cellule, mais elle reste néanmoins limitée. Elle ne donne en effet aucune indication précise sur la localisation des pertes et donc sur la raison de la diminution d'un ou des différents paramètres électriques I_{cc} , V_{co} et FF. Le rendement quantique interne (IQE) permet d'obtenir plus d'informations dans ce sens. Ce dernier correspond au rapport entre les porteurs collectés (correspondant au courant de court-circuit) et le nombre de photons pénétrant le matériau pour une longueur d'onde donnée.

Ainsi, dans le cas idéal où tous les photons incidents génèrent une paire électron-trou, qui est ensuite collectée, le rendement quantique est égal à 1. Le fait de se placer à une longueur d'onde donnée va permettre d'analyser la cellule à différentes profondeurs, comme le montre la figure 1.13. Ainsi, on remarque que l'émetteur, en face avant de la cellule, contribue au rendement en dessous de 500 nm, alors que la ZCE a un effet maximal à 500 nm. Quant à la base, elle influe sur le rendement quantique aux fortes longueurs d'onde.

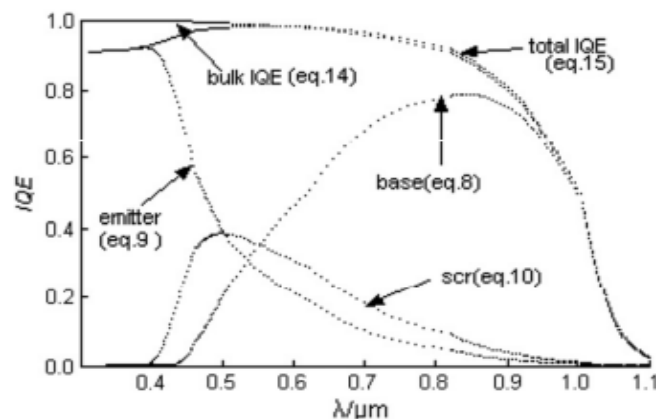


Figure 1.13 : Rendement quantique d'une cellule solaire en silicium (total IQE), avec les contributions des différentes zones de la cellule solaire [I.18]

Autrement dit [I.19]

- pour $\lambda < 500$ nm, l'absorption est élevée et les paires électrons-trous seront générées dans les premiers nanomètres du silicium. Cette partie de la réponse spectrale caractérisera donc l'influence de la face avant (recombinaisons).

- pour $500 \text{ nm} < \lambda < 900$ nm, l'absorption est plus faible et la génération de porteurs sera répartie sur une plus grande profondeur du silicium. La partie correspondante de la réponse spectrale est généralement élevée et permet par simulation de la cellule d'extraire la durée de vie du substrat.

– pour $900 \text{ nm} < \lambda < 1100 \text{ nm}$, l'absorption devient faible et la création de paires électrons-trous se fait à plusieurs centaines de micromètres dans la profondeur de la cellule. Cette partie de la réponse est liée à la face arrière (réflectivité, recombinaisons).

Au-delà de l'énergie du gap ($\approx 1100 \text{ nm}$), le taux de génération de pair électron-trou devient négligeable. Il est donc possible, grâce à l'évaluation du rendement quantique, de localiser plus précisément les sources limitant les performances de la cellule.

I.C.3.3 Influence de la température

Une augmentation de température de la cellule entraîne une dilatation du réseau cristallin. La valeur de la bande interdite E_g diminue, ce qui provoque une augmentation du courant de saturation. A l'inverse, davantage de photons sont absorbés dans les grandes longueurs d'onde, ce qui conduit à une très légère augmentation du courant de court-circuit. Un fonctionnement à la température la plus basse possible permet l'obtention d'un meilleur rendement de conversion. [I.20]

I.D Limitations du rendement

Depuis l'élaboration de la première cellule solaire, son efficacité (η) a agité la communauté scientifique. L'énergie incidente n'est pas convertie totalement en électricité, plusieurs facteurs de pertes viennent influencés le rendement de cette cellule. Ces facteurs limitants sont de deux natures : soit aux propriétés physiques intrinsèques du matériau utilisé, soit aux limitations technologiques induites par le processus de fabrication (propriétés extrinsèques du matériau). Décrivons comme suit :

I.D.1 Pertes physiques

Sont des pertes énergétiques liées à des limitations propres au matériau utilisé pour l'élaboration de la cellule solaire.

I.D.1.1 Pertes des photons de faible énergie inférieure au gap (grandes longueurs d'onde)

Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semiconducteur ($\lambda > \lambda_g$) ne peuvent générer de paires électron / trou et sont donc perdus (Figure 6) car les électrons ne peuvent pas passer le gap. Dans le cas du silicium, ces pertes sont évaluées à 23.5% sous un éclairage de AM1.5G. [I.21]

I.D.1.2 Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons supérieure au gap (thermalisation)

Les photons ayant une énergie supérieure à l'énergie de gap du matériau et donc de longueur d'onde inférieure à 1100 nm, génèrent des porteurs libres qui seront dissipées par la suite sous

forme de chaleur, on a alors un phénomène appelé « thermalisation » (Figure I.14). Dans le cas du silicium, ces pertes sont évaluées à 33% sous un éclairage de AM1.5G. [I.21].

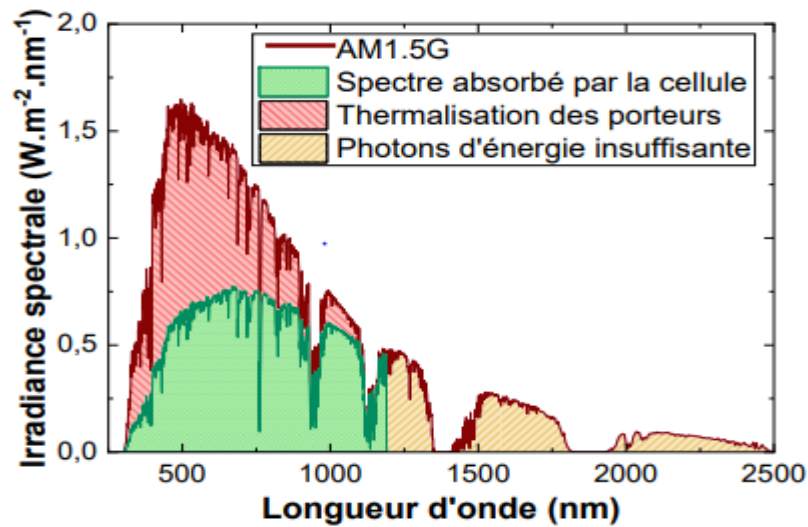


Figure I- 14 : Comparaison entre le spectre solaire AM1.5G et le spectre réellement exploité par une cellule silicium. Mise en évidence du phénomène de pertes par thermalisation pour les énergies de photons supérieure à 1.12 eV (zone rouge) ainsi que de la zone de non absorption des photons d'énergie inférieure à l'énergie du gap du silicium cristallin (zone jaune) [I.22]

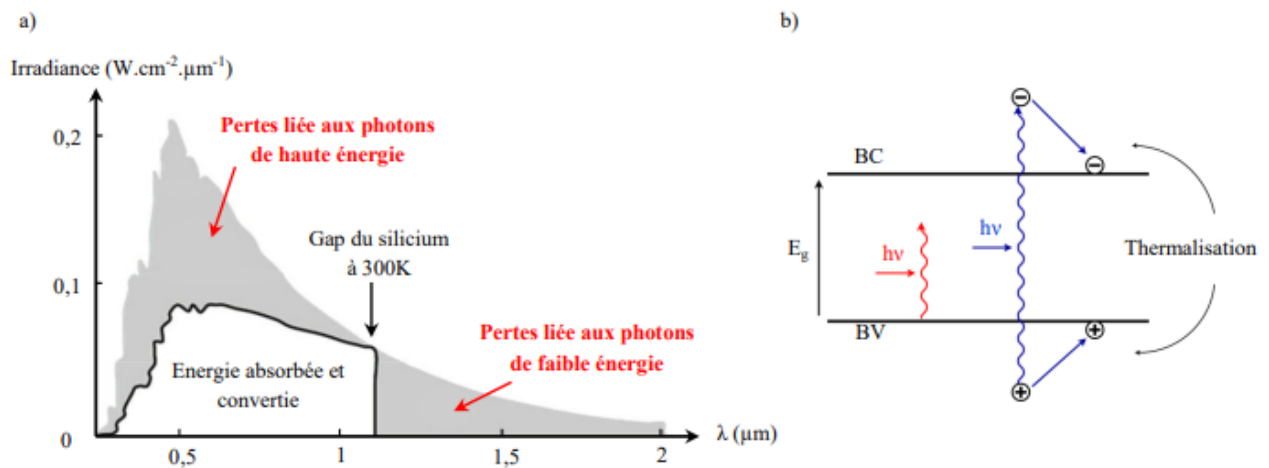


Figure I.15 : a) Principales pertes intrinsèques pour une cellule photovoltaïque en silicium liées aux phénomènes de thermalisation des porteurs et de non-absorption, b) Illustration des phénomènes de pertes : en rouge la non absorption d'un photon de faible énergie, en bleu la thermalisation des porteurs générés par un photon trop énergétique [I.21]

Les limites technologiques sont multiples, peuvent être regroupées en trois catégories distinctes :

I.D.2 Pertes optiques

Les pertes optiques résultent de l'absorption imparfaite des photons par la cellule de différentes manières. D'une part, le dépôt d'une grille métallique sur la face avant de la cellule provoque un phénomène d'ombrage. Ce dernier réduit alors le flux de photon interagissant avec le substrat. D'autre part, la réflectivité du silicium joue un rôle très important dans les pertes optiques car l'indice de réfraction optique du silicium est beaucoup plus élevé que celui de l'air. Ces pertes sont de l'ordre de 32% de la lumière incidente.

Notamment, des traitements de surface appelés « texturations » et le dépôt de couches antireflet en face avant (figure I.16) permettent de diminuer la réflectivité de la cellule.

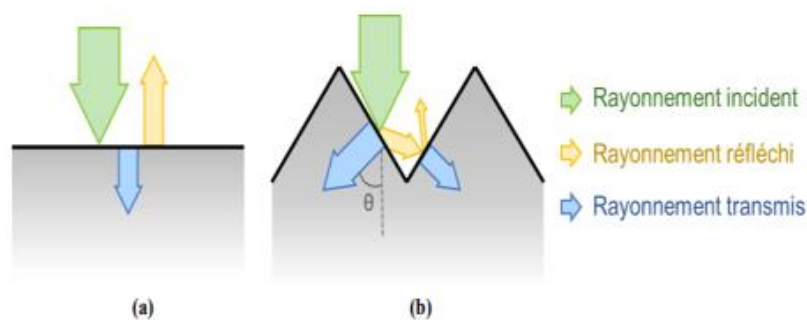


Figure I.16 : Schématisation de réflectivité sur une surface plane (a) et texturée (b) [I.17]

I.D.3 Pertes par recombinaison des porteurs de charges

Une fois que la paire électron-trou est formée par absorption d'un photon, les porteurs de charge doivent réussir à atteindre les collecteurs en surface avant leur recombinaison (recombinaison d'un électron (e^-) avec un trou (h^+)). Le temps et la distance parcourus par un porteur avant d'être recombinaison sont caractérisés par leur durée de vie (τ_{eff}) et leur longueur de diffusion L_D .

La durée de vie peut être déterminée à partir du taux de recombinaison (U) et s'exprime pour le silicium de type n et de type p :

$$\tau = \frac{\Delta p}{U}, \quad \tau = \frac{\Delta n}{U} \quad (\text{I.12})$$

Δn et Δp sont les concentrations d'électrons et de trous en excès.

Si l'on considère un substrat de silicium monocristallin (c-Si) différents types de recombinaisons sont à considérer : les recombinaisons volumiques (radiatives, Auger ou Shockley-Read-Hall (SRH)) et les recombinaisons surfaciques [I.23-I.24]. Dans une cellule solaire en c-S les différents mécanismes de recombinaison se traduisent par l'équation (I-3) :

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{volumique}} + \frac{1}{\tau_{surfacique}} \Leftrightarrow$$

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \left(\frac{1}{\tau_{radiative}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} \right) + \frac{1}{\tau_{surfacique}} \quad (I.13)$$

I.D.3.1 Recombinaisons en volume

Pour évaluer la qualité du matériau pour cellules solaires, la longueur de diffusion des porteurs de charge, s'exprimant en général en μm , et utilisée à la place de la durée de vie car elle décrit mieux les phénomènes de transport de charges qui donnent naissance au photocourant.

Il existe trois mécanismes principaux de recombinaisons volumiques dans les semi-conducteurs qui sont décrits brièvement dans cette partie : recombinaison SRH, Auger et radiative.

a) Les recombinaisons Shockley-Read-Hall (SRH)

La recombinaison en volume due aux défauts, ou recombinaison SRH pour Shockley-Read-Hall. Les défauts cristallins et les impuretés créent des niveaux d'énergie supplémentaires au sein de la bande interdite facilitant la recombinaison des porteurs [I.25-I.26], par un mécanisme en deux étapes. Un électron va par exemple se relaxer de la bande de conduction vers le niveau discret, puis à nouveau vers la bande de valence pour se recombiner avec un trou. Pour cette raison, la cellule solaire doit être fabriquée par des matériaux de base qui contient un minimum des impuretés et des défauts cristallins. Les joints de grains sont également des centres de recombinaison par ce mécanisme [I.11].

b) Les recombinaisons radiatives :

La recombinaison radiative, aussi appelée recombinaison bande à bande, est le procédé inverse à la photo génération. Elle intervient lorsqu'un électron de la bande de conduction retourne par recombinaison avec un trou dans la bande de valence, cédant alors une énergie proche mais supérieure à celle du gap du semi-conducteur sous la forme d'un photon lumineux. Il existe une probabilité faible de réabsorption de ce photon et ainsi de création

d'une nouvelle paire électron/trou (e^-/t^+). Dans le cas du silicium à gap indirect, les recombinaisons radiatives impliquent la participation d'un phonon (vibration cristalline émise ou absorbée) dans le processus. Dans un semi-conducteur à gap direct comme le GaAs, les recombinaisons radiatives sont plus probables que dans les semi-conducteurs à gap indirect comme le silicium [I.17].

c) Les recombinaisons Auger

La recombinaison Auger est un phénomène à trois particules : l'énergie de la recombinaison bande à bande de l'électron et du trou va être transférée à un électron de la bande de conduction ou à un trou de la bande de valence. Cette énergie est par la suite dissipée par thermalisation. L'influence de ce type de recombinaison n'est significative qu'à haut niveau d'injection, comme pour les cellules sous lumière concentrée, ou à haut niveau de dopage, comme dans les émetteurs. La durée de vie des porteurs varie alors en $1/n$ avec la densité de porteurs.

I.D.3.2 Les recombinaisons en surface

Les recombinaisons surfaciques sont aussi dues aux défauts. En surface, la discontinuité du réseau cristallin engendre la présence de nombreuses liaisons pendantes, responsables d'une répartition quasi-continue d'états énergétiques dans la bande interdite et provoquent des recombinaisons. Ces défauts sont généralement passivés en supprimant les liaisons pendantes de deux façons. D'une part, les états d'interfaces sont neutralisés en supprimant les liaisons pendantes par l'ajout d'un diélectrique qui assure la continuité des liaisons. D'autre part, en utilisant un effet de champ, les porteurs sont repoussés du voisinage de la surface et ne peuvent donc pas s'y recombinaison. Ceci est réalisé par un dopage localement plus élevé (Front- ou Back Surface Field), ou bien par un diélectrique chargé, qui engendre une couche d'accumulation ou d'inversion.

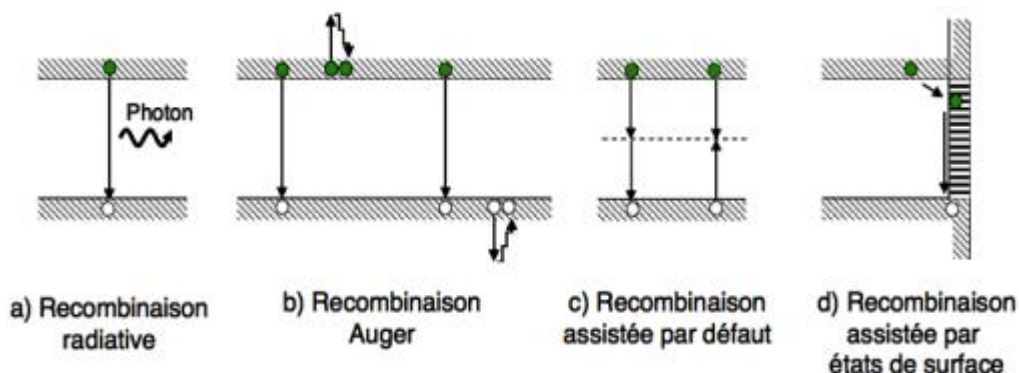


Figure I.17 : Représentation des différents mécanismes de recombinaisons [I.18]

Les recombinaisons diminuent la tension de circuit ouvert via le courant de saturation I_{01} , ainsi que le courant de court-circuit, lorsque les charges se recombinent avant d'avoir atteint la ZCE. Les recombinaisons, lorsqu'elles ont lieu dans la ZCE, auront un effet sur le courant de saturation I_{02} . Ces deux paramètres ont également un effet direct sur le facteur de forme [I.27].

I.D.4 Pertes résistives

Le rendement de la cellule est également affecté par les pertes résistives. Elles sont dues notamment de différentes natures, soit par résistance parallèle qui doit tendre vers l'infini, par résistance série qui doit tendre vers zéro ou bien par recombinaisons des porteurs au sein de la zone de charge d'espace. En tenant compte des pertes technologiques, la cellule peut être modélisée par le schéma de la Figure I-18 à deux diodes. L'équation de sa courbe I(V) est :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{qV - IR_s}{n_1 K T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{qV - IR_s}{n_2 K T}} - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{I.14})$$

avec R_s la résistance série, correspondant aux pertes par effet Joule

R_{sh} la résistance shunt, correspondant aux fuites de courant

I_{01} le courant de génération-recombinaison dans la ZCE

I_{02} le courant de diffusion dans les zones neutres (zone n et zone p)

n_1 et n_2 les facteurs d'idéalité des diodes 1 et 2 respectivement

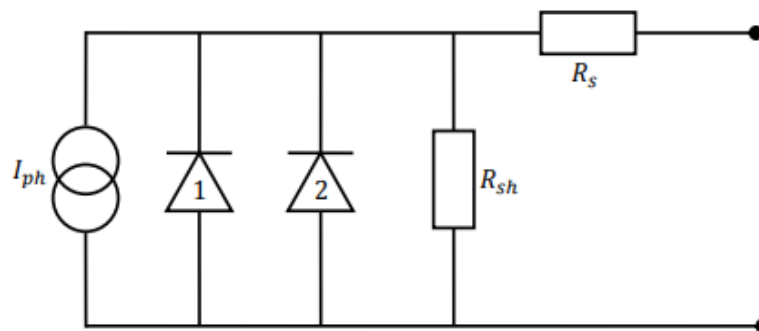


Figure I.18: Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire [I.28]

Les pertes optiques sont reflétées par une baisse de la valeur de I_{ph} , les pertes résistives par R_s et R_p . La recombinaison se traduit par les valeurs de I_{01} , I_{02} , n_1 et n_2 [I.11].

La figure I.19 montre les effets des résistances parasites sur la caractéristique I-V de la cellule. Au vu de ces figures, on constate que la résistance série n'a pas d'effet sur la tension de circuit ouvert. Cependant, si elle est trop élevée ($20 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ sur la figure), elle peut

entraîner une réduction du courant de court-circuit. Quant à la résistance parallèle, elle aura d'autant plus d'effet qu'elle est faible. Dans le cas d'une résistance parallèle très faible, elle peut de plus entraîner une diminution de la tension de circuit ouvert. Dans les deux cas, les pertes résistives influenceront évidemment sur le facteur de forme.

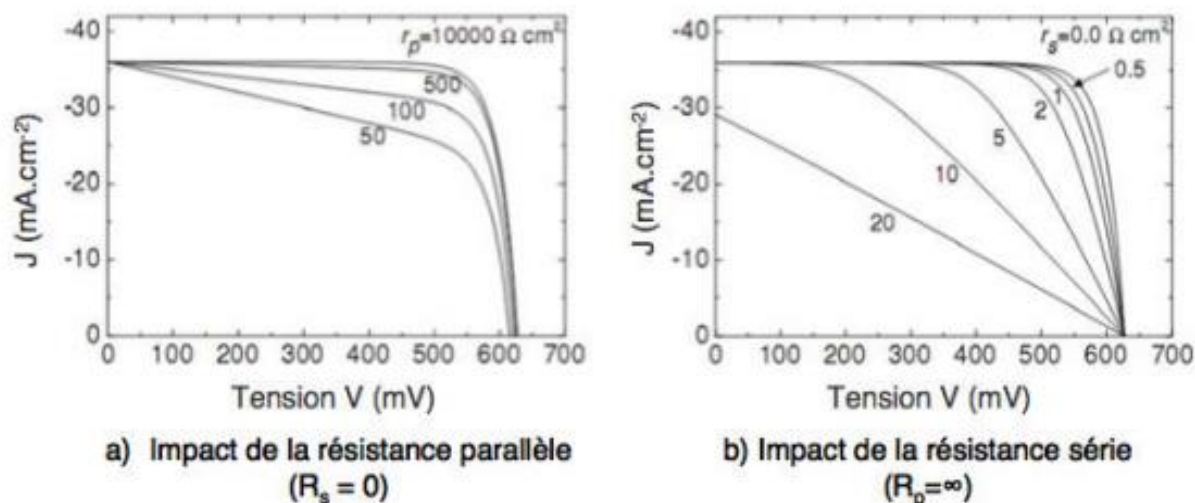


Figure 1.19 – Caractéristiques I-V sous éclairage mettant en valeur les effets des résistances parasites [I.29]

I.E Limitation des pertes

Plusieurs solutions peuvent intervenir pour améliorer le rendement de la cellule industrielle. En premier lieu, la qualité des matériaux utilisés et aussi la technique de fabrication de la cellule solaire.

Nous allons maintenant nous attarder sur les structures et procédés mis en place lors de la réalisation de la cellule photovoltaïque standard afin de limiter ces pertes.

I.E.1 La couche anti-reflet

Afin de minimiser la réflexion de la lumière incidente, une couche antireflet (CAR) est déposée sur la face avant de la cellule (voir figure I.20). Les couches anti-réfléctives utilisées dans la fabrication des cellules solaire peuvent être isolantes comme SiO_2 , SiN_x , TiO_2 , MgF_2 et ZnS ou conductrices comme le ZnO ou l'ITO (Indium Tin Oxyde). La réflectivité dépend de l'indice de réfraction du matériau, de l'épaisseur du matériau, de l'épaisseur de la couche déposée, de l'angle d'incidence et de l'état polarisation du rayon incident. Les couches ARC ayant un indice de réfraction intermédiaire entre l'air ($n=1$) et le silicium ($n=3.6$).

En incidence normale, on a la relation :

$$d_{car} = \frac{(2N+1)\lambda}{4n_{car}} \tag{I.15}$$

Où d_{car} est l'épaisseur de la couche antireflet, n_{car} son indice optique, λ la longueur d'onde considérée et N un nombre entier positif. Dans le procédé standard, la couche antireflet utilisée est du nitrure de silicium SiN_x d'indice moyen 2 aux longueurs d'onde visibles et d'épaisseur voisine de 75 nm.

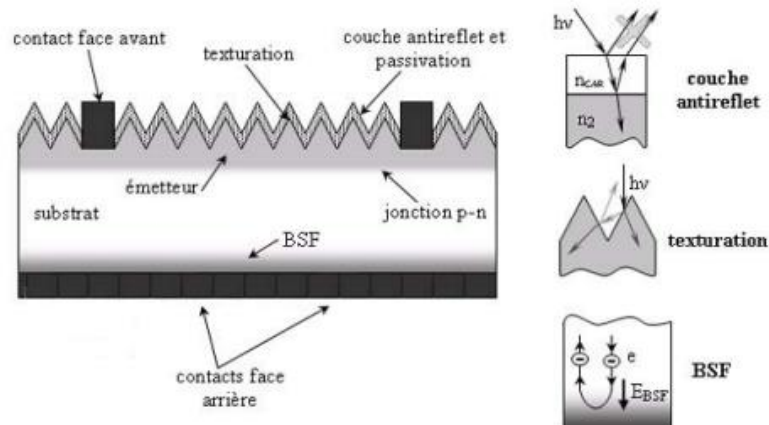


Figure I.20 : Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium [I.18]

I.E.2 La texturisation en surface

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à créer une rugosité de surface, qui sert à modifier l'angle incident de la lumière et favorise la possibilité pour le rayon réfléchi d'arriver une seconde fois à l'interface avec la cellule. Les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique (cf. figure I.20).

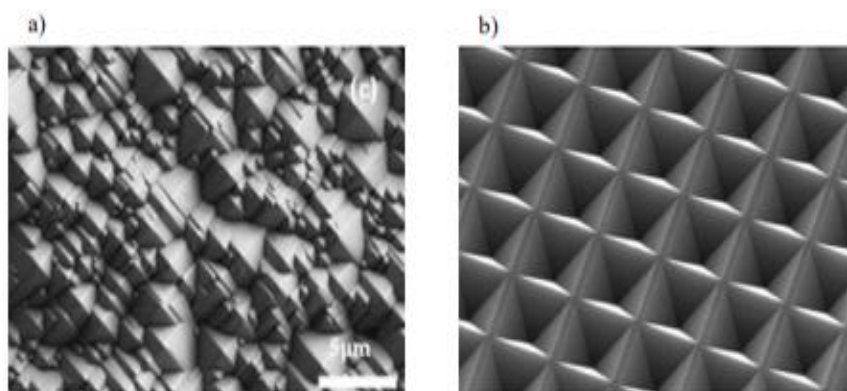


Figure I.21 : Exemples de texturisations classiques réalisées sur des substrats de silicium cristallin :
a) Pyramides aléatoires formées par gravure TMAH [I.30], b) réseau de pyramides inversées formées par gravure KOH combinée à un masque localisé [I.31]

Le procédé le plus employé pour réaliser la texturisation de la surface est une attaque chimique KOH (hydroxyde potassium) ou TMAH (tétraméthylammonium hydroxyde [I.32-I.33] créant une rugosité en forme de pyramides aléatoires micrométriques ou bien des réseaux ordonnés de pyramides inversées après une étape de lithographie (Figure I.21)

I.E.3 Formation de l'émetteur

L'émetteur en général formé par diffusion gazeuse POCl_3 . Pour favoriser le contact entre le métal et la surface, la concentration de dopants en surface est importante ($2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$). La profondeur de diffusion est de $0.5 \mu\text{m}$ environ ($R_{\square} = 40 \Omega/\square$).

Néanmoins, ce fort dopage entraîne des recombinaisons par mécanisme Auger à la surface, faisant augmenter le courant de saturation de l'émetteur I_c [I.34]. Le développement du concept de l'émetteur sélectif consistant à réduire le niveau de dopage surfacique entre le contact ($R_{\square} = 100\text{-}150 \Omega/\square$) et à garder un dopage élevé au dessous du contact peu prétendre à un gain de 1 de rendement absolue, à condition que l'effet de la passivation de surface avec la couche diélectrique de SiN soit efficace [I.35].

I.E.4 La région de la base

Le substrat silicium possède une qualité électronique limitée par la présence de joint de grains.

La durée de vie peut être améliorée grâce à deux phénomènes sont :

- l'effet getter permet de piéger les impuretés pendant la diffusion POCl_3 ,
- la présence d'une couche de nitrure de silicium SiN consiste à passiver en volume le matériau par injection d'hydrogène [I.20].

I.E.5 BSF

le champ électrique appelé champ BSF (Back surface field) consiste à créer sur la face arrière une barrière de potentiel pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau du dopage entre la base et le BSF (jonction p^+/p) tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Le but de ce champ c'est pour diminuer les vitesses de recombinaison [I.18].

I.E.6 Les contacts métalliques

Dans la fabrication d'une cellule photovoltaïque, la mise en place de contacts électriques représente l'ultime étape. Ceci, passe par la réalisation d'une grille métallique sur la face avant de la cellule et d'une couche métallique sur la face arrière.

La formation d'un contact sur la face arrière se fait par une simple méthode qui sert à sérigraphier une pâte d'aluminium et à la faire diffuser pendant une minute à une température

de 850°C. Cette pâte est obtenue par le mélange à chaud d'une poudre fine d'aluminium dans un solvant (terpinéol) et d'un liant (éthyle cellulose). En plus d'obtenir le champ face arrière et le contact ohmique, cette diffusion d'aluminium couplée à la diffusion de phosphore en face avant, produit un effet getter qui s'avère efficace pour l'élimination des impuretés présentes dans la couche de silicium.

Pour la réalisation de la grille en face avant, l'étape du procédé est la plus délicate : il s'agit d'établir un contact ohmique dont la résistance devra être minimale, à une température inférieure à celle des précédentes étapes, avec un matériau économique, soudable et résistant à la corrosion. Il est également important que la grille puisse avoir un taux d'ombrage le plus faible possible afin de conserver un fort rendement d'absorption de lumière incidente. La méthode la plus classique est celle développée par la société Solarex et qui consiste à évaporer sous vide à travers un masque préalablement déposé une couche de titane suivie d'une couche de palladium et à déposer ensuite une couche d'argent par électrolyse. Cette technique présente l'avantage d'assurer une faible résistance série et coefficient d'ombrage mais présente l'inconvénient d'être trop coûteuse [I.36].

I.F Procédé de fabrication de la cellule standard

La structure d'une cellule solaire est présentée sur la figure I.20. Son procédé de réalisation comporte six étapes principales, schématisées sur la figure I.22.

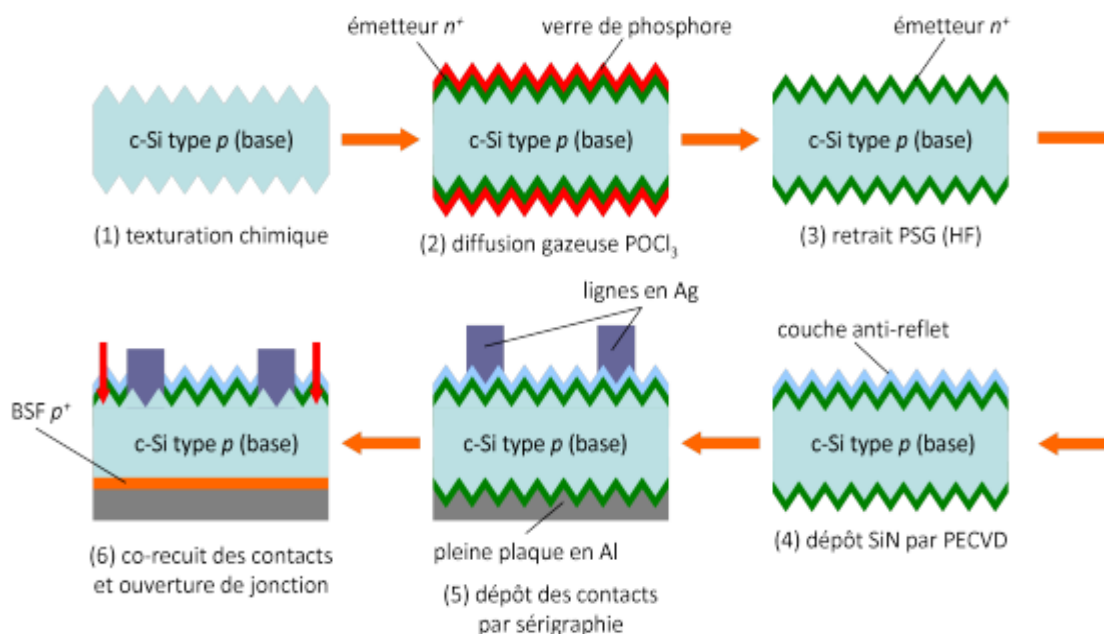


Figure I.22 : Procédé de fabrication d'une cellule solaire au silicium cristallin de type p [I.16]

Après une étape de texturisation chimique, l'émetteur n^+ est réalisé par diffusion POCl_3 . Le vert de phosphore résiduel est ensuite retiré grâce à une solution de HF diluée, puis une couche antireflet de nitrure de silicium (SiN) est déposée par PECVD en face avant de la cellule. Les contacts sont ensuite déposés par sérigraphies : lignes et *busbars* en argent en face avant, pleine plaque en aluminium en face arrière. Les métallisations sont alors recuites dans un four infrarouge. Lors de cette étape, un alliage aluminium-silicium se forme en surface arrière de la cellule, permettant de créer un champ répulsif p^+ (appelé BSF, de l'anglais Back Surface Field). La création de cet alliage a pour effet de lisser la texturisation en face arrière, comme schématisé à l'étape (6) de la figure I.22. Enfin, la jonction est ouverte à l'aide d'un laser, c'est-à-dire que l'émetteur n^+ est isolé de la base de type p : sans cette étape la cellule serait en situation de court-circuit.

I.G Les générations de cellules solaires

Les recherches actuelles sur les cellules solaires s'articulent autour de multiples technologies. Ces différentes technologies photovoltaïques peuvent être regroupées en différentes générations en fonction du ou des matériaux semi-conducteurs utilisés et des technologies sous-jacentes :

I.G.1 Les cellules solaires de la première génération : Ce genre de cellule se caractérise par une seule jonction p - n à base de silicium sous forme cristalline constituée généralement d'un substrat en silicium massif réalisé par la technique du tirage et découpage basée sur les wafers de silicium, une technique simple, mais trop coûteuse en plus elle exige un silicium de grande pureté. La première cellule solaire a été réalisée en 1954 par les laboratoires Bell a donné un rendement de 6% qui a été amélioré à 10% par la suite.

I.G.2 Les cellules solaires de la deuxième génération : (cellules à couche mince) l'apparition de cette génération de cellule revient à la fin des années quatre-vingts à cause du besoin crucial de l'énergie. Ce type de cellule succédait les cellules à base de silicium cristallin ayant comme principal objectif la réduction des coûts de fabrication,

Les cellules solaires de cette génération représentent les cellules solaires à base de couche mince possédant une épaisseur inférieure à 50 μm , La fabrication de ces cellules se fait par des procédés de dépôt sous vide coûteuse et qui offrent l'avantage d'employer d'autre substrat que le silicium tel que le verre ou le polymère et qui nécessitent l'utilisation de quelques micromètres de silicium. Cette technologie de couche mince a permis d'obtenir des rendements concurrents à la 1^{ère} génération et moins coûteux.

I.G.3 Les cellules solaires de la troisième génération : Cette troisième génération de cellule solaire est encore au stade de précoce de la recherche. Cependant, leur développement est très actif et motivé par les applications spatiales vu qu'elles visent principalement à obtenir le plus haut rendement jamais obtenu auparavant [I.37]. Ce genre de cellules comprend des cellules solaires organiques, colorées et polymériques, ainsi que des boîtes quantiques les cellules solaires au sulfure de zinc, au nanocristal, au micromorphe et au pérovskite

Les cellules solaires en pérovskite sont un type de cellule à couche mince et sont nommées d'après leur structure cristalline caractéristique. Les cellules pérovskites sont construites à partir de couches de matériaux imprimées, enduites ou déposées sous vide sur une couche de support sous-jacente, appelée substrat. Elles sont généralement faciles à assembler et peuvent atteindre des rendements similaires à ceux du silicium cristallin. Les cellules à base de Pérovskite ont montré une très grande évolution de leur rendement qui est passé de 2,2% à 25,2% entre 2006 et 2019, montrant une perspective intéressante pour leur commercialisation [I.38]. Les pérovskites continueront à faire l'objet de nombreuses recherches futures sur les cellules solaires.

Conclusion du chapitre 1

Dans ce chapitre, nous avons présenté une base théorique pour la suite de notre étude. Nous avons introduit d'abord le fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque. L'objectif c'était de montrer les différents phénomènes physiques et technologiques influant fortement sur les performances d'une cellule solaire.

La description des pertes principales ont permis de déterminer les différentes solutions possibles pour réduire ces pertes. En premier lieu, on trouve la qualité et les propriétés des matériaux de base utilisés (silicium) et aussi les différentes techniques employées pour la fabrication des cellules solaires standard (passivation, texturisation, couche anti reflet, BSF, contacts face avant et arrière, base et l'émetteur...) pour atteindre des rendements de conversion compétitifs. Aussi, il est important de souligner leurs importances et leurs influences sur les performances de ces cellules solaires.

La caractéristique I-V d'une cellule solaire permet d'obtenir une multitude d'informations sur leur fonctionnement. Différents paramètres (le courant de court-circuit, la tension du circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement) ont également été analysés ainsi que l'influence des effets de résistances série et parallèle afin de déterminer la qualité des cellules photovoltaïques.

Références bibliographiques du chapitre I

- I.1 Aymeric SPIGA**, "Introduction aux sciences de l'atmosphère", Polycopié de l'Université Pierre et Marie Curie, 2013-2014.
- I.2 Jean-Marie Malherbe**, "Introduction à la physique du Soleil", Ecole thématique – 2010
- I.3 Jean LILENSTEN et Pierre-Luis BLELLY**, Du soleil à la terre Aéronomie et Météorologie de l'espace, Ouvrage de l'université Joseph Fourier- 2000, p.11
- I.4 Techno-Science.net**, "Soleil : définition et explications" [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techno-science.net/definition/7280.html>. Consulté le : 20 février 2023.
- I.5 Kartable**, "Calculer la puissance du rayonnement solaire reçu par la Terre" [En ligne]. Disponible sur: <https://www.kartable.fr/ressources/enseignement-scientifique/methode/calculer-la-puissance-du-rayonnement-solaire-recu-par-la-terre/51534>, Consulté le : 20 février 2023
- I.6 Nichiporuk Oleksiy**, "Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigués" Thèse de l'institut national des sciences appliqués de Lyon, 2005 p.17-19
- I.7 BECHANE Leila**, "Etude de l'amélioration des propriétés de matériaux semiconducteurs pour des applications comme cellules photovoltaïques" Thèse de l'université FERHAT Abbes de Setif 1- 2022 p.8
- I.8 Espace Aubade**, "Tout savoir sur la cellule photovoltaïque". [En ligne] Disponible sur: <https://www.espace-aubade.fr/blog/energie-renouvelables/cellule-photovoltaïque-zoom-sur-le-sujet.html>. Consulté le : 15 Mars 2023.
- I.9 Alain Ricaud**, "Photopiles solaires". Lausanne. Presse polytechniques et universitaires romandes, 1997, p.
- I.10 D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson**, "A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power", J. Appl. Phys., vol. 25, no. 5, pp. 676–677, 1954
- I.11 Mailys Grau**, "Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres" Thèse de l'institut national des sciences appliqués de Lyon, 2012 p.22.
- I.12 Adrien RIVALLAND**, Elaboration et caractérisation de cellules solaires photovoltaïques tandem CuGaSe₂ / silicium cristallin : vers une approche monolithique à deux terminaux, Thèse de l'université de Nantes, 2020
- I.13 Julien depuis**, "Elaboration et caractérisation de couches de SiO_xN_y : et SiN_x :H réalisé par méthode à la face arrière des cellules photovoltaïques en silicium", Thèse

- de l'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2009 p.18
- I.14 MATHIEU H.**, Physique des semi-conducteurs et des composantes électroniques, Paris : Masson,1996. 580 p.
- I.15 HONSBURG C. et BOWDEN S.**, Photovoltaic: Devices, Systems and Applications, Sydney, Australia: University of New South Wales, 1998.
- I.16 Bertrand Paviet-Salomon**, Procédés de dopage et de recuit laser pour la réalisation de cellules photovoltaïques au silicium cristallin, Thèse de l'université Louis Pasteur Strasbourg, 2012 p.22
- I.17 Élise BRUHAT**, " Développement de cellules photovoltaïques silicium à homojonction industrialisables à contacts passivés", Université de Lyon 2019, pp. 26
- I.18 Gilles Poulain**, Procédés laser pour la réalisation de cellules photovoltaïques en silicium à haut rendement, Thèse de l'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2012
- I.19 Barbara Bazer-Bachi**. "Développement et mise au point d'un procédé innovant de diffusion des dopants N et P pour la fabrication de cellules photovoltaïques silicium". PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France, 2010.
- I.20 Yannick Veschetti**, "Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince", Thèse de l'université Louis Pasteur Strasbourg, 2004
- I.21 Romain CHAMPORY**, "Cellules solaires silicium ultra-minces nanostructurées : conception électro optique et développement technologique", Thèse de l'université de Lyon, 2016, p.26-27
- I.22 M. G. Hudedmani, V. M. Soppimath, and C. K. Jamotkar**, "A Study of Materials for Solar PV Technology and Challenges," Eur. J. Appl. Eng. Sci. Res., vol. 1, no. 5, pp. 1–13, 2017
- I.23 S. Rein, Lifetime Spectroscopy: A Method of Defect Characterization in Silicon for Photovoltaic Applications.** Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- I.24 M. Z. Rahman**, "Modeling Minority Carrier's Recombination Lifetime of p-Si Solar Cell," International Journal of Renewable Energy Research, vol. 2, no. 1, pp. 117–122, 2012.
- I.25 W. Shockley and W. T. Read**, "Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons," Phys. Rev., vol. 87, no. 5, pp. 835–842, Sep. 1952.
- I.26 R. N. Hall**, "Electron-Hole Recombination in Germanium," Phys. Rev., vol. 87, no. 2, pp. 387–387, Jul. 1952.
- I.27 M.M. Hilali**. "Understanding And Development Of Manufacturable Screenprinted

- Contacts On High Sheet-Resistance Emitters For Low-Cost Silicon Solar Cells". Phd thesis, Georgia Institute of Technology, 2005.
- I.28 Mette, A**, "New concepts for front side metallization of industrial silicon solar cells". Thèse Albert Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau (2007).
- I.29 A Luque and S. Hegedus**. "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering". Wiley, 2003.
- I.30 I. Massiot**, "Design and fabrication of nanostructures for light-trapping in ultra-thin solar cells," Thesis, 2014.
- I.31 L. Wang, F. Wang, X. Zhang, N. Wang, Y. Jiang, Q. Hao, and Y. Zhao**, "Improving efficiency of silicon heterojunction solar cells by surface texturing of silicon wafers using tetramethylammonium hydroxide," J. Power Sources, vol. 268, pp. 619–624, 2014.
- I.32 10 J. Szlufcik, S. Sivonthaman, J. F. Nijs, R. P. Mertens, and R. VanOverstraeten**, "Low cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells," Proc. Ieee, vol. 85, no. 5, pp. 711– 730, 1997.
- I.33 M. A. Green**, SILICON SOLAR CELLS - Advanced Principles & Practice. Sydney, Australia: Centre for Photovoltaic Devices and Systems, University of New South Wales, 1995.
- I.34 R.R. King, R.A. Sinton, R.M Swanson** : "Studies of diffused phosphorous emitters : Saturation current, surface recombination velocity and quantum efficiency", IEEE transactions on electron devices, vol.37, NO.2 Feb 1990
- I.35 J Szlufcik, F Duerinckx, J Horzel, E VanKerschaver, H Dekkers, S De Wolf, P Choulat, C Allebe, J Nijs** : "High-efficiency low-cost integral screen-printing multicrystalline silicon solar cells", Volume 74, Issues 1–4, 2002, p.155-163
- I.36 Malek BENMANSOUR**, "Développement, contrôle et modélisation d'un procédé de projection de poudre de silicium par plasma RF- Application aux couches minces photovoltaïques", Thèse de l'université Pierre et Marie CURIE PARIS VI - 2003,
- I.37** « Les Cellules Solaires de La Troisième Génération | PDF | Cellule photovoltaïque | [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.scribd.com/document/490936906/Les-cellules-solaires-de-la-troisieme-generation>. Consulté le : 20 février 2024
- I.38 Pia DALLY**, " Cellules Solaires à base de Pérovskites : De la caractérisation des matériaux à l'amélioration des rendements et de la stabilité " Thèse de l'Université Grenoble Alpes – 2019

Chapitre II
Silicium et techniques
de dépôts dans la réalisation de
cellules solaires en couches minces

Maintenant que nous avons décrit la physique du fonctionnement des cellules solaires, nous allons décrire les différents procédés utilisés en industrie pour la fabrication du matériau de base silicium, puis l'élaboration des cellules solaires à l'échelle industrielle.

Introduction du chapitre II

Aujourd'hui les enjeux de développement des modules P.V concernent l'abaissement des coûts de production et de façon complémentaire l'augmentation du rendement de conversion. Le silicium cristallin domine toujours le marché du PV car c'est un matériau abondant, bon marché et non toxique.

Il est donc clair que la réduction du coût du module passe par la réduction du coût de l'élaboration du matériau absorbeur. La méthode la plus accessible pour les industriels est la réduction de l'épaisseur des plaques de silicium tout en améliorant la passivation des surfaces et le confinement optique. Pour répondre à cette problématique, de nombreuses équipes de recherche et d'industrie tendent à s'engager dans le développement d'une nouvelle voie de production de cellules photovoltaïques : les couches minces.

Aussi la recherche s'oriente également vers la fabrication de cellules photovoltaïques basée sur le dépôt de films minces de silicium monocristallin sur des substrats économiques par épitaxie. Le choix de ce substrat doit satisfaire à un grand nombre de critères. Le matériau qui répond c'est le silicium monocristallin cristallin grâce à sa meilleure qualité électronique.

Dans ce chapitre, L'objectif sera ici de définir les exigences techniques et technologiques que cette filière impose. Nous présenterons également les différentes filières et matériaux utilisées pour la fabrication des cellules photovoltaïques en couches minces, ce qui nous conduira à exposer les choix technologiques réalisés pour élaborer des couches minces de silicium cristallin déposées sur des substrats bas coût et bon marché.

II.A Filières et matériaux pour la conversion photovoltaïque

Actuellement, deux principales filières permettent l'élaboration des modules et des cellules photovoltaïques (figure II.1) : la filière du silicium massif et la filière des matériaux en couches minces. La filière du silicium massif représente de nos jours 75% de la production mondiale de systèmes photovoltaïques.

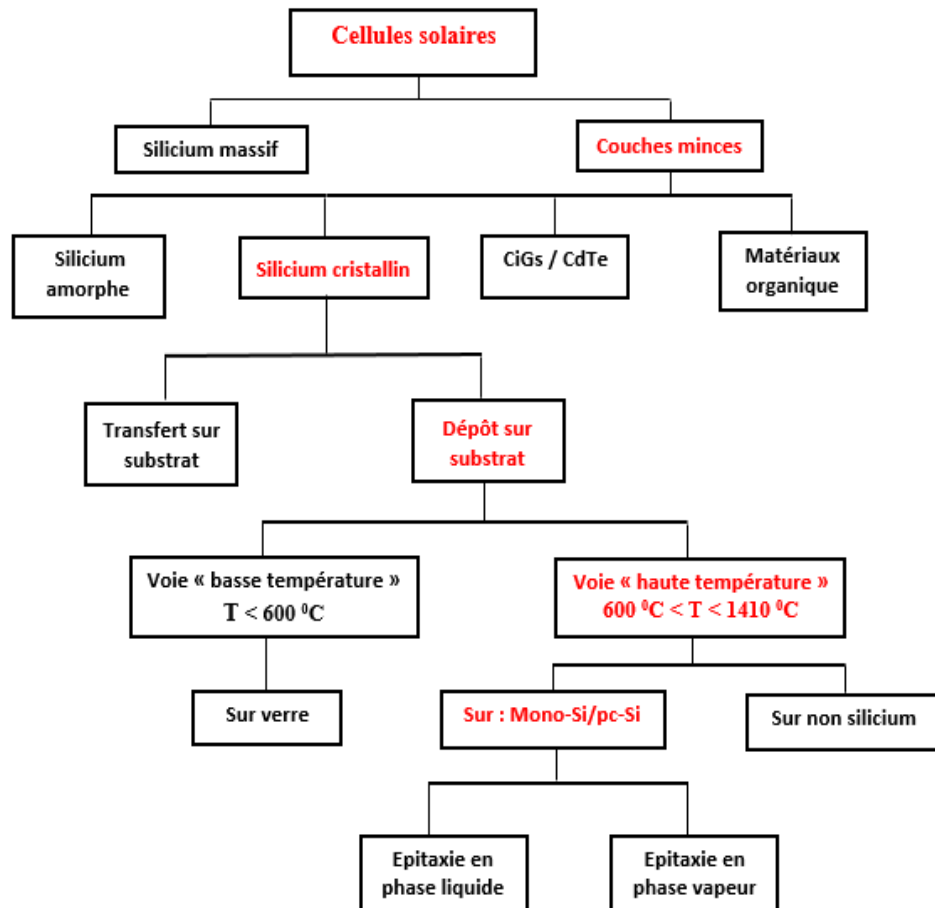
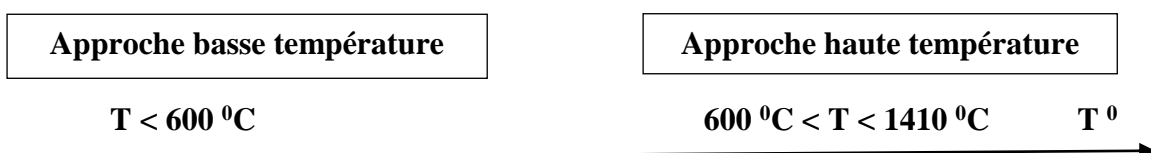


Figure II.1 : différents axes technologiques développés pour la réalisation des cellules Photovoltaïques à base du silicium cristallin

II.A.1 Filière température

Pour les applications photovoltaïques on peut distinguer entre deux familles de technique de dépôt de silicium selon que la température maximale de procédé utilisé permet l'utilisation d'un substrat de verre ou pas [II.1]. La température maximale supportée par le substrat de verre se situe aux alentours de 600 °C. Ce qui permet à la distinction entre la voix « basse température » et la voix « haute température » :



II.A.1.1 Filière basse température

Le dépôt de couches minces de silicium à basse température a pour avantages d'éviter l'apparition de tensions mécaniques dans la couche et leur contamination par les impuretés du substrat. A ces températures, les couches peuvent être déposées sur une multitude de substrats tel que le verre, l'acier, l'aluminium ou les feuilles de polymère, et sont généralement de structure amorphe ou microcristallines à petits grains (de l'ordre du nm). La structure la plus simple d'une cellule à base de ce type de matériau se compose d'une zone dopée bore, intrinsèque et dopée phosphore, que l'on note structure p-i-n. Les couches p et n sont généralement obtenues par introduction de diborane (B_2H_6) ou de phosphine (PH_3) dans le mélange gazeux durant leur dépôt. Pour fabriquer une telle cellule, les couches doivent être déposées les unes après les autres dans un ordre qui va dépendre de la nature du substrat. Soit la cellule est déposée sur un substrat transparent comme le verre et c'est la structure p-i-n qui est retenue figure II-2, ou bien elle est déposée sur un substrat opaque comme les polymères.

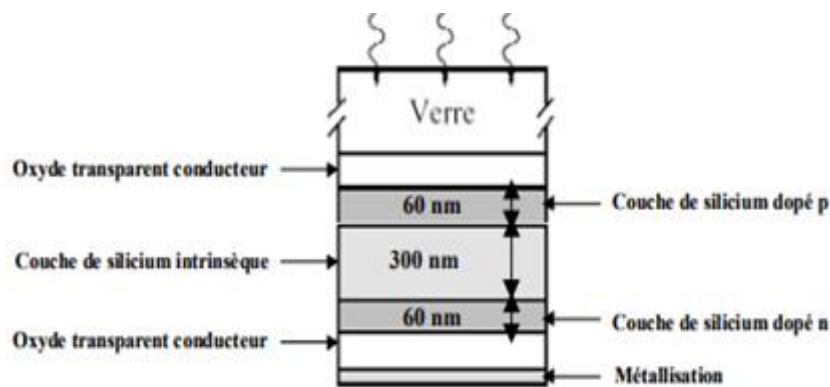


Figure II.2 : Architecture d'une cellule photovoltaïque réalisée à basse température sur substrat transparent : verre [II.2]

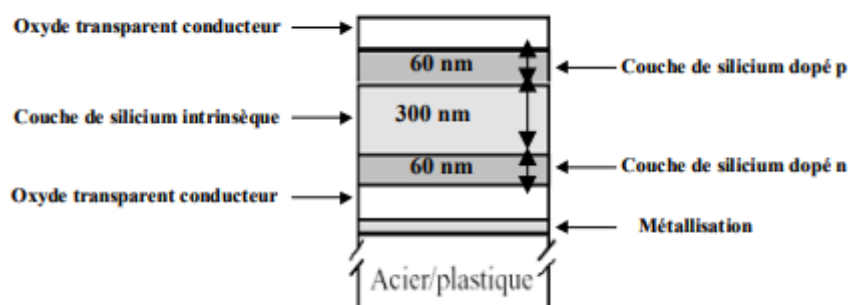


Figure II.3 : Architecture d'une cellule photovoltaïque réalisée à basse température sur substrats opaques : acier inox, aluminium, polymère [II.2]

II.A.1.2 Filière haute température

Pour augmenter la vitesse de croissance et de la taille des grains du matériau de base dans la fabrication des cellules solaires en couches minces afin d'améliorer leurs performances, il est nécessaire d'employer des substrats adaptés aux hauts-températures de travail (600°C à 1410°C). Le choix de ce substrat se fera parmi des matériaux à haut point de fusion. Le tableau II.1 regroupe les principales propriétés des substrats les plus fréquemment utilisés.

Toutefois, le choix du substrat joue un rôle important dans la détermination de la pureté et de la qualité cristallographique de la couche silicium cristallin déposée. En effet, les impuretés contenues dans le substrat diffusent vers la couche déposée aux hautes températures du procédé et affectent la taille du grain. En technologie, l'ajout d'une couche tampon SiO₂ ou Si₃N₄ présente une barrière pour la diffusion de ces impuretés et limite ce phénomène (II.3).

Différents concepts existent pour l'obtention de couches minces de Si cristallin. Une première voie consiste à cristalliser un dépôt de Si sur un substrat « étranger » ou un substrat de Si de qualité dégradée nécessitant le dépôt d'une couche intermédiaire, barrière à la diffusion d'impuretés dans la couche active. La deuxième voie repose sur le transfert de couches minces en Si monocristallin sur substrat étranger. La dernière voie consiste à réaliser un dépôt de Si par épitaxie sur un substrat en Si de qualité dégradée et correspond à l'application visée dans le cadre de ces travaux.

Tableau II.1 : Propriétés des différents matériaux retenus comme substrat-
Filière haute température [II.2]

	Si	Quartz	Mullite	SiC
T maximale d'utilisation (°C)	1410	2000	1700	2000
Coefficient d'expansion Thermique (10⁻⁶ °C⁻¹)	3.9	0.5	5	4.7
Conductivité thermique (W.m⁻¹.K⁻¹)	148	7.4 – 8.4	7	120
Propriétés optiques	Absorbe la lumière incidente	Transparent : réflecteur arrière	Transparent : réflecteur Arrière	Absorbe la lumière incidente
Prix	élevé	élevé	Faible	élevé

L'architecture de la cellule photovoltaïque dépend de la nature du substrat utilisé : qu'il soit conducteur ou isolant. Dans le cas où le substrat est électriquement conducteur (silicium, graphite) l'élaboration de la cellule se fera selon un procédé classique avec la réalisation

d'une jonction n-p par diffusion thermique de phosphore, la passivation des défauts cristallographiques, le dépôt d'une couche antireflet, la métallisation de la face arrière et enfin la mise en place d'une grille de collecte sur la face avant (figure II.4).

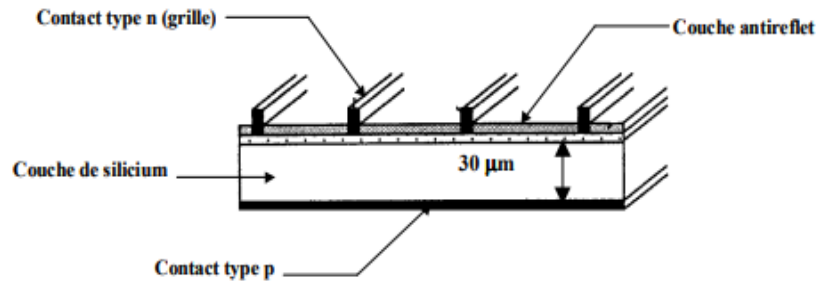


Figure 11.4 : Structure classique d'une cellule photovoltaïque sur substrat conducteur

En revanche, lorsque le substrat est électriquement isolant, comme la mullite par exemple, les contacts électriques ne peuvent être pris que sur la face avant de la cellule. L'exemple type de ce genre de cellules est la cellule à contacts interdigités (figure II.5). Néanmoins, ce type de solutions limite considérablement les performances de la cellule à cause d'un taux d'ombrage trop important.

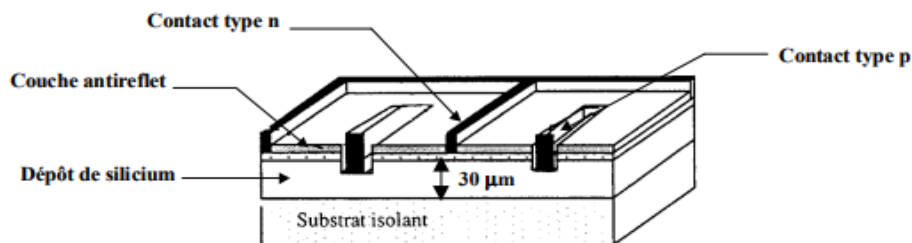


Figure II.5 : Structure d'une cellule photovoltaïque sur substrat isolant : cellule à contacts interdigités

II.A.2 Matériau de base : Silicium

Le constituant essentiel d'une cellule photovoltaïque responsable de l'effet photovoltaïque est un semi-conducteur. Le semi-conducteur le plus utilisé aujourd'hui est le silicium. Les cellules solaires à base du silicium cristallin représentaient, en 2020 plus de 90% des ventes mondiales de panneaux solaires. Nous évoquerons donc uniquement le silicium dans cette présentation.

II.A.2.1 Historique

Connu depuis l'Antiquité grâce à la silice, le silicium n'a été isolé qu'en 1823 par Jöns Jacob Berzelius. Le nom du silicium dérive du mot latin *silix*, signifiant cailloux. Ce nom a été donné par Humphry Davy en 1808 en s'inspirant du mot *silica* désignant la silice. Il est principalement employé pour élaborer des alliages avec l'aluminium et des silicones. Son utilisation pour fabriquer des cellules photovoltaïques ou en électronique, nécessite une purification très poussée.

II.A.2.2 Propriétés du silicium

Le silicium est l'élément principal constituant la cellule solaire, le deuxième élément de la croûte terrestre après l'oxygène, il représente près de 28 % de la croûte terrestre. Cependant il n'existe pas à l'état natif, mais sous sa forme oxydée (sable, silice, quartz).

La matière première utilisée pour obtenir le silicium purifié utilisé par les industries électronique et photovoltaïque est le quartz. Le silicium est extrait de son oxyde par des procédés métallurgiques, et son niveau de pureté dépend de son utilisation finale.

Tableau II.2 : Données atomiques du silicium

Numéro atomique	Masse atomique	Configuration électronique	Structure cristalline	Rayon métallique pour la coordinence 12
14	28,086 g.mol ⁻¹	[Ne] 3s ² 3p ²	Cubique à faces centrées de type diamant de paramètre : a = 0,543 nm	132 pm

Tableau II.3 : Données physiques du silicium

Masse volumique	Dureté	Température de fusion	Températ. d'ébullition	Conductibilité électrique	Conductibilité thermique	Solubilité dans l'eau
2,33 g.cm ⁻³	6,5	1 410° C	2 355°C	2,52.10 ⁻⁴ S.m ⁻¹	148 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Insoluble

II.A.2.3 Types de silicium cristallin

Le silicium cristallin est de loin le matériau le plus utilisé dans l'industrie photovoltaïque. On en dénombre 3 types différents :

a) Silicium monocristallin

Désigne un matériau dont les atomes sont structurés de façon ordonnée et la périodicité est invariable, continue et uniforme dans tout le volume.

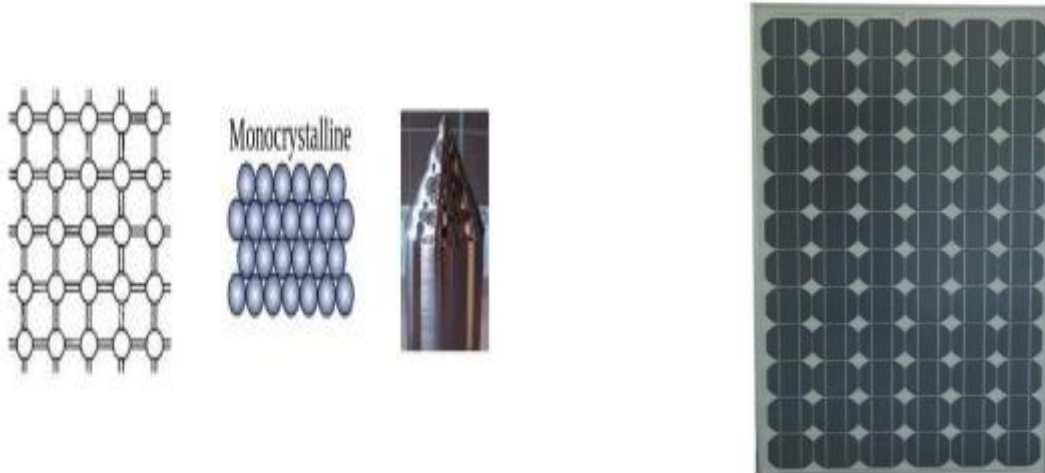


Figure II.6 : Module Silicium Monocristallin

[II.4]

Le silicium monocristallin est un matériau de très haute pureté, qui est obtenu par des procédés industriels tels que le tirage CZ (Czochralski) ou la purification par fusion de zone (FZ). Le produit fini se présente sous la forme de lingots qu'il faut ensuite découper en plaquettes de 300 μ m. Cette étape entraîne d'ailleurs une perte importante de matériau (jusqu'à 50%). Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, permet la fabrication de cellules conventionnelles à haut rendement 16 à 25% [II.5-II.6] mais il est très coûteux. La part de marché du silicium monocristallin est donc de moins en moins importante (33,6%), puisque les modules produits ont certes un rendement plus élevé mais sont bien plus chers que ceux en silicium multicristallin. A noter également la commercialisation depuis peu de cellules à très haut rendement utilisant du silicium mono mais avec des technologies différentes : les HIT® (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) de Sanyo [II.7] et les RCC (Rear contacted cells) de Sunpower [II.8] dont les rendements sont de l'ordre de 21%.

Le silicium monocristallin (mono-Si), est un matériau composé d'un seul cristal parfaitement homogène. Les cellules solaires issues de ce silicium ont une couleur caractéristique qui est généralement gris-noir métallique. Les avantages de cette technologie sont : une production des panneaux solaires presque optimale. Les cellules monocristallines offrent les meilleurs rendements (16 à 25 %) [II.9]. Les panneaux solaires à base de silicium monocristallin présentent une bonne durée de vie (30 ans [II.10]). Les inconvénients sont : un coût de production élevé, les panneaux sont donc chers à la vente, un rendement plus faible sous un faible éclaircissement et une baisse du rendement quand la température augmente, par conséquent une production faible dans les régions chaudes [II.11].

b) Silicium polycristallin

Les structures incluant des couches de poly-silicium (poly-Si), ont été introduites comme une possibilité technologique dès les années 1980 [II.12].

Elles ne sont pas soumises au même processus de fabrication que celui utilisé pour les cellules monocristallines, au cours de son processus de découpe au qu'une perte de la matière de ce silicium est remarquée.

Cependant, les panneaux solaires poly cristallins ont un rendement inférieur à celui des panneaux monocristallins, il est l'ordre de 14 à 18 %, là encore parce que le matériau est moins pur.

Mais leur avantage est son prix plus bas. En outre, les panneaux solaires polycristallins ont tendance à avoir une teinte bleue clair au lieu de la teinte presque noire des panneaux monocristallins.

Le silicium polycristallin est un matériau solide constitué de cristallites (grains) séparées les unes des autres par des joints de grain (figure II-8). A l'intérieur de chaque cristallite, les atomes sont rangés de façon périodique et similaire à celle du silicium monocristallin.

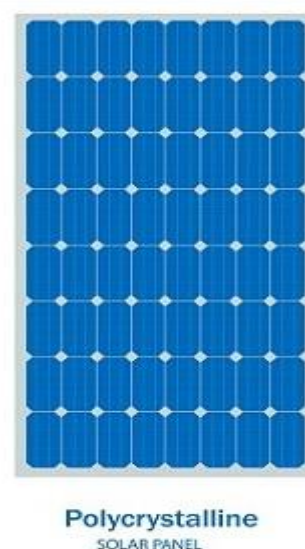


Figure II.7: Module Silicium pc

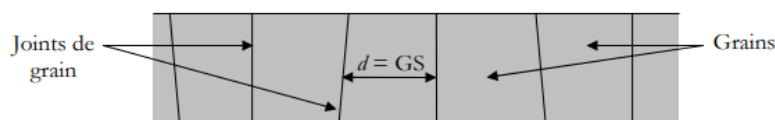


Figure II-8 : Vue générale du silicium polycristallin [II.3]

Par ailleurs, les joints de grain ont une structure très complexe. Ils sont formés d'un amas d'atomes désordonnés et décalés par rapport aux réseaux cristallins des grains adjacents. En outre, ils peuvent contenir un nombre important de défauts qui affectent considérablement le transport des porteurs et la diffusion des dopants dans le silicium polycristallin [II.3].

c) Silicium Amorphe

Elles ont comme avantage un procédé de fabrication moins coûteux car il est réalisé à basse température et utilise moins de matériau que le silicium cristallin. En effet l'a-Si possède un coefficient d'absorption beaucoup plus élevé que le silicium cristallin. C'est ce qui permet d'avoir des cellules avec des couches de l'ordre du micron d'épaisseur et qui permet de réduire significativement les coûts de production [II.11].

Les cellules solaires à couche mince en silicium amorphe sont traditionnellement utilisées pour des applications à petite échelle, comme les calculatrices de poche, les lampes de voyage et le matériel de camping utilisé dans les endroits reculés [II.11-13].

Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) se caractérise par sa structure désordonnée comparée à celle du silicium cristallin (c-Si) qui possède un réseau périodique comme schématisé figure II.9. Cette structure, non figée, lui confère une structure de bande particulière, des propriétés électroniques dégradées par rapport au c-Si, ainsi que des propriétés métastables [II.14-15]. Malgré cela, les dispositifs à base de (a-Si:H) affichent des performances acceptables pour un grand nombre d'applications dont celle des cellules solaires. De plus, les dépôts en couche mince peuvent être réalisés sur de grandes surfaces et à faible température, ce qui permet de réduire les budgets thermiques et les coûts de fabrication.

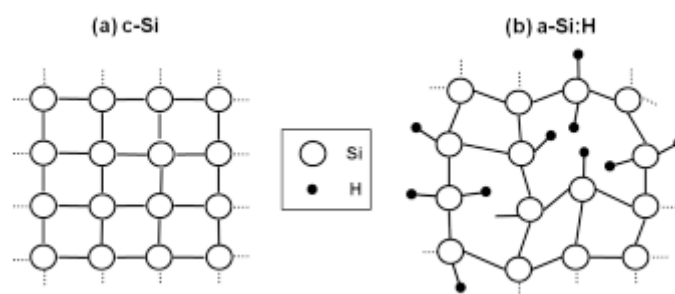


Figure II.9 : Représentation de la structure atomique du silicium cristallin (a) et du silicium amorphe hydrogéné (b) [II.16]

Historiquement, le premier dépôt des couches de a-Si:H a été réalisé dans un réacteur PECVD radio fréquence (14). Des nouvelles techniques de dépôt utilisant la décomposition

chimique du silane (SiH_4), permettant ainsi l'incorporation de l'hydrogène, apparaissent à la fin des années 1960 avec les travaux de Chittick et al. [II.17]. Ce matériau hydrogéné contient moins de défauts, présente des propriétés photoconductrices intéressantes et peut être dopé en incorporant des gaz tels que la phosphine (PH_3) ou le diborane (B_2H_6) dans la chambre de dépôt. Parmi les premiers à fabriquer des cellules solaires N-i-P à base de a-Si:H Carlson et Wronski [II.18] en 1976. Les premiers rendements n'étaient que de 2-3% mais ont rapidement progressé pour atteindre 12 – 14% en 1989 [II.15-II.16].

Suivant le type de silicium amorphe, le gap optique est compris entre 1.7 eV et 1.8 eV.

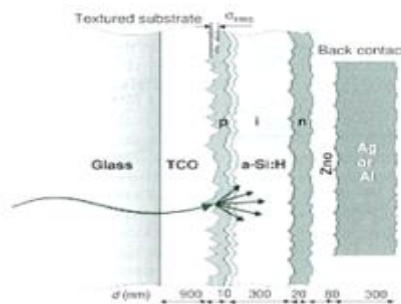


Figure II.10 : Structure d'une cellule solaire P-i-N à simple jonction [II.19]

Les cellules réalisées à partir a-Si:H sont caractérisées par des longueurs de diffusion très faibles, de quelques microns. Cela conduit à une collecte des porteurs insuffisante. La figure II.10 schématise l'architecture d'une cellule solaire en a-Si: H à simple jonction de type N-i-P. Entre les deux dépôts de a-Si: H de type N et P, on intercale une couche absorbante intrinsèque de a-Si:H d'une épaisseur de 0.3 μm . Cette épaisseur est issue d'un compromis entre l'optimisation de la collecte des porteurs de l'absorption des photons [II.19].

II.B Fabrication des cellules solaires

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire un courant lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

Deux technologies de cellules photovoltaïques sont présentes aujourd'hui :

- Les cellules dites cristallines (poly et mono)
- Les cellules dites couches minces

Les deux premiers types ont un processus de fabrication assez similaire.

Le procédé classique de fabrication des modules en Si cristallin se déroulent en 5 étapes sont les suivants :

1. La silice : matière première d'une cellule photovoltaïque
2. Extraction purification du silicium photovoltaïque
3. Obtention des lingots de silicium [Cristallisation de ce Si solaire pour former des lingots afin d'obtenir du Si monocristallin ou multicristallin].
4. Obtention des wafers photovoltaïques [Découpe de ces lingots en briques puis en plaquettes dont les formats standardisés sont 125x125 mm² ou 156x156 mm²]
5. Le dopage et jonction P-N

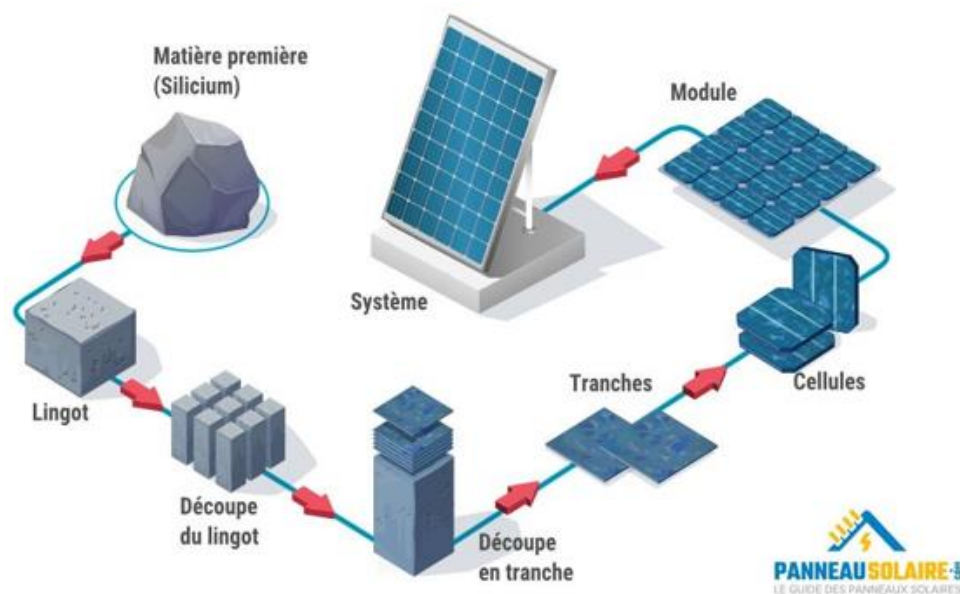


Figure II.11 : La chaîne de fabrication de cellule photovoltaïque

II.B.1 Etape 1 : Le sable

Tout commencer par la matière première, qui dans notre cas est le sable. La plupart des panneaux solaires sont fabriqués à partir du silicium, qui est le principal composant du sable. Le dioxyde de silicium est le composé chimique de formule SiO_2 , c'est un minéral très abondant dans l'écorce terrestre (55% en masse).



La silice SiO_2 d'origine naturelle utilisée industriellement sous des formes très variées comme par exemple le quartz (dans le sable, le grès, le granit, les roches magmatiques.....), la trydimite ou la cristobalite. Une très large majorité des matériaux siliceux consommés correspond à des sables quartzueux [II.20].

II.B.2 Extraction et purification du silicium

II.B.2.1 Extraction du silicium à partir de la silice

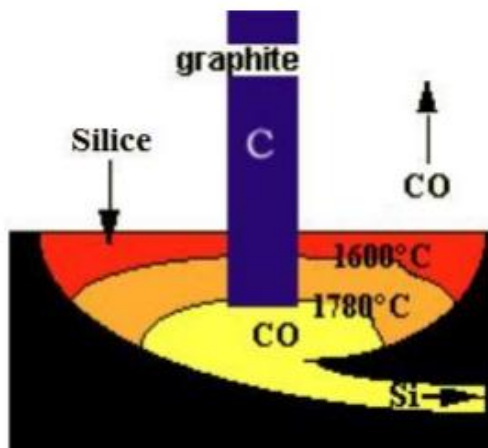
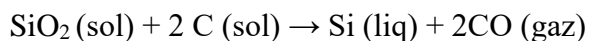


Figure II.12 : Extraction du silicium [II.8]

Cette technique, développée par Siemens, requiert, d'une part, l'utilisation de quartzite ou de sable de très haute pureté (on en trouve en Australie) et d'autre part un carbone très pur obtenu par lessivage à chaud. Le silicium (Si) est donc extrait de la silice (SiO_2) grâce à la réaction chimique simplifiée suivante :



Cette réaction se réalise dans un four à arc car elle nécessite de faire fondre la silice. La température du four peut atteindre 3 000 °C. La puissance du four peut aller jusqu'à 30 MW, afin d'enclencher les réactions chimiques. En réalité, la réaction de réduction de la silice en silicium résulte d'un grand nombre de réactions chimiques intermédiaires. Après cette opération, le silicium est obtenu sous forme liquide. Sa pureté est de 98 %. Il faut le purifier encore de plusieurs ordres de grandeur afin d'obtenir un matériau adéquate pour les applications photovoltaïques.

II.B.2.2 Purification du silicium

Il s'agit, en partant du silicium métallurgique, de faire une purification chimique. De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium. Le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium purifiés à 99.99 %.

On distingue trois niveaux de pureté du silicium, désignés en fonction de l'utilisation :

- Silicium métallurgique (pureté 99 %), noté **MG-Si** (en anglais : metallurgique grade),
- Silicium de qualité solaire (pureté 99,999 9 %), noté **SoG-Si** (solar grade),
- Silicium de qualité électronique (pureté 99,999 999 99 %), noté **EG-Si** (electronic grade).

• Silicium métallurgique(MG-Si)

Le silicium de qualité métallurgique est obtenu par réduction du sable ou du quartzite par carbone (Figure II.13).

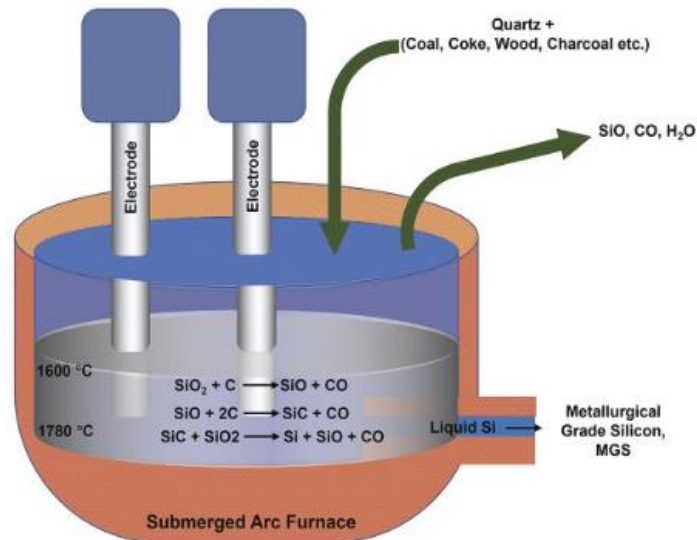
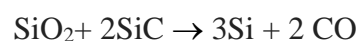
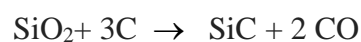
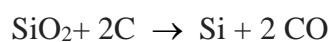


Figure II.13 : Structure schématique d'un four à arc

La silice est mélangée avec des réducteurs tels que le coke de pétrole, des charbons bitumineux, la houille et des copeaux de bois. En fonction des applications finales du silicium, la silice doit être relativement pure, en particulier, elle doit avoir une faible teneur en oxyde de fer ; de plus, les réducteurs doivent être soigneusement choisis.

L'opération se fait dans un four électrique à arc, Ce mélange est versé dans un creuset de plusieurs mètres de diamètre équipé d'électrodes de carbone. La température est d'environ 1700°C mais peut atteindre 3000°C à la pointe des électrodes [II.21].

La fabrication industrielle du silicium s'effectue par métallurgie, selon les réactions chimiques suivantes :



La pureté du silicium obtenu dépend de la qualité du quartzite de départ et varie entre 98% et 99.5%. Certaines impuretés (telles que l'aluminium) sont éliminées pendant la réaction. Cette pureté est suffisante pour l'industrie métallurgique (Ferro-silicium). Dans le cas où le silicium

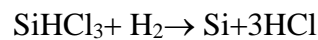
est destiné à des applications en micro-électronique ou solaire, il doit ensuite subir une purification poussée [II.22] comme nous allons le voir.

a) Silicium de qualité électronique (EG-Si)

Le Si de qualité électronique (EG-Si, pour « Electronic Grade Silicon ») est produit par voie gazeuse à partir du Si métallurgique. Il peut être obtenu suivant différents procédés, mais le plus répandu est le « procédé Siemens ». Celui-ci fait intervenir des étapes à haute température, ainsi que des dérivés chlorés [II.22]. En effet, la première réaction consiste à oxyder le Si métallurgique en trichlorosilane (SiHCl_3) à l'aide d'acide chlorhydrique :



Le trichlorosilane est ensuite purifié par distillation fractionnée. Puis le Si est récupéré par un dépôt chimique en phase vapeur (CVD) selon la réaction inverse de l'équation ci-dessus



Il se dépose sur des barreaux de Si polycristallin en forme de U inversé. Le Si de qualité électronique contient très peu d'impuretés (Si 9N à 11N). Les capacités de production de ce type de Si ont augmenté ces dernières années, et parallèlement son prix a nettement chuté. Ainsi, ce matériau est à l'heure actuelle aussi bien utilisé par l'industrie microélectronique que par l'industrie P.V [II.23].

b) Silicium de qualité solaire (SoG-Si)

Le Si de qualité solaire (SoG-Si) est défini comme du Si pouvant être utilisé pour la fabrication de cellules PV (Si 7N). Ce concept de SoG-Si est né au début des années 1980. Depuis 2005, La consommation en Si de l'industrie PV a dépassé celle de l'industrie de la microélectronique. Aussi, le degré de pureté requis par les dispositifs PV est moins exigeant que celui imposé par l'industrie microélectronique.

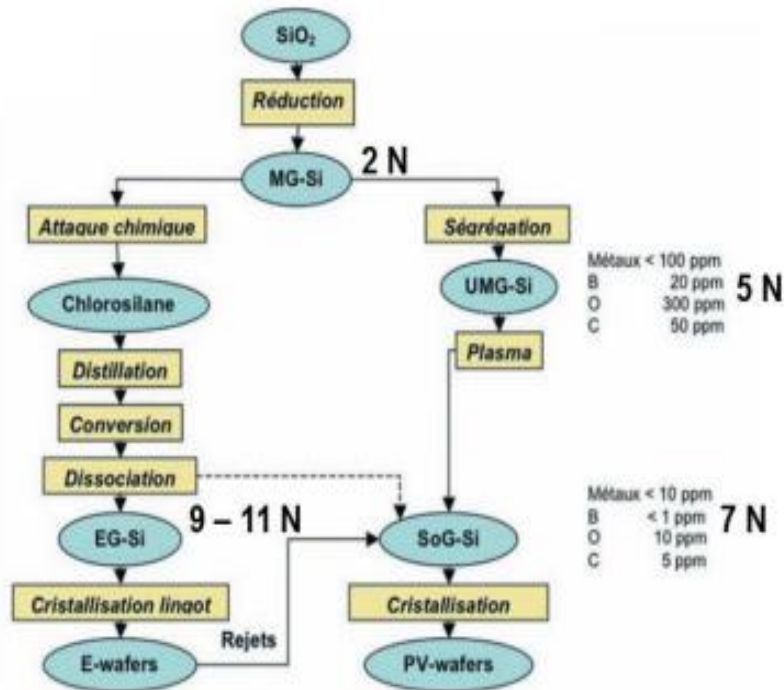


Figure II.14 : Présentation des différentes filières d’approvisionnement en SoG-Si. À gauche l’ancienne voie, dérivée de la filière électronique (EG-Si), à droite les nouvelles voies à partir de Si métallurgique amélioré [II.23-II.25]



Figure II.15 : Gauche : fragment de silicium métallurgique (Pureté : 99,0 %) Droite : fragment de polysilicium (Pureté : 99,999 999 9 %)

II.B.3 Tirage de lingots de silicium

La production des lingots est une étape importante, car la qualité cristalline du silicium en dépend. Une fois l'étape de purification terminée, vient l'étape de cristallisation du silicium liquide. Cette étape est obtenue par solidification progressive et contrôlée du silicium.

Il existe deux grandes méthodes de cristallisation :

- La première permet d'obtenir du silicium monocristallin (composé d'un seul cristal).
- La deuxième permet d'obtenir du silicium polycristallin (composé de plusieurs cristaux),

II.B.3.1 Tirage de lingots monocristallins

Le Si monocristallin est généralement obtenu par des techniques de tirage, selon le procédé Czochralski (Cz) ou par fusion de zone (FZ) et se présente sous la forme de lingots cylindriques. Ces procédés de cristallogénèse sont basés sur l'utilisation d'un germe monocristallin qui impose son orientation cristallographique au lingot au cours du tirage.

a) Tirage CZ

Une des méthodes pour fabriquer du silicium monocristallin est connue sous le nom de **Czochralski**. (Fig. A droite). Le silicium est placé dans un creuset de quartz et maintenu liquide à l'aide d'éléments chauffants. Lorsque la surface est à la température limite de solidification, on y plonge un germe monocristallin. Le silicium se solidifie sur ce germe selon la même orientation cristallographique. On tire lentement le germe vers le haut, avec un mouvement de rotation, tout en contrôlant minutieusement la température et la vitesse. Pendant toute la durée du tirage, il est nécessaire de maintenir le silicium fondu à 1140°C. Cela conduit à des coûts en plus.

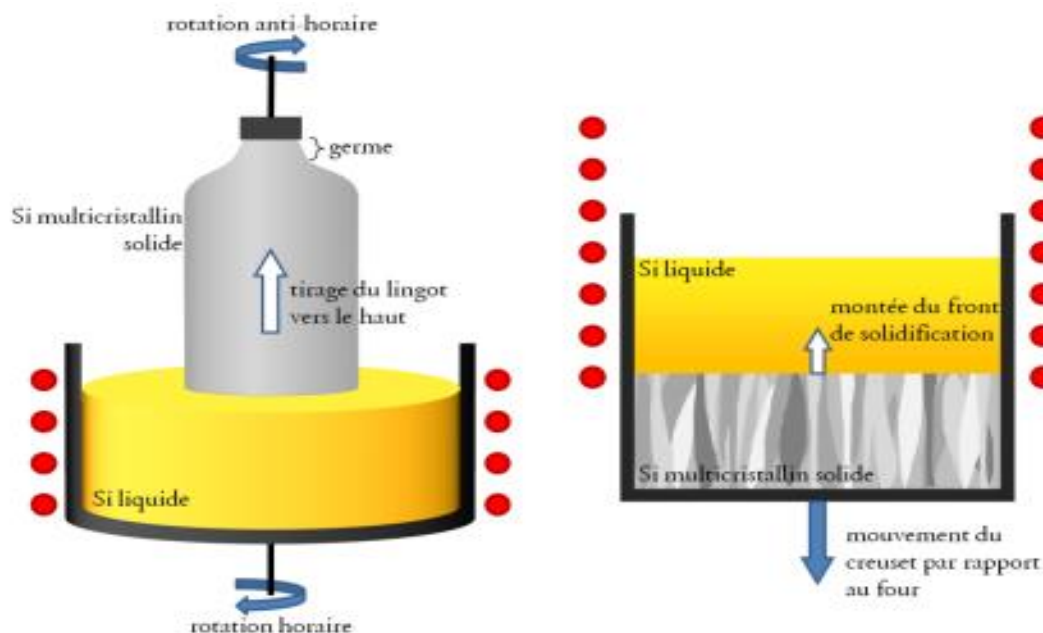
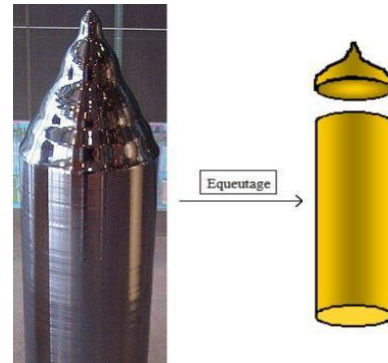


Figure II.16 : Procédés de croissance de lingots de silicium classiques. **A gauche :** procédé Czochralski, **à droite :** procédé Bridgman. [II.26]

L'équeutage consiste à éliminer les extrémités du lingot soit mal cristallisées soit riches en impuretés. Les extrémités sont ensuite refondues pour le départ d'un nouveau cycle de production. Lors du tirage, le diamètre du lingot varie légèrement ce qui constitue des ondulations à sa surface. Pour obtenir des plaquettes de même diamètre un polissage cylindrique est nécessaire.



b) Tirage FZ ou méthode de la zone flottante

Parmi les procédés monocristallins, le procédé de la zone flottante est celui qui conduit à la plus haute pureté, dans la mesure où le silicium liquide n'est en contact avec aucune paroi, mais aussi le plus onéreux.

Un lingot polycristallin et un germe monocristallin sont nécessaires, le premier étant disposé au-dessus du second et l'interface entre les deux étant fondue par des bobines de chauffage coulissantes qui repassent plusieurs fois pour répéter l'effet de ségrégation par la face liquide aussi longtemps que nécessaire. La zone de silicium fondu n'est supportée que par la tension superficielle. En l'absence de creuset, il n'y a pas de contamination extérieure du silicium. Les lingots FZ ont donc une teneur en oxygène plus faible que les lingots CZ et moins de dislocations. Les coûts des deux méthodes sont du même ordre [II.22].

II.B.3.2 Moulage de lingots polycristallins (ou multicristallins)

Le moulage de silicium en lingots a été développé dès la fin des années 70 par la société Semix (filiale de Solarex) comme une alternative économique à la méthode classique de Czochralski de croissance de lingots monocristallins [II.22]. Il présente de nombreux avantages :

- C'est un procédé moins sophistiqué dans son contrôle et moins coûteux en énergie,
- Il donne des plaquettes carrées ou rectangulaires mieux adaptées aux remplissages géométriques des modules,
- El est plus tolérant aux impuretés qui ont tendance à ségréger dans les joints de grains.

Les différents procédés de production de lingots multicristallins reposent tous sur le même principe. Le silicium est fondu dans un creuset en silice, de forme parallélépipédique. À la fin de l'étape de fusion, une perte thermique est créée au fond du creuset et le silicium solidifie progressivement du bas vers le haut. Les grains obtenus peuvent atteindre une longueur de

plus de 10 cm et une section de l'ordre du cm^2 . Les rendements obtenus sur silicium multicristallin sont moins élevés que ceux obtenus avec du monocristallin (15 à 16 % contre 17 à 19 %, en procédé industriel). Cela tient, entre autres, aux joints de grains où se concentrent les impuretés et qui ont une activité recombinante [II.27].

Ce sont surtout la taille et la qualité cristallographique des grains qui déterminent la longueur de diffusion et donc les performances des cellules. Ils doivent être aussi gros que possible et s'étendre verticalement, perpendiculairement au plan de découpe de plaquettes. (II.22).

II.B.4 Le sciage des plaques (mc-Si et sc-Si)

Les lingots monocristallins et les briques multi-cristallines sont après la première étape découpés en tranches par une scie à fil, à une épaisseur d'environ 250 μm . L'opération est réalisée en présence de slurry, une solution organique contenant des abrasifs en suspension. Il faut souligner une perte importante de matériau lors du sciage (30 à 40% non recyclé). Sur les schémas, on remarque que les coins du silicium monocristallin sont arrondis car la plaque est découpée dans un lingot cylindrique.

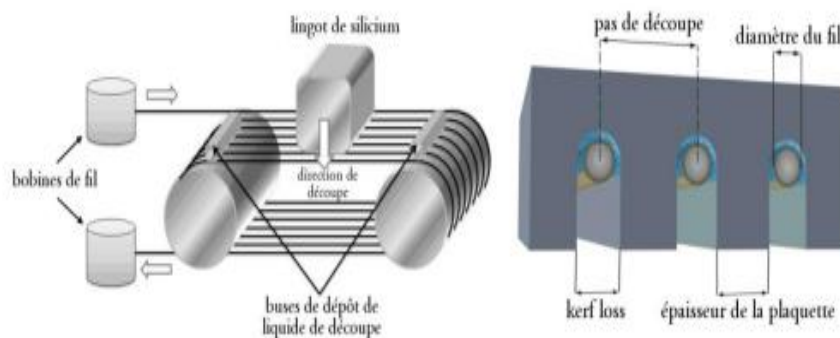


Figure II-17 : Schémas du procédé de découpe de plaquettes [II.28].

Du point de vue de l'application, il ne faut pas perdre de vue que le critère le plus pertinent n'est pas le rendement de conversion, mais bien le coût du kilowattheure. Dans ce coût, le matériau entre aujourd'hui pour une part significative : très grossièrement, dans le coût final d'un module, le wafer entre pour 40%, la fabrication de la cellule pour 20% et l'assemblage en module pour 40%. [II.27]. L'objectif reste bien sûr de s'affranchir des opérations de sciage afin de pouvoir réduire la perte du silicium dans la découpe.

a) Loi de Scheil – Ségrégation des impuretés

La purification du silicium par solidification directionnelle permet d'éliminer les impuretés par ségrégation. En effet, lors de la solidification du silicium, la concentration en impuretés

dans la phase solide est généralement beaucoup plus faible que dans la phase liquide. Le coefficient de ségrégation (k_0) est défini comme le rapport, à l'équilibre, des concentrations en impuretés entre la phase solide (C_s) et la phase liquide (C_l). Dans le cas de la solidification directionnelle, un coefficient de ségrégation effectif (k_{eff}) est employé et permet de prendre en compte les imperfections du brassage. Le coefficient k_{eff} dépend de la vitesse de solidification (v), de la diffusivité des impuretés dans la phase liquide (D) et de l'épaisseur de l'interface entre la phase solide et la phase liquide. Le coefficient k_{eff} s'écrit :

$$k_{eff} = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp(-v\delta/D)} \quad \text{II.1}$$

L'équation de Scheil permet de connaître l'évolution de la concentration en impuretés le long de la partie solidifiée :

$$C_s = k_{eff} \cdot C_0 (1 - x)^{(k_{eff}-1)} \quad \text{II.2}$$

C_0 correspond à la concentration initiale de l'impureté dans la charge et x correspond à la fraction solidifiée. L'équation de Scheil prend en compte un volume fixe de liquide à solidifier. Cette technique de purification est particulièrement efficace pour les impuretés présentant un faible coefficient de ségrégation dans le silicium [II.29].

Le tableau suivant donne quelques exemples de concentrations résiduelles après purifications des principales impuretés ou éléments dopants. Pour la plupart, elles sont suffisamment faibles pour pouvoir utiliser le matériau en microélectronique à condition de fabriquer du cristal. C'est à partir de ce silicium polycristallin que l'on doit fabriquer le monocristal.

Tableau II.4 : Exemple de concentration d'impuretés avant et après solidification directionnelle (en ppm du poids) [II.27]

	Avant ségrégation	Après ségrégation
B	1.6	0.9
P	4.8	2
Al	13	0.4
Ca	9	<0.005
Cr	2	<0.005
Cu	9	<0.01
Fe	30	<0.05
Ni	<2	<0.01
Ti	1.5	<0.005
V	<2	<0.001

II.B.5 Dopage du silicium

Les wafers de silicium obtenus à l'issue de l'étape de sciage sont alors introduits dans un réacteur de croissance dans lequel va se dérouler l'étape de dopage. Cette méthode permet de réaliser la jonction P-N.

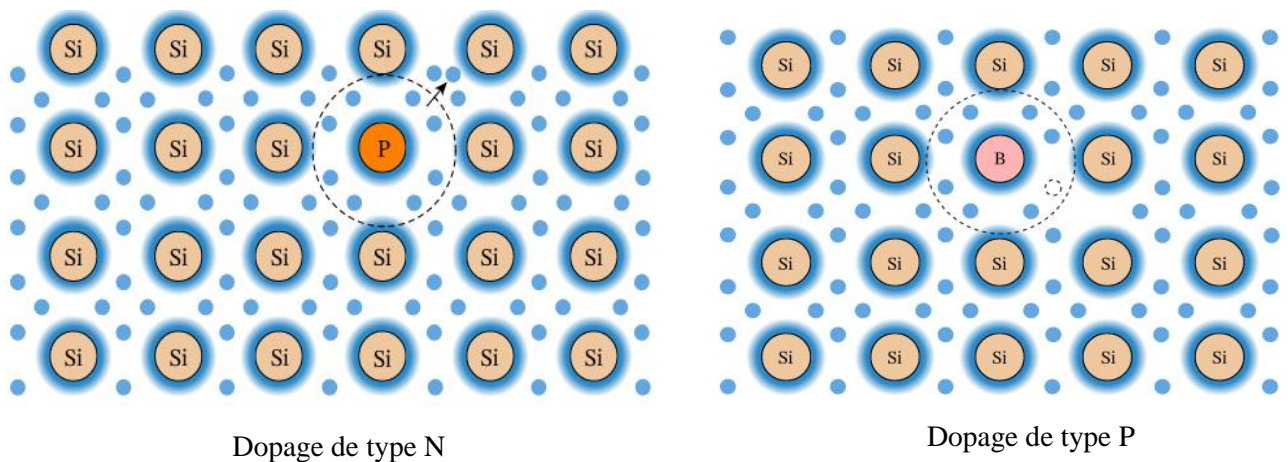
Les composants, tels que les transistors et les diodes, sont fabriqués à l'aide des semi-conducteurs extrinsèques, c'est-à-dire dont la conductivité est due à des impuretés. On les prépare en ajoutant un petit nombre (de l'ordre de : un par million) d'atomes étrangers à un semi-conducteur intrinsèques. Le processus est appelé dopage et il affecte la disponibilité des porteurs de charge mobiles de deux façons différents [II.29].

Il existe deux types de dopage : le type N (Négatif) et le type P (Positif).

II.B.5.1 Dopage de type N Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative [II.30]

II.B.5.2 Dopage de type P Si le silicium est dopé avec des atomes possédant trois électrons de valence comme le galium ou le bore, il y aura un électron de moins par atome de bore, on dit un trou dans la distribution des électrons négatifs. Un électron d'un atome de silicium voisin peut venir et remplir ce trou. Le trou se déplace comme une bulle dans verre d'eau d'un atome à un autre sous l'effet d'un champ électrique appliqué, constituant ainsi un courant de trous positifs [II.29].

Le schéma montre un réseau d'atomes de silicium qui contient un atome de bore et un atome de phosphore



Le dopage permet alors de contrôler la concentration de charges et donc la conductivité du semi-conducteur. Il existe différents moyens pour introduire des impuretés pour le dopage des matériaux semi-conducteurs dont nous pouvons retenir [II.31] :

- la diffusion thermique,
- la croissance de couche par épitaxie,
- l'implantation ionique.

a) La diffusion thermique

On utilise un four, dans lequel on injecte des gaz avec une solution dopante pour le silicium. Avec la chaleur, le dopant a une énergie suffisante pour entrer dans la plaquette de silicium. Cette méthode est assez ancienne, et nécessite d'avoir une température uniforme dans le four.

b) La croissance de couche par épitaxie

Cette méthode utilise toujours un four, mais cette fois-ci les atomes du dopant sont déposés sur le silicium qui se présente sous la forme d'une plaquette. On a ainsi un dépôt en surface, et non pas une insertion comme pour la méthode de dopage par diffusion. La température du four doit avoisiner les 1200 °C.

c) L'implantation ionique

Une source (appelé faisceau ionique énergétique) produit des ions, qui sont ensuite accélérés, et par le biais d'un contrôle très précis, ceux-ci vont alors se positionner sur la plaquette. L'avantage de ce principe est que l'opération se déroule à température ambiante. Le défaut de cette technique est qu'elle peut provoquer des dommages au silicium induisant un réarrangement indésirable de sa structure cristalline, exigeant ainsi une recristallisation subséquente [II.30]. Dans le cadre de notre étude, nous sommes intéressés à la technique de la croissance de couche par épitaxie.

II.C Les cellules solaires en couches minces

II.C.1 Définition d'une « couche mince »

Il est important de bien définir le terme de « couche ou film mince » pour applications PV. Chopra et al. donnent une définition précise des couches minces dans le cas des technologies solaires et présentent les critères permettant de différencier une couche « mince » d'une couche « épaisse » [II.32]. Ils définissent une couche mince comme un matériau créé ab initio par un procédé de croissance et une germination aléatoire d'espèces atomiques/ioniques/moléculaires, réactives/condensées, sur un substrat. Les propriétés structurales, chimiques et physiques d'un tel matériau, dépendent fortement des paramètres du

procédé de dépôt et dépendent de son épaisseur. Comme son nom l'indique, cette filière se base sur l'utilisation des couches minces dont les épaisseurs sont de l'ordre de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres : typiquement 10 à 50 μm d'épaisseur au lieu de 200 μm environ. Cette diminution des épaisseurs présente plusieurs avantages. Elle permet, tout d'abord, de réduire considérablement la quantité de matières premières utilisées, et aussi d'ouvrir de nouvelles applications. Le second critère qui permet de définir un film mince est le matériau d'absorption. Les matériaux absorbants sont des semiconducteurs inorganiques, organique et à base de matériaux III-V [II.11-II.23].

II.C.2 Les matériaux absorbants pour les applications photovoltaïques

II.C.2.1 Les couches minces inorganiques

Les principaux matériaux utilisés pour cette catégorie de couches minces sont : le tellurure de cadmium (CdTe), le CIGS (Cuivre Indium Gallium Sélénium) et le silicium cristallin. L'un des principaux avantages de ces cellules en couches minces est l'utilisation de substrats légers et flexibles. Cela ouvre de nouvelles applications, notamment dans le domaine de l'habitat, comme par exemple le placement de cellules photovoltaïques sur de grandes toiles à coller sur les murs où les toitures, pour générer de l'électricité.

II.C.2.2 Les cellules photovoltaïques organiques

Les cellules photovoltaïques organiques sont constituées d'une ou plusieurs couches minces de semi-conducteurs organiques. Ces cellules sont encore au stade du laboratoire et présentent déjà de nombreux avantages notoires : une réduction drastique des coûts de fabrication, un faible impact environnemental et une grande flexibilité d'utilisation. Leur développement à grande échelle est aujourd'hui freiné par la faible durée de vie des cellules et les faibles rendements qui les rendent difficilement compétitives avec les autres technologies. Les rendements maximaux actuels sont de l'ordre de 11% pour une cellule et environ 9% pour les modules.

II.C.2.3 Les couches minces à base de matériaux III-V

À côté de toutes ces filières, on trouve aussi celle des matériaux III-V, très performante. Les semi-conducteurs III-V sont des matériaux composés d'un ou plusieurs éléments de la colonne III et de la colonne V du tableau périodique de Mendeleïev, tels que l'arséniure de gallium, arséniure d'indium, nitrure de gallium, antimoniure de gallium ou des alliages

ternaires tels que $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$. Ils présentent généralement une haute mobilité électronique et une bande interdite directe. Après le Silicium, ce sont les deuxièmes matériaux semi-conducteurs les plus utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs.

Les cellules solaires III-V sont essentiellement utilisées pour les systèmes multi jonction dans le but d'augmenter le rendement de la cellule solaire, en superposition de multiples cellules ayant des bandes d'énergie interdites différentes permettant ainsi une absorption plus large du spectre solaire.

II.C.3 Avantages des cellules solaires en couches minces

Les cellules photovoltaïques en couches minces de silicium, qu'elles soient élaborées à partir d'un matériau amorphe, micro ou poly-cristallin ont de nombreux avantages par rapport aux cellules en silicium massif.

-Le principal avantage de cette technologie est que la consommation de la matière première devra être très réduite. En effet, dans le cas du silicium cristallin une faible épaisseur d'environ $10\mu\text{m}$ à $50\mu\text{m}$ suffit pour la réalisation d'une cellule photovoltaïque. Cette quantité présentée est divisée par un facteur de 4 à 10 du silicium purifié. Mais de plus, cette technologie n'implique pas de sciage de plaque, il n'y a donc pas de kerf loss. Cela permet ainsi de diviser à nouveau la quantité de silicium purifié par 2. On estime que les technologies industrialisées actuellement utilisent environ 5 g de silicium de haute pureté par watt-crête et que la production de plaquette constitue 46 % du coût du module [II.33].

- Une réduction du nombre d'étapes dans la fabrication des cellules,
- Une faible consommation énergétique durant le cycle de production,
- Une capacité de production sur de grandes surfaces, de l'ordre de 1m^2 , où l'interconnexion des cellules est intégrée.

Pour réaliser des cellules solaires en couches minces sur des lignes industrielles exigeant des cadences élevées et une production moins coûteuse, plusieurs problèmes techniques freinent le développement de cette filière.

Parmi les problèmes spécifiques, on mentionnera :

- le développement de substrat bas coût avec des propriétés spécifiques,
- les techniques d'élaboration de couches minces en Si qui doivent être rapides ($\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$),
- le développement d'étapes de procédé adéquat pour la fabrication des cellules solaires.

II.C.4 Les cellules solaires en couches minces de silicium cristallin

Les cellules en couches minces de silicium cristallin (ou Crystalline Silicon Thin-Film solar cells — CSiTF en anglais) sont des cellules solaires de même nature que celles présentées précédemment, mais d'une épaisseur bien moindre : typiquement 10 à 50 μm d'épaisseur au lieu de 200 μm environ.



Figure II.18 : Cellule solaire en couches minces

Une plaquette de silicium aussi mince doit être attachée à un substrat plus rigide afin d'être manipulée pendant ses étapes de fabrication car elle est flexible et très fragile. Ce substrat peut être fait de silicium ou bien d'un autre matériau.

La plupart de ces cellules sont fabriquées par épitaxie à la place des étapes de coulage de lingot, sciage de briques et de plaques [II.26].

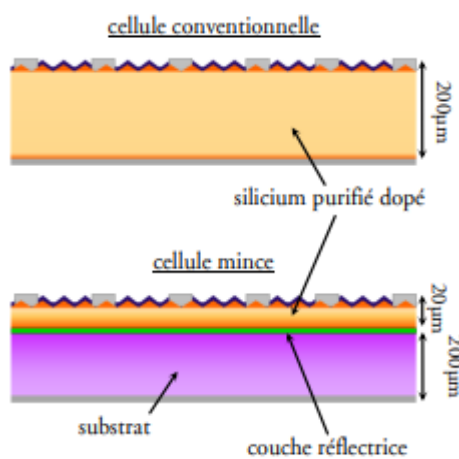


Figure II-19 : Schéma d'une cellule couche mince de silicium cristallin par comparaison avec une cellule de silicium cristallin conventionnelle. En orangé : zone active de la cellule, en violet : zone inactive [II.26].

II.C.4.1 L'élaboration de silicium cristallin en couches minces

En effet, le silicium est un matériau semi-conducteur caractérisé par des propriétés électriques fortement altérées par les impuretés et les défauts cristallographiques tel que les joints de grains et dislocations, qui jouent le rôle de centres de recombinaison pour les porteurs de charge. Ainsi la présence d'impuretés métalliques, même en très faibles quantités (10^{16} cm^{-3}), induit une forte diminution du rendement de conversion du matériau qui atteint 50% pour certains éléments [II.34].

Plusieurs procédés permettent actuellement l'élaboration de silicium cristallin en couches minces [II.35]. Parmi ceux-ci, trois principales voies se distinguent :

- tirage du silicium en ruban,
- transfert de couches de silicium monocristallines,
- dépôt direct d'une couche mince sur substrat.

II.C.4.2 Choix du substrat

Le substrat joue un rôle important sur les caractéristiques des couches déposées, ainsi que sur l'architecture de la cellule photovoltaïque, selon qu'il soit transparent ou opaque à la lumière, conducteur ou isolant électrique. Son choix doit satisfaire à un grand nombre de critères que sont :

- Une résistance aux températures de dépôt,
- Une résistance élevée aux chocs thermique,
- Un coefficient d'expansion thermique proche de celui de silicium afin d'éviter les fissures et le décollement dans la couche lors du refroidissement, un confinement efficace de la lumière dans la couche mince de silicium,
- Un faible cout pour une utilisation à échelle industrielle (rapide et peu couteux).

II.C.5 Les structures pour le confinement optique

Le rendement d'absorption est un facteur de plus en plus limitant lorsque l'épaisseur de matériau absorbeur diminue. Dans le cas du silicium, la réduction de l'épaisseur entraîne naturellement une perte de rendement d'absorption et par suite une perte de rendement de conversion.

Cette perte peut être compensée par le piégeage optique de la lumière, appelé confinement optique, le plus important dans une cellule solaire mince que dans une cellule épaisse. Le principe est donc, d'avoir le plus grand nombre possible de photons dans la couche active.

Ainsi, ils ont plus de chances d'être absorbés pour former une paire électron-trou.

Pour capter assez de rayonnement à l'intérieur des couches minces de silicium, la recherche s'est conduite vers le recours aux couches antireflet et à un réflecteur arrière (substrat opaque ou métallisation de la face arrière de la cellule) ou à une texturisation des interfaces.

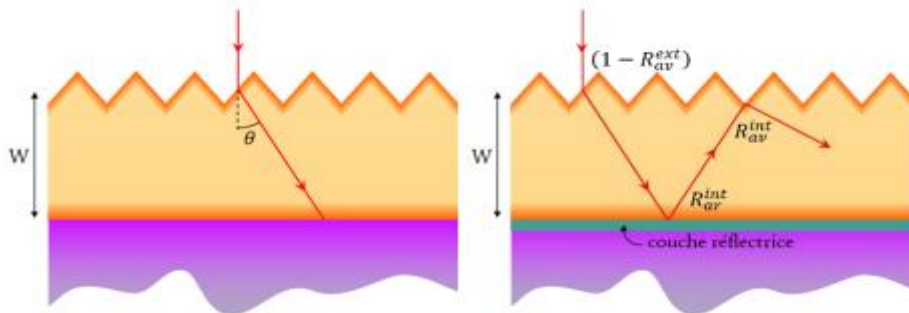


Figure II.20 : Piégeage optique. **À gauche :** Allongement du chemin optique par inclinaison des rayons. **A droite :** par le biais de la réflectivité externe en face avant R_{av}^{ext} , la réflectivité interne en face arrière R_{ar}^{int} due à la présence d'une couche réfléchissante et la réflectivité interne en face avant R_{av}^{int} .
 [II.26]

Ces techniques permettent à la fois de diminuer la réflexion du rayonnement incident sur la cellule par effet d'interférences et de diffuser la lumière pour augmenter le parcours moyen des rayons dans les substrats. Un moyen de réduire cet effet est d'allonger le chemin optique en le rendant oblique à l'intérieur de la cellule. De cette manière, pour les photons, tout se passe comme si la cellule était épaisse de $w/\cos\theta$ (voir Figure II-20).

Les texturations de surface, essentiellement basées sur des procédés de gravure chimique anisotrope par solution de KOH (hydroxyde potassium) ou TMAH (tétraméthylammonium hydroxyde) [II.36-II.37], permettent de former sur toute la surface des pyramides aléatoires micrométriques ou bien des réseaux ordonnés de pyramides inversées après une étape de lithographie [II.38-II.39-II.40].

Différentes techniques ont été mises au point pour assurer une bonne réflexion interne en face arrière. Parmi elles, le dépôt d'un matériau blanc [II.41] et la formation d'un réflecteur de Bragg [II.42]. Ce dernier est constitué d'une alternance de deux couches satisfaisant la relation :

$$n_1 e_1 = n_2 e_2 = \frac{\lambda_0}{4} \quad \text{II.4}$$

Avec n_i l'indice de réfraction, e_i l'épaisseur de la couche i et la longueur d'onde à laquelle est centrée le plateau de forte réflectivité. La réflexion sera d'autant meilleure que les indices de réfraction des deux couches seront éloignés l'un de l'autre.

La réflexion interne en face avant est beaucoup plus difficile à augmenter car la face avant des cellules est d'abord optimisée pour minimiser la réflexion extérieure. Avec un contrôle précis de la structure face avant et de l'épaisseur [II.43].

II.D L'épitaxie des couches minces de silicium monocristallin pour le solaire photovoltaïque

La croissance par épitaxie en phase vapeur à haute température sur un substrat multi cristallin ou monocristallin de basse qualité est une voie de promesse pour la fabrication de cellules solaires à haut rendement et moins coûteuse.

Nous présentons dans cette partie les différentes approches existantes pour l'obtention de couches minces de silicium cristallin. Une première voie consiste à cristalliser un dépôt de silicium cristallin puis, d'épaissir la couche par épitaxie. Enfin, la dernière approche aborde l'épitaxie sur substrat bas coût en silicium de qualité dégradée.

II.D.1 Notions théoriques

L'épitaxie a été développée dans les années 1970 pour les applications de la microélectronique. Cette technique est applicable au domaine du photovoltaïque. En effet, nous recherchons ici une vitesse de croissance élevée et des coûts de procédé maîtrisés, alors que pour la microélectronique.

II.D.2 Définition

Le terme d'épitaxie a été créé en 1928 par Louis Royer [II.44], il provient étymologiquement des mots grecs *epi*, qui signifie au-dessus, et *taxis*, qui signifie ordonné. L'épitaxie est une technique de dépôt correspond à la croissance d'un cristal sur un autre, selon l'ordonnement de ce dernier [II.45]. Un grand nombre de matériaux sont concernés par cette technique, il y a le Silicium, alliage silicium-germanium, composés III-V binaires ou ternaires, métaux, Selon que le substrat et le matériau épitaxie sont de même nature ou non, on distingue l'homoépitaxie et l'hétéroépitaxie.

II.D.3 Les avantages

L'utilisation d'un procédé d'épitaxie pour la croissance des couches actives des cellules solaires minces n'implique donc pas de procédé de sciage de plaque, il n'y a donc pas de déchets de sciage et on peut s'attendre à diminuer la consommation de silicium purifié. Dans cette approche, les filières couches minces constituent des voies à explorer pour réduire les coûts de fabrication des cellules solaires en silicium.

II.D.4 Les différentes techniques

Dans le cadre de ce travail, il s'agit d'homoépitaxie de silicium sur substrat de silicium.

En ce qui concerne les dépôts par épitaxie pour l'approche « haute température », il existe trois méthodes principales développées dans la prochaine partie : l'épitaxie par jet moléculaire (MBE), l'Épitaxie en Phase Vapeur (VPE ou CVD) ou l'Épitaxie en Phase Liquide (EPL). Les deux dernières méthodes sont généralement les plus courantes car elles permettent d'atteindre des vitesses de l'ordre du $\mu\text{m}/\text{min}$.

Mais, depuis le début du siècle, les chercheurs se sont tournés vers la CVD. Une vue d'ensemble des rendements atteints à partir de l'approche de croissance de Si par épitaxie sur substrat bas coût, à la fin des années 90, est exposée dans le tableau I.5. Pour démontrer le potentiel et la fiabilité des couches minces en Si cristallin, les chercheurs ont d'abord réalisé des couches épitaxiées sur Si monocristallin.

Dans ce paragraphe, nous rappellerons les différentes techniques de croissance par épitaxie.

II.D.4.1 L'épitaxie par jet moléculaire

L'épitaxie par jet moléculaire (ou MBE pour Molecular Beam Epitaxy) consiste à envoyer sous ultravide des flux contrôlés d'atomes ou de molécules sur la surface d'un substrat convenablement chauffé entre 400°C et 800°C avec des vitesses de croissances faibles comprises entre $0,1 \mu\text{m.h}^{-1}$ et $1 \mu\text{m.h}^{-1}$. Le vide très poussé de l'ordre de 10^{-8} - 10^{-9} mbar permet d'obtenir des libres parcours moyens très grands et d'éviter tout choc ou contamination du film déposé. La figure II-23 représente un bâti d'épitaxie par jet moléculaire.

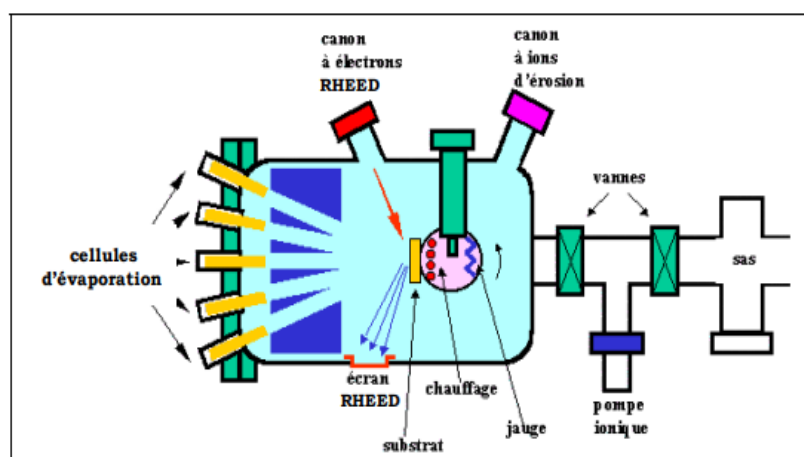


Figure II-21 : Bâti d'épitaxie par jet moléculaire [II.4]

Industriellement, cette technique, très coûteuse, ne concerne que des dispositifs à forte valeur ajoutée. Elle est concurrente de l'épitaxie en phase vapeur par exemple dans le cas des semiconducteurs III-V.

II.D.4.2 L'épitaxie en phase liquide EPL

C'est le premier procédé d'épitaxie à avoir été développé. La croissance par épitaxie en phase liquide est une technique qui repose sur le contrôle de l'équilibre thermodynamique entre une phase liquide et un substrat solide. L'élément silicium se retrouve en sursaturation dans la phase liquide suite à la décroissance contrôlée de la température et, par conséquent, précipité sur le substrat. La vitesse de dépôt, autour de $1 \mu\text{m}/\text{min}$ dépend de la rampe de décroissance en température (entre $0.5^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ et $2^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$). Cette technique a apporté de bons résultats en laboratoire mais est difficilement industrialisable.

II.D.4.3 L'épitaxie en phase vapeur (VPE ou CVD)

L'épitaxie en phase vapeur fait partie de la grande famille des procédés dits de CVD (Chemical Vapor Deposition) qui concentrent toutes les techniques de dépôts de couches amorphes ou cristallines à base de précurseurs gazeux. Le procédé de base de l'épitaxie est de reproduire lors de la phase de dépôt, l'organisation cristalline du substrat sur lequel la couche croît.

Deux situations peuvent se présenter : lorsque l'espèce déposée est la même que celle du substrat hôte on parle alors d'homo-épitaxie, sinon on parle d'hétéro-épitaxie.

Pour un procédé en phase vapeur, les précurseurs gazeux pour le silicium sont généralement :

- Le silane SiH_4 , qui nécessitera d'ajouter de l'acide chlorhydrique gazeux,
- Les composés chlorés tels que le dichlorosilane SiH_2Cl_2 , le trichlorosilane SiHCl_3 et tétrachlorure de silicium SiCl_4 .

L'épitaxie en phase vapeur consiste à faire croître un cristal à partir de sources gazeuses décomposées au contact d'un substrat monocristallin chauffé. On distingue plusieurs types de réacteur suivant la méthode d'excitation énergétique mais aussi suivant la pression du travail. La pression à laquelle se déroule la croissance cristalline permet de différencier plusieurs méthodes d'épitaxie en phase vapeur :

- Réacteur opérant sous pression atmosphérique : APCVD, acronyme de Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition.

- Réacteur opérant sous pression réduite : LPCVD, acronyme de Low Pressure Chemical Vapor Deposition.

- Réacteur opérant sous ultravide : UHVCVD, acronyme d'Ultra High Vacuum Chemical Vapor Deposition.

Le mode de chauffage du substrat détermine également le type d'épithaxie : chauffage par résistances, par induction radio-fréquence, par lampes (RTCVD pour Rapid Thermal Chemical Vapor Deposition), ou par plasma (PECVD pour Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition).

Le réacteur d'épithaxie devra alors tenir compte des caractéristiques de la technique choisie. La figure II-22 représente différents types de réacteurs CVD.

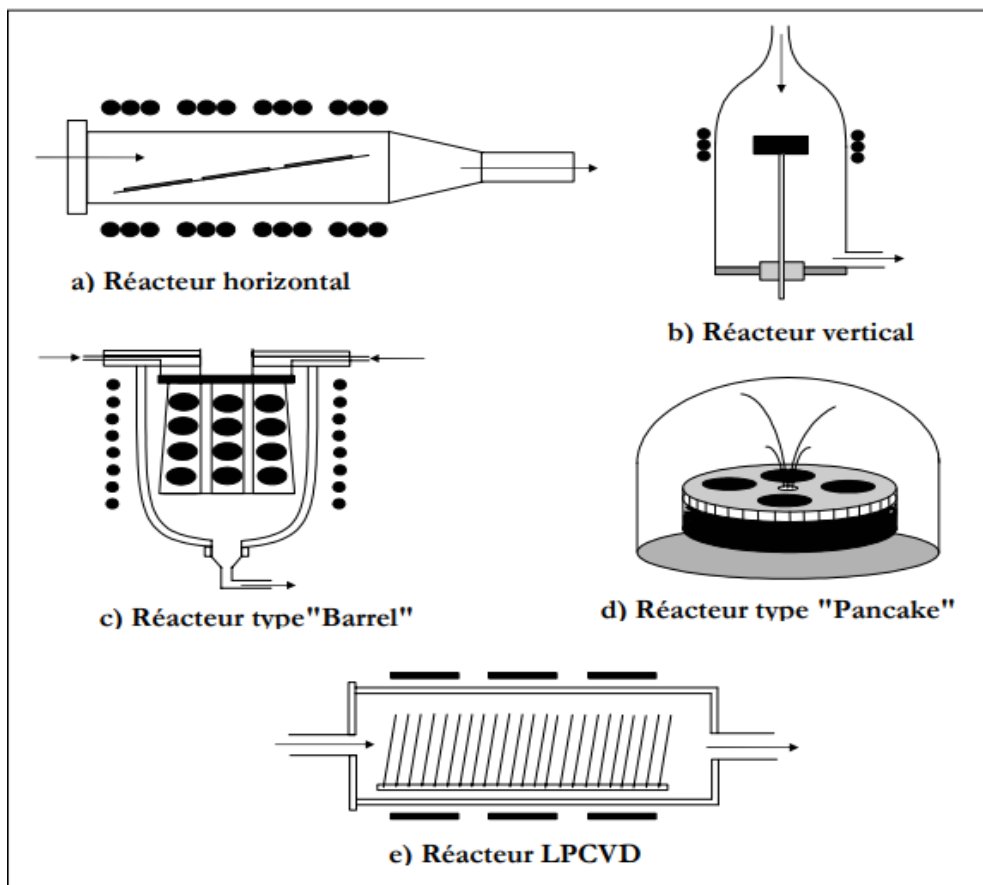


Figure II-22 : Les différents types de réacteurs d'épithaxie en phase gazeuse [II.3]

Les vitesses de croissance peuvent être élevées jusqu'à la dizaine de microns par minute, cela explique pourquoi l'épithaxie en phase vapeur est la technique la plus répandue dans l'industrie

II.D.5 Dopage des couches durant le procédé d'épithaxie

Afin de fabriquer des cellules solaires, le silicium épithaxié doit être dopé. Le procédé d'épithaxie donne la possibilité d'introduire des atomes dopants dans le cristal du matériau. Cette technologie est d'un grand intérêt pour simplifier le procédé de fabrication de cellules solaires, mais aussi pour maîtriser les profils de dopage afin d'optimiser le compromis entre recombinaisons des porteurs de charge et effets du champ électrique pour la collection de ces charges. Le dopage de la couche épithaxie se fait grâce à l'introduction dans le mélange de gaz dopants :

- Diborane (B_2H_6) pour un dopage de type p (Bore)
- Phosphine (PH_3) pour un dopage de type n (Phosphore) [II.40].

II.D.6 Passivation des défauts cristallographiques

La plupart des techniques d'élaboration des cellules solaires à base du silicium cristallin en couches minces conduisent à un matériau caractérisé par la présence de défauts cristallographiques comme les joints de grains, les dislocations et contient souvent des impuretés métalliques. Ils sont à éviter autant que possible car ils causent de la recombinaison des porteurs minoritaires et conduisent à une dégradation des performances des cellules solaires.

Ils résultent soit du substrat, soit des conditions expérimentales. Typiquement, un nettoyage insuffisant du substrat, la présence d'impuretés en surface ou une contamination par le réacteur conduiront à des défauts d'épithaxie. Les défauts les plus généralement trouvés dans une couche épithaxiée sont schématisés en Figure II-23.

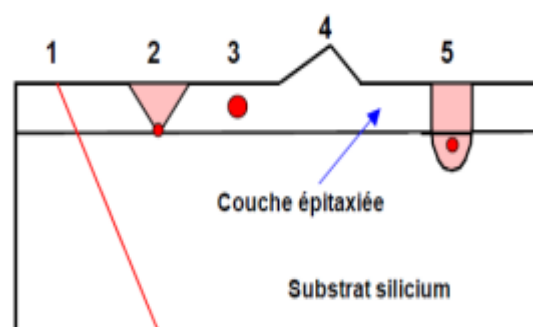


Figure II-23 : Défauts typiques de l'épithaxie. (1) dislocation se prolongeant dans la couche épithaxiée, (2) faute d'empilement causée par un précipité en surface, (3) précipité d'impuretés apportées pendant l'épithaxie, (4) pyramide, (5) impuretés causant un défaut dans le substrat se prolongeant à la surface. [II.46]

Ces centres de recombinaison sont généralement réduits par extraction des impuretés métalliques par effet getter, puis par passivation des défauts de structure par hydrogénation.

II.D.7 Epitaxie sur substrat Si bas coût

La croissance par épitaxie à haute température sur un substrat multi cristallin ou monocristallin de basse qualité est une voie de promesse pour la fabrication de cellules solaires à haut rendement et moins coûteuse. Pour éviter toute contamination de la couche active, il est nécessaire d'utiliser une barrière de diffusion. D'autre part, la surface doit être adaptée au paramètre de maille du silicium pour éviter l'apparition de contraintes mécaniques dans le film.

Ainsi, à partir de ces observations, il apparaît clairement qu'un compromis devra être trouvé entre la qualité du matériau à déposer et le coût de son élaboration. Aussi la recherche s'oriente également vers la fabrication de cellules photovoltaïques basée sur le report de films minces de silicium monocristallin déposés par épitaxie sur des substrats économiques. Il faut donc définir le substrat approprié. Dans l'idéal, **ce substrat doit présenter une qualité structurale élevée pour permettre une croissance épitaxiale avec une faible densité de défauts cristallins**. Il doit avoir une faible concentration d'impuretés pour ne pas détériorer les propriétés électriques de la cellule finale et son coût doit être significativement bas afin d'avoir un procédé final bon marché. Les substrats qui répondent à ces critères sont des wafers de Si dopés, **rejets de la microélectronique qui ne peuvent pas être directement utilisés pour la fabrication de cellules solaires**.

Il sera cependant préférable d'employer le silicium monocristallin de type p provenant de la découpe des lingots (éboutages) pour avoir des rendements aussi élevés. Car la qualité électronique de ce matériau est généralement supérieure.

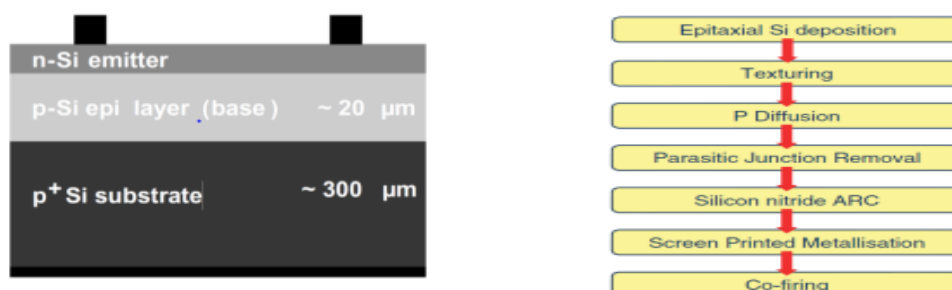


Figure II.24 : Section transversale d'une cellule solaire à base de Si en couche mince : Vue de la structure (à gauche). Etapes de fabrication d'une cellule en Si cristallin (à droite) : Seule la première étape de fabrication concernant le dépôt par épitaxie est ajoutée par rapport au procédé industriel standard (d'après [II.47]).

Ce concept est le plus simple et correspond donc à l'application visée dans le cadre de la thèse, il est basé sur l'usage d'un substrat Si « bas coût », défini ci-après, sur lequel la couche active de Si est déposée directement par épitaxie (Figure II.24). Les avantages de cette approche sont évidents, une seule étape supplémentaire est nécessaire pour la fabrication de la cellule : l'étape de dépôt de la couche épitaxiée. Le procédé est compatible avec le procédé industriel standard utilisé pour la fabrication de cellule solaire en Si cristallin (Figure II.24).

Cependant cette approche est limitée aux substrats à base de Si et aux épaisseurs assez importantes car il n'y a pas de réflecteur en face arrière. De plus, il n'y a pas de barrière de diffusion des impuretés du substrat, ce qui pose le problème du niveau de pureté du substrat utilisé.

Conclusion du chapitre II

Nous avons donc vu dans ce chapitre d'abord les différentes techniques de dépôt de silicium par la voie basse température et la voie haute température dans la fabrication des cellules solaires en couches minces, ainsi que leur mode de fabrication. Pour réduire les coûts de production des cellules solaires qui sont encore élevés, et afin de développer cette filière qui se situe dans un secteur très concurrentiel, la méthode la plus accessible pour les industriels est la réduction de l'épaisseur des plaques de silicium tout en améliorant la passivation des surfaces et le confinement optique.

Le concept le plus simple est basé sur l'usage d'un substrat Si « bas coût », sur lequel la couche active de Si est déposée directement par épitaxie. Il est nécessaire de trouver le substrat adéquat, ce substrat doit supporter les hautes températures des étapes de fabrication comme l'épitaxie et avoir un coefficient d'expansion proche du Si afin d'éviter les contraintes dans le matériau. Il doit, de plus, conduire l'électricité et ne pas contaminer la cellule en impuretés. Les substrats qui répondent à ces critères sont des wafers de Si monocristallin de type p **qui ne peuvent pas être utilisés pour la fabrication de cellules solaires suite aux rejets de la microélectronique**. Cette technique présente des avantages notables pour leur industrialisation.

Plusieurs techniques d'épitaxie sont possibles pour réaliser la couche active de Si à hautes températures. Les techniques d'épitaxie en phase vapeur (CVD) et en phase liquide (EPL) permettent d'obtenir des rendements de conversion énergétique intéressants sur des substrats en silicium cristallin.

Références bibliographiques du chapitre II

- [II.1] **Stephen BORDAIS**, "Etude du Dépôt et des Propriétés Physiques du Silicium Polycristallin obtenu par le procédé RTCVD sur Substrats de Mullite. Application aux Cellules Photovoltaïques en Couches Minces ", Thèse de Doctorat de l'université Louis Pasteur de Strasbourg (2000).
- [II.2] **Malek BENMANSOUR**, "Développement, contrôle et modélisation d'un procédé de projection de poudre de silicium par plasma RF- Application aux couches minces photovoltaïques", Thèse de l'université Pierre et Marie CURIE PARIS VI – 200.
- [II.3] **ZERGA Abdelatif**, "Caractérisation, Modélisation et Simulation Numérique des Cellules Photovoltaïques à base de Silicium Polycristallin en Couche Mince Déposée par RT-CV", Thèse de l'université Abou Bakr BELKAID de Tlemcen 2004-2005.
- [II.4] **Hallou Solaire**, "La fabrication des cellules photovoltaïques". [En ligne] Disponible sur : http://sti2d.patgue.com/SitePV/Ressource_PV/Cellule_solaire_module_solaire.pdf "Cellule_solaire_module_solaire_4.pdf". Consulté le : 22.04.2023
- [II.5] **Fatima ABDO** "Croissance de couches minces de silicium par épitaxie en phase liquide à basse température pour applications photovoltaïques, " Thèse de l'institut des nanotechnologies de Lyon- 2007.
- [II.6] **Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, and Ewan D. Dunlop**. Solar cell efficiency tables (version 48). Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 24(7) :905–913, July 2016.
- [II.7] **Tanaka M., Okamoto S. and Tsuge S.** : Development of HIT solar cells with more than 21% conversion efficiency and commercialization of highest performance HIT module, Proc. of the 3rd World Conference and Exhibition on Photovoltaics Solar Energy Conversion, Osaka, Japan, 2003, pp. 1-4.
- [II.8] **Mulligan W. P., Rose D.H., Cudzinovic M.J., et al.** : Manufacture of solar cells with 21% efficiency by Sunpower. Proc. of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2004, Paris, France, pp. 387-390.
- [II.9] **Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, and Ewan D. Dunlop**. Solar cell efficiency tables (version 48). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 24(7) :905–913, July 2016. 1, 2, 14, 15, 16, 17, 89, 90, 110, 111
- [II.10] **Média Terre**, "Les différents types de cellules photovoltaïques" [En ligne]. Disponible sur : <https://www.mediaterre.org/france/actu,20150616115408.html>. Consulté le : 22.04.2023
- [II.11] **Abdoulwahab Adaine** "Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN" Thèse de Doctorat-Université de Lorraine et Centrale Supélec-2018

- [II.12] **Élise BRUHAT**, "Développement de cellules photovoltaïques silicium à homojonction industrialisables à contacts passivés", Université de Lyon 2019, pp. 38
- [II.13] **Photovoltaïque.info**. "Les technologies de cellules solaires photovoltaïques" [En ligne]. Disponible sur : <https://www.photovoltaïque.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/caracteristiques-des-panneaux-photovoltaïques/technologies-de-cellules-solaires-photovoltaïques/>. Consulté le : 16.04.2023
- [II.14] **Aboubacar Namoda**, "Dégradation (effet Staebler-Wronski) et caractérisation des cellules solaires à base de silicium amorphe hydrogène(a-Si:H) ", Thèse de Doctorat- Université de Lorraine - 1999.
- [II.15] **R. A. Street**: Hydrogenated Amorphous Silicon. Cambridge University Press, septembre 2005. ISBN 9780521019347. (Cité pages 11, 13, 14, 16, 23, 30, 41 et 42.)
- [II.16] **16 Raphaël LACHAUME**, "Contribution à la caractérisation électrique et à la simulation numérique des cellules photovoltaïques silicium à hétérojonction" Thèse de l'université de Grenoble - 2014
- [II.17] **R. C. Chittick, J. H. Alexander et H. F. Sterling** : The preparation and properties of amorphous silicon. Journal of The Electrochemical Society, 116(1): 77–81, janvier 1969. ISSN 0013-4651, 1945-7111. URL <http://jes.ecsdl.org/content/116/1/77>. (Cité page 11.)
- [II.18] **D. E. Carlson et C. R. Wronski** : Amorphous silicon solar cell. Applied Physics Letters, 28(11) : 671–673, juin 1976. ISSN 00036951. URL http://apl.aip.org/resource/1/applab/v28/i11/p671_s, "Contribution à la caractérisation électrique et à la simulation numérique des cellules photovoltaïques silicium à hétérojonction" Thèse de l'université de Grenoble – 2014 p.11.
- [II.19] **Sivac AMTABLIAN**, "Du transfert de films minces de silicium monocristallin vers un procédé cellule à faible budget thermique", Thèse de l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2008 p.24.
- [II.20] **Ph Rocher**, "Memento roches et minéraux industriels Silice", Rapport BRGM R 37830 GEO SGN – 1993.
- [II.21] **Eco Info**, "Le silicium : La fabrication". Disponible sur : <https://ecoinfo.cnrs.fr/2010/10/20/le-silicium-la-fabrication/> - 2010
- [II.22] **Alain Ricaud**, "Photopiles solaires". Lausanne. Presse polytechniques et universitaires romandes, 1997, p. 224
- [II.23] **Stephen Giraud**, "Croissance de couches minces de silicium pour applications photovoltaïques par épitaxie en phase liquide par évaporation du solvant", Thèse de l'université de Grenoble – 2014, p.17
- [II.24] **Kraiem, J., Drevet, B., Cocco, F., Enjalbert, N., Dubois, S., Camel, D., and**

- Grosset-Bourbange, D.**, "High performance solar cells made from 100% UMG silicon obtained via the photosil process", 35th IEEE, 1427–1431, Honolulu, Hawaii, USA -2010.
- [II.25] **Equer, B.**, "Dossier Photovoltaïque de la Société Française de Physique, Reflets de la physique" - 2007
- [II.26] **Mailys Grau**, "Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres" Thèse de l'institut national des sciences appliqués de Lyon, 2012 p.30.
- [II.27] **Christian Trassy**, "La métallurgie du silicium solaire", Reflets de la physique n 5 Science et ingénierie des matériaux et procédés, UMR CNRS 5266, Grenoble
- [II.28] **J. G. Beesley and U. Schönholzer**, "Slicing 80 micrometer wafers - process parameters in the lower dimensions," in proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, no. 2BO.1.5, 2007.
- [II.28] **Thomas Schutz-Kuchly**, "Investigation du silicium de qualité solaire de type n pour la fabrication de cellules photovoltaïques" Thèse de l'université Aix-Marseille, 2011 p.28.
- [II.29] **Hecht**, "Physique", Ouvrage, Traduction de la 1^{re} édition américaine par T. Becherrawy Révision par Joël Martin p.889
- [II.30] "Energie solaire, énergie photovoltaïque". [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.scribd.com/document/680176621/6Solaire>. Consulté le : 02.04.2023
- [II.31] **Barbara Bazer-Bachi**, "Développement et mise au point d'un procédé innovant de diffusion des dopants N et P pour la fabrication de cellules", Thèse de l'université de sciences appliquées de Lyon, 2010
- [II.32] **Chopra, K. L., Paulson, P. D., Dutta, V.**, "Thin-film solar cells: an overview, Progress in Photovoltaics: Research and Applications", 12, 69-92, 2004.
- [II.33] **M. Green**, "Quo vadis silicon photovoltaics? " in proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference, no. 1AP.1.3, 2011.
- [II.34] **J.R.Davis, A.Rohatgi, R.H.Hopkins, P.D.Blais, P.Rai-Choudhury, J.R.McCormick** IEEE TED, Vol.24, N°4, pp.677, 1980
- [II.35] **R.B.Bergmann** Appl.Phys.A, Vol.69, pp.187-194, 1999
- [II.36] **J. Szlufcik, S. Sivoththaman, J. F. Nijs, R. P. Mertens, and R. VanOverstraeten**, "Low cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells", Proc. Ieee, vol. 85, no. 5, pp. 711– 730, 1997.
- [II.37] **M. A. Green**, "SILICON SOLAR CELLS - Advanced Principles & Practice. Sydney, Australia: Centre for Photovoltaic Devices and Systems, University of New

South Wales, 1995.

- [II.38] **I. Massiot**, "Design and fabrication of nanostructures for light-trapping in ultra-thin solar cells", Thesis, 2014.
- [II.39] **L. Wang, F. Wang, X. Zhang, N. Wang, Y. Jiang, Q. Hao, and Y. Zhao**, "Improving efficiency of silicon heterojunction solar cells by surface texturing of silicon wafers using tetramethylammonium hydroxide", *J. Power Sources*, vol. 268, pp. 619–624, 2014.
- [II.40] **Romain CHAMPORY**, "Cellules solaires silicium ultra-minces nanostructurées : conception électro optique et développement technologique", Thèse de l'université de Lyon, 2016
- [II.41] **Y. Park, E. Drouard, and O. El Daif**, "Absorption enhancement using photonic crystals for silicon thin film solar cells", *Opt. Express*, vol. 17, no. 16, 2009.
- [II.42] **C. Trompoukis, I. Abdo, R. Cariou, I. Cosme, W. Chen, O. Deparis, A. Dmitriev, E. Drouard, M. Foldyna, E. G.- Caurel, I. Gordon, B. Heidari, A. Herman, L. Lalouat, K.-D. Lee, J. Liu, K. Lodewijks, F. Mandorlo, I. Massiot, A. Mayer, V. Mijkovic, J. Muller, R. Orobtschouk, G. Poulain, P. Prod'Homme, P. R. I. Cabarrocas, C. Seassal, J. Poortmans, R. Mertens, O. El Daif, and V. Depauw**, "Photonic nanostructures for advanced light trapping in thin crystalline silicon solar cells, "Phys. Status Solidi", vol. 212, no. 1, pp. 140–155, 2015.
- [II.43] **P. Campbell and M. A. Green**, " Light trapping properties of pyramid ally textured surfaces", *Journal of Applied Physics*, vol. 62, no. 1, pp. 243–249, 1987.
- [II.44] **L. Royer**, "Recherches expérimentales sur l'épitaxie ou orientation mutuelle des cristaux d'espèces différentes", *Bulletin de la Société française de minéralogie et de cristallographie*, vol. 51, pp. 7–159, 1928.
- [II.45] **W. C. O'Mara, R. B. Herring, and L. P. Hunt**, "Handbook of Semiconductor Silicon Technology". Noyes Publications, 1990.
- [II.46] **S. Quoizola**, "Épitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mésoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût," Thèse de Doctorat, INSA Lyon, 2003.
- [II.47] **Beaucarne, G., Duerinckx, F., Kuzma, K., Van Nieuwenhuysen, K., Kim, H. J., Poortmans, J.**, "Epitaxial thin-film Si solar cells", *Thin Solid Film*, 511-512, 533-542, 2006.

Chapitre III
Présentation du programme PC1D

III.A Introduction

La physique des semi-conducteurs est un domaine très riche en problèmes de modélisation et de mathématiques. Selon l'échelle considérée : microscopique, mésoscopique ou macroscopique, la modélisation du transport des charges requiert une description quantique, cinétique ou fluides [III.1].

La modélisation numérique est un outil indispensable dans l'analyse et la conception des composants à semi-conducteur. Elle joue un rôle très important dans le développement de la technologie photovoltaïque. Les performances de cette dernière sont analysées rapidement par l'utilisation de simulateurs solaires puissants et performants, qui donnent des résultats proches des résultats expérimentaux. Ceci rend le coût d'investissement moins cher et le temps de développement très court pour le processus de fabrication de la cellule solaire [III.2].

La simulation numérique de structures cellules solaires permet de visualiser des phénomènes physiques difficilement observables intervenant dans le fonctionnement du composant, tels que les phénomènes de photogénération et de recombinaison des porteurs et la distribution du champ électrique [III.3- III.4].

Un simulateur solaire est un ensemble de programmes basés sur des méthodes de discrétisation numérique, permettant de faire une modélisation rapide des composants semi-conducteurs. Il est capable de résoudre les équations de base du semi-conducteur telles que l'équation de Poisson, les équations de continuité (ou équations de conservation du courant) et les équations de transport. Ces équations sont les équations de base qui décrivent les différents phénomènes qui s'appliquent à la plupart des structures photovoltaïques [III.5].

A l'heure actuelle, un certain nombre de logiciels de simulation sont disponibles pour la communauté de recherche PV. Ce nombre d'outils de logiciels sont : AMPS-1D, SCAPS-1D, PC1D, Sim Windows, ASA, ADEPT-F, SC-Simul, ASPIN et AFORS-HET. Parmi les outils de simulation disponibles, PC1D est principalement utilisé pour la modélisation des cellules solaires à base de silicium cristallin en couches minces,

Nous allons voir ici, dans un premier temps, les équations fondamentales intégrées dans le simulateur utilisé dans cette étude, puis nous présenterons l'outil informatique utilisé pour la simulation et l'optimisation d'une cellule solaire.

III.B Equations de base du semi-conducteur

Un programme de modélisation des cellules solaires devrait, au moins, être capable de résoudre les équations de base de semi-conducteurs qui sont les suivants :

III.B.1 Equation de Poisson

L'équation de Poisson permet d'établir un rapport entre les variations du potentiel électrostatique (champ électrique) ϕ et la densité volumique de charge électrique. Elle s'exprime par [III.6-III.7] :

$$\text{div}(\epsilon \nabla \phi) = -\rho \quad \text{III.1}$$

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad \text{III.2}$$

Où ρ est la charge électrique dans le semi-conducteur, ϵ_s désigne la permittivité absolue du matériau qui peut être exprimée par le produit de sa permittivité dans le vide et relative dans le matériau selon la formule $\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_r$, ϕ le potentiel électrostatique, n et p les concentrations des porteurs libres.

$$\rho = q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad \text{III.3}$$

Où N_D^+ et N_A^- sont les densités des donneurs et accepteurs ionisés.

Certains logiciels de simulation sont à une dimension. Dans ce cas, l'équation de Poisson s'écrit [III.8] :

$$\frac{-d^2\phi}{dx^2} = \frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad \text{III.4}$$

Le champ électrique est obtenu à partir du potentiel électrique par la relation suivante [III.9] :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} \phi \quad \text{III.5}$$

III.B.2 Equation de continuité

Les équations de continuité permettent de déterminer, en tout point et à chaque instant, la concentration des porteurs de charge (électrons et trous) dans un semi-conducteur [III.10-III.11], elle s'écrit :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \quad \text{III.6}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad \text{III.7}$$

G_n et G_p sont les taux de générations optique des paires électrons trous, R_n et R_p sont respectivement les taux de recombinaison pour les électrons et les trous, \vec{J}_n et \vec{J}_p sont les densités des courants des électrons et des trous.

En régime permanent, la variation des électrons (respectivement des trous) est nulle, les équations III-6 et III-7 peuvent s'écrire :

$$-\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n = G_n - R_n \quad \text{III.8}$$

$$\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p = G_p - R_p \quad \text{III.9}$$

Ces équations traduisent que la variation de la densité de courant dans un volume est égale à la différence des porteurs générés et recombinaison dans cet espace, autrement dit le nombre de porteurs de charges dans la cellule est conservé. La résolution des équations différentielles III-8 et III-9 exige la connaissance des mécanismes reliant les phénomènes de génération, de recombinaison et les courants. Plusieurs modèles ont été élaborés pour pouvoir résoudre ces équations [III.12].

III.B.3 Les équations de transport [III.2- 6-7-13]

Le déplacement des porteurs de charges se fait soit sous l'effet d'un champ électrique soit sous l'action d'un gradient de concentration de porteurs de charges. Sous l'action d'un champ électrique, on a un courant appelé courant de dérive (ou courant de conduction) proportionnel au champ électrique, défini par la relation suivante :

$$\vec{J}_n = n \cdot q \cdot \mu_n \vec{E} \quad \text{III.10}$$

$$\vec{J}_p = p \cdot q \cdot \mu_p \vec{E} \quad \text{III.11}$$

Où \vec{E} est le champ électrique et μ_n et μ_p les mobilités respectivement des électrons et des trous. Sous l'action d'un gradient (variation spatiale) de la densité des porteurs, le mouvement

de ces derniers s'effectue des régions à forte concentration vers les régions à faible concentration. On a un courant qui porte le nom de courant de diffusion :

$$\vec{J}_n = q \cdot D_n \nabla n \quad \text{III.12}$$

$$\vec{J}_p = -q \cdot D_p \nabla p \quad \text{III.13}$$

Où D_n et D_p sont les constantes de diffusion des électrons et des trous. Elles sont définies par la relation d'Einstein :

$$D_n = \frac{k_B T}{q} \mu_n \quad \text{III.14}$$

$$D_p = \frac{k_B T}{q} \mu_p \quad \text{III.15}$$

Où k_B désigne la constante de Boltzmann et T la température. En faisant la somme de ces deux types de courants (courant de dérive et diffusion), nous aboutissons à de la densité de courant totale pour les électrons et les trous l'expression suivante :

$$\vec{J}_n = n \cdot q \cdot \mu_n \vec{E} + q \cdot D_n \nabla n \quad \text{III.16}$$

$$\vec{J}_p = p \cdot q \cdot \mu_p \vec{E} - q \cdot D_p \nabla p \quad \text{III.17}$$

Si on considère le modèle de type linéaire (à une dimension selon x avec comme vecteur unitaire), les deux équations deviennent alors :

$$\vec{J}_n(x) = n(x) \cdot q \cdot \mu_n \vec{E}(x) + q \cdot D_n \frac{dn(x)}{dx} \quad \text{III.18}$$

$$\vec{J}_p(x) = p(x) \cdot q \cdot \mu_p \vec{E}(x) - q \cdot D_p \frac{dp(x)}{dx} \quad \text{III.19}$$

Ces équations intégrées au sein du simulateur sont résolues directement par ce dernier.

III.C Aperçu des programmes de simulation P.V

Quelle que soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un bon rendement. Habituellement, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils du dopage et le confinement optique.

La simulation présente plusieurs avantages qui les suivants :

- Elle permet d'éviter la fabrication de divers prototypes de cellules avec des paramètres différents,
- 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).

Les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, donc c'est un gain de temps et d'argent.

Le logiciel de simulation de cellules P.V son fonctionnement se base sur plusieurs domaines, parmi les suivants :

- Optique,
- Physique des semi-conducteurs,
- Circuits électriques,
- Caractérisation et production,
- Fonctionnement du système photovoltaïque,
- Coûts.

Les logiciels les plus utilisés pour la simulation numérique sont PC1D, ISE, TCHAD, SCAPS et SILVACO.

Dans notre cas, nous sommes intéressés à utiliser le simulateur PC1D.

III.D Aperçu sur le logiciel PC1D

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaires PC1D (Personnel Computer One Dimensionnel). C'est l'un des simulateurs largement répandu pour la modélisation des cellules photovoltaïque. Il a une grande réputation au sein du milieu de la recherche sur l'énergie solaire. Il a été élaboré par Paul A. Basaure durant ses travaux de recherches au centre de recherche de microélectronique de l'université d'Iowa de New South Wales en Australie et fut rendu publique, pour la première fois, après l'avoir annoncé à la 18^{ème} conférence sur le photovoltaïque IEEE PVSC (décembre 1985) [III.14].

Le PC1D est un logiciel qui résout les équations non linéaires de transport quasi unidimensionnel des électrons et des trous dans des dispositifs à semi-conducteur, notamment dans les dispositifs photovoltaïques à une dimension par l'utilisation de la méthode de éléments finis. Son succès est basé sur sa vitesse d'exécution, son interface utilisatrice et ses mises à jour continues. On peut simuler une structure photovoltaïque en introduisant ses paramètres (géométrie-dopages, paramètres électriques et optiques, etc...), en choisissant l'excitation et enfin en exécutant le programme pour l'obtention des résultats.

III-D.1 Fonctionnement du PC1D

La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la Figure III-1. Ce logiciel se compose de quatre parties. Les trois premières sont consacrées à la programmation où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation.

Le fonctionnement du PC1D nécessite plusieurs critères à respecter :

- 1- Le choix des programmes de valeurs des différents paramètres n'est pas aléatoire, elles doivent être réalisables par la technologie,
- 2- Pour des considérations numériques, les valeurs à introduire, doivent être comprises dans des intervalles bien déterminés,
- 3- Pour une convergence rapide, il est possible de minimiser au maximum la taille des éléments fini, et choisir un nombre adéquat des itérations,
- 4- Le bon choix des paramètres numériques,
- 5- Une initialisation convenable des différents paramètres de la simulation.

Ces critères sont nécessaires dans chaque simulation, mais ils ne sont pas suffisants.

III.D.2 Etapes à suivre pour simuler une cellule solaire avec PC1D

1-Téléchargez et décompressez le dossier « PC1D5 », PC1D est désormais disponible auprès de l'Université de NSW de l'Australie [III.15]

2. Ouvrez le dossier et double-cliquez sur « PC1D »

3. Vous devriez pouvoir voir l'interface du programme de simulation comme indiqué sur la figure III.1 Maintenant vous êtes dans la vue « paramètres ». Dans cette fenêtre, vous pouvez double-cliquer sur n'importe quelle ligne et une fenêtre apparaîtra pour vous permettre de

modifier les paramètres à utiliser.

4. Modifions maintenant quelques paramètres pour configurer une cellule solaire à base d'un matériau semi-conducteur.

Le PC1D contient un fichier help PC1D HLP [III.16] et quelques fichiers additionnels des paramètres physiques et quelques matériaux tels que le Silicium (Si), le Germanium (Ge), l'InP, Al₃Ga₇As et le GaAs. Il contient aussi les spectres solaires standards terrestres, spatiaux et diffus (AM0, AM1, AM1.5G et AM1.5D) (III.3)

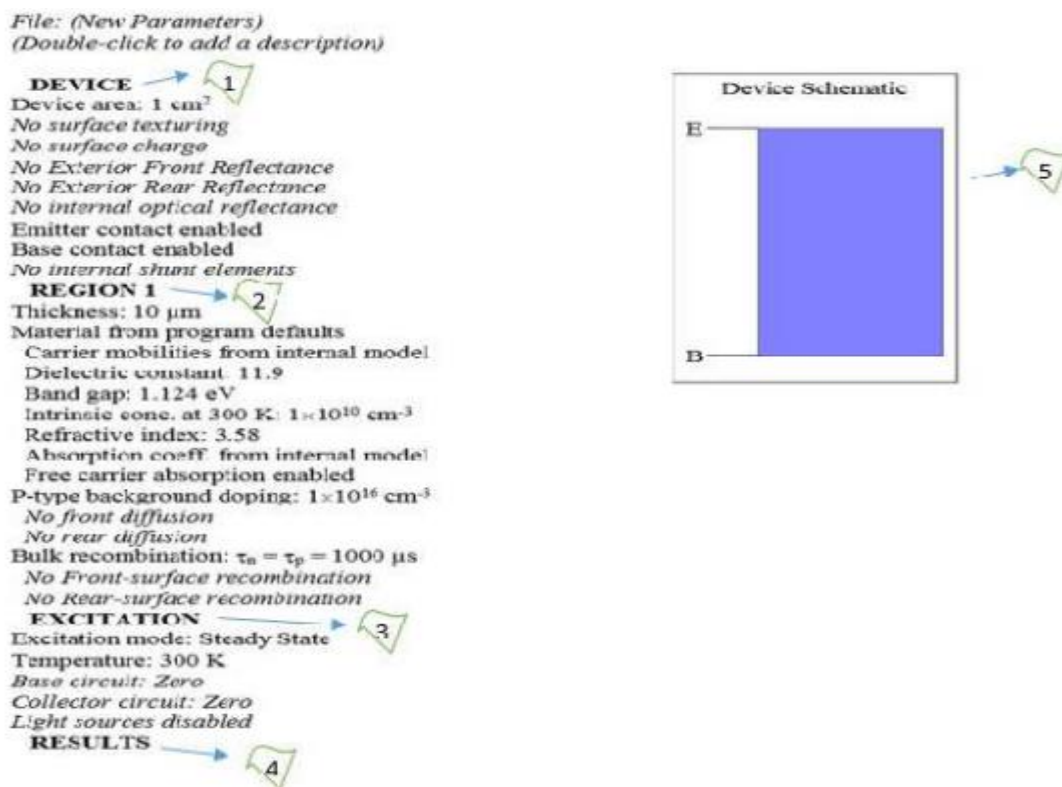


Figure III-1 : Fenêtre du logiciel PC1D (version 5.9)

Ce logiciel permet d'avoir un très bon aperçu de l'influence de différents paramètres sur le comportement de la cellule.

La fenêtre de ce logiciel, contient toutes les données nécessaires nous permet de bien simuler les cellules solaires. Beaucoup d'améliorations ont été apportées sur cette interface.

Cette dernière peut comprendre jusqu'à 5 couches empilées. Chaque couche est prise par le simulateur à travers les paramètres suivants :

III.D.2.1 Paramètres du dispositif (Device)

Les paramètres du dispositif comme indiqués dans la fenêtre PC1D (Figure III.1) sont les suivants :

- **Aire du dispositif** (Device) : la surface du dispositif est très importante car elle influe sur le photocourant d'une manière appréciable. On peut choisir par exemple une surface de 1cm^2 .
- **La texturisation** : les surfaces texturées utilisées dans toutes les structures étudiées sont composées de micro pyramides inversées de profondeur (depth) $3\mu\text{m}$ et d'angle facial $54,74^\circ$ (Figure III.2).

La texturisation est très importante, car elle permet de diminuer les pertes par réflexion du rayonnement incident. On peut texturer seulement la face avant, si l'autre face est considérée à l'obscurité.

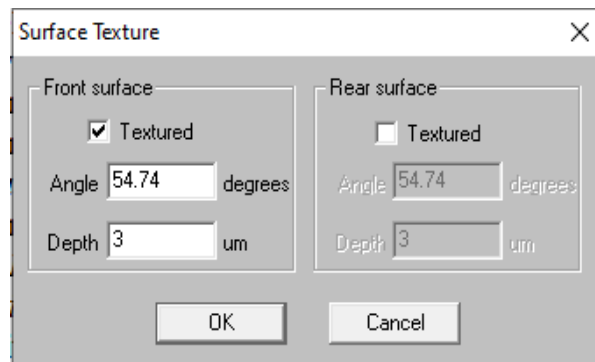


Figure III.2 : Fenêtre de la texturisation dans PC1D

- **Les couches antireflets** : elles sont généralement de la silice (SiO_2), elles peuvent être remplacées par d'autres matériaux qui sont transparents au spectre solaire et qui sont données dans le logiciel sous forme de fichiers (Fig. III.3).

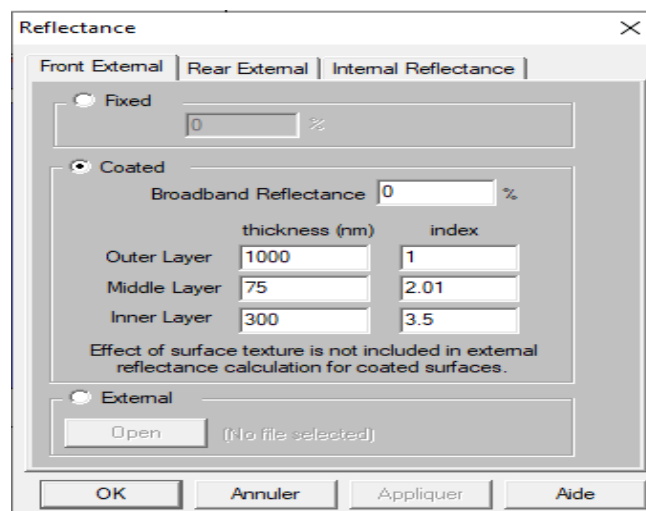


Figure III.3 : Fenêtre de la couche antireflet dans PC1D

La couche anti reflet est entre l'air et la couche du silicium (Emetteur n^+)

Dans cette fenêtre qui apparaît, cliquez sur « coated », et saisissez « 1000 » (nm) dans l'épaisseur de la couche externe avec un indice = 1 (indice de réfraction de l'air), puis saisissez les valeurs des deux facteurs de la couche anti réfléchissante caractérisée par une épaisseur de 75nm et un indice de réfraction égal à 2.01 et pour la troisième couche de l'émetteur à base du silicium, on porte 0.3 μ m pour l'épaisseur et 3.5 de son indice de réfraction indiqué dans la figure III.3

- **La densité de charge surfacique** : les deux faces généralement sont considérées comme neutres, du fait qu'il n'y a pratiquement pas de charges aux interfaces, c.à.d. qu'il n'y a pas de barrière de potentielle aux surfaces (pour notre cas il y a des charges).
 - **Réfectance optique interne** : elle est négligée dans notre simulation, nous considérons que les surfaces qui sont spéculaires et non diffuses.
 - **La réflectance optique externe** : elle est négligée dans notre simulation, nous considérons que les surfaces qui sont spéculaires et non diffuses.
 - Par défaut, l'émetteur et la base sont connectés au circuit, tandis que le collecteur est déconnecté.
 - **Les résistances séries internes R_s** : elles peuvent être introduites en série vers l'utilisation V_p et I_p . La diminution des valeurs de R_s conduit à un rendement efficace.
 - **Les résistances shunt internes R_{sh}** : elles peuvent être introduites en parallèle à la diode. L'augmentation de ses valeurs amène à un rendement élevé.
- Chacune de ces résistances peut être conducteur, diode ou condensateur.

III.C.2.2 Paramètres des régions

On peut introduire plusieurs régions selon la forme et les propriétés de la structure. Ces paramètres de région sont les suivants :

- **L'épaisseur du matériau** : dans cette partie on introduit l'épaisseur des matériaux utilisés dans chaque région (émetteur et base). L'épaisseur de l'émetteur est relativement mince par rapport à la base. Dans le cas du silicium en couches minces, elle varie sur un intervalle compris entre 0,1 μ m et 2,5 μ m pour la couche de l'émetteur et de 5 μ m à 50 μ m pour la base.
- **Le matériau utilisé** : les paramètres qui le décrivent sont stockés dans des fichiers d'extension (*.mat). Ils sont fournis avec le logiciel pour les matériaux les plus utilisés comme le silicium, le germanium et l'arséniure de gallium. Les paramètres placés dans ce fichier sont :

- La mobilité,
- La constante diélectrique (permittivité électrique),
- L'énergie du gap (eV),
- L'indice de réfraction,
- La concentration intrinsèque (cm^{-3}),
- Le coefficient d'absorption optique α (cm^{-1}) : le modèle utilisé est celui de Rajkanan et al 1979.
- L'absorption des porteurs libres : l'équation décrivant l'absorption des porteurs dans le cas du Silicium cristallin est donnée par [III.17, III.18] :

$$\alpha = (2,6 \cdot 10^{-27} \cdot n \cdot \lambda^3) + (2,7 \cdot 10^{-24} \cdot p \cdot \lambda^2)$$

avec n : concentration en électrons (cm^{-3}), p : concentration en trous (cm^{-3}) et λ longueur d'onde du rayonnement en nanomètres.

- Type et la concentration du dopage : de type n ou p, ce logiciel présenté quatre profils de dopages : le profil uniforme, le profil exponentiel, le profil gaussien et le profil erfc.
- Durées de vie des porteurs,
- Les recombinaisons en volume : le modèle utilisé est basé sur la statistique de Read Shockley-Hall décrivant les recombinaisons par pièges, situées dans la bande de valence.
- Vitesses de recombinaison face avant et arrière.

III.D.2.3 Paramètres d'excitation

Le logiciel contient deux fichiers intégrés :

- le fichier « One-Sun.exc » (intensité globale de tout le spectre d'un seul soleil) permet de simuler différentes caractéristiques (courant/tension-puissance/tension, etc...),
- le fichier « Scan-qe.exc » (intensité de chaque longueur du spectre) pour la simulation de la réponse spectrale,
- Mode d'excitation : il y a trois modes d'excitation (en équilibre, stationnaire et transitoire), Pour une bonne simulation numérique, le mode transitoire est recommandé.
- Température : Dans la plupart des cas on choisit la température ambiante, $T=25^\circ\text{C}$.
- Circuit (résistance, tension),
- Il y a deux sources de Thevenin identiques, l'une pour la base et l'autre pour le collecteur.
- Eclairage (intensité, fichier d'air masse) : Seulement la face avant est éclairée (coté n), par un flux lumineux d'une intensité de $0,1 \text{ W/cm}^2$. Pour avoir la réponse spectrale, le logiciel fait un balayage sur l'intervalle de longueurs d'onde compris entre [300, 1200] nm. Pour avoir la caractéristique, il utilise directement le fichier d'aire masse « am 15g.spc ».

La seconde source peut être désactivée, dans le cas où la face arrière n'est pas éclairée.

Dans notre étude et après introduire toutes les valeurs des différents paramètres de la cellule solaire dans PC1D, la structure de cette cellule est présentée dans l'interface en ci-dessous.

DEVICE
 Device area: 1 cm²
 Front surface texture depth: 3 μm
 Front surface charge: 1×10¹² cm⁻²
Rear surface neutral
 Front surface optically coated
No Exterior Rear Reflectance
No internal optical reflectance
 Emitter contact enabled
 Base contact: 0.5 Ω
 Internal conductor: 1×10⁻⁵ S

REGION 1
 Thickness: 56 μm
 Material from d:\2021\toshibq\desktop\pc1d5\si.mat
 Carrier mobilities from internal model
 Dielectric constant: 11.9
 Band gap: 1.124 eV
 Intrinsic conc. at 300 K: 1×10¹⁰ cm⁻³
 Refractive index from si.inr
 Absorption coeff. from si300.abs
 Free carrier absorption enabled
 P-type background doping: 6×10¹⁶ cm⁻³
 1st front diff.: N-type, 2.584×10²⁰ cm⁻³ peak
No 2nd front diffusion
No rear diffusion
 Bulk recombination: τ_n = τ_p = 1.569 μs
 Front-surface recom.: S model, S_n = S_p = 1×10⁵ cm/s
No Rear-surface recombination

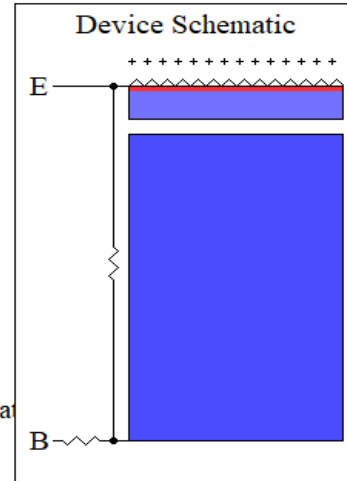


Figure III.4 : Fenêtre de la cellule simulée par PC1D

III.D.2.4 Paramètres des résultats

Après l'introduction de toutes les données nécessaires au matériau étudié, ainsi que la configuration de la cellule solaire, le simulateur permet d'obtenir des résultats.

Les résultats visualisés tout à fait en bas de la page lorsqu'on utilise le fichier «**One-Sun.exc**» comme excitation, sont :

- La valeur du courant de court-circuit,
- La valeur de la tension en circuit ouvert,
- La valeur de la puissance maximale.

Ceux obtenus avec le fichier «**Scan-qe.exc** » sont :

- La valeur de courant de court-circuit,
- La valeur de la puissance maximale.

Le programme PC1D fournit des résultats, sous forme d'affichages graphiques montrant des valeurs physiquement significatives tel que :

Courbes courant-tension I-V : En polarisation directe de l'échantillon, les courbes I-V permettent de déterminer le courant de saturation le facteur de qualité et la résistance en série.

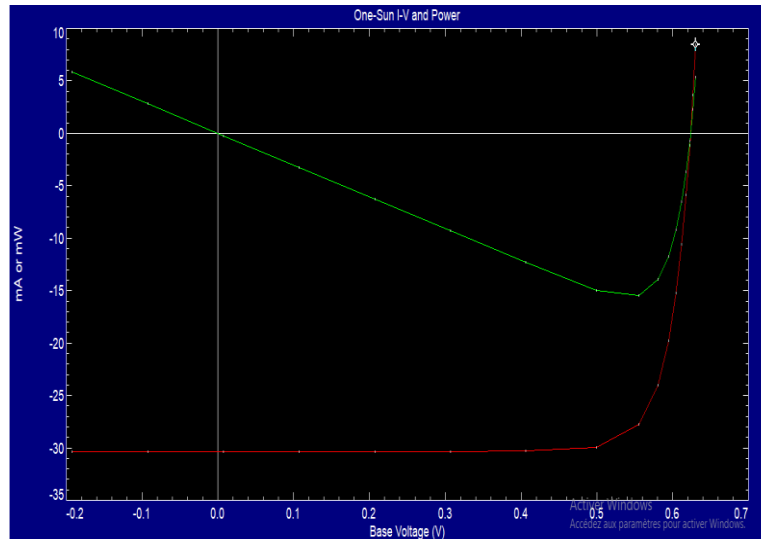


Figure III.5 : Caractéristique I-V par PC1D

Le rendement quantique interne IQE(λ) :

Le rendement quantique interne représente le rapport entre le nombre de porteurs collectés et le nombre de photons traversant la surface du dispositif. Ce rendement est calculé numériquement par le logiciel PC1D en fonction de la longueur d'onde λ (Figure III.4).

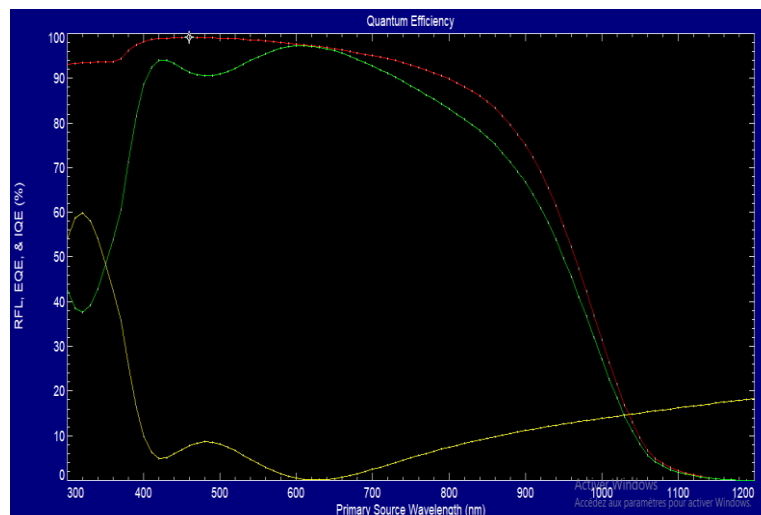


Figure III.6: Rendement quantique d'une cellule solaire par PC1D

Références Bibliographiques

- III.1** **Frédéric Poupaud**, Canum 2000 : Actes du 32e Congrès national d'analyse numérique, A. Blouza, I. Danaila, P. Joly, S.M. Kaber, B. Lucquin, F. Murat & M. Postel, "Modélisation du transport des charges électriques dans les semi-conducteurs" Editeurs ESAIM : Proceedings, Vol 11, 2002 141-152
- III.2** **Abdoulwahab ADAINE** "Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN ", Thèse de Doctorat de l'université de Lorraine – 2018
- III.3** **Abderrezek MAHFOUD** " Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement" Thèse de Doctorat de l'université de Setif 1 – 2015
- III.4** **J. KreMarko Topie**, "Optical modeling and simulation of thin-film photovoltaic Devices", CRC press Taylor & Francis Group, 2013.
- III.5** **Elliot J. Chicofsky, James H. Cross II**, "Reverse Engineering and Design Recovery: A Taxonomy", IEEE Software, Vol. 7, pp. 13-17. January 1990.
- III.6** **Joachim Piprek**, "Semi-conductor optoelectronic Devices: Introduction to Physics and Simulation", Academic Press, October 2013, Google-Books-ID: qqVuFzIkDp0C.23,46,47,48
- III.7** **Jiann S. Yuan and Juin Jei Liou**, "Semiconductor device physics simulation", Springer Science & Business Media, 2013. 46,47,48
- III.8** **A. Goetzberger**, J. Knobloch, B. Vob, "Crystalline silicon Solar Cells", John Wiley & Sons 1998, ISBN 0 47 1 97 144 8.
- III.9** **Francis Lévy**, "Physique et technologie des semiconducteurs", PPUP presses politechniques, 1995, Google-Books-ID : ha3IfdCu2s4C. 46, 110
- III.10** **H. Mathieu**, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques" 4^{ème} édition, Masson, Paris 1998.
- III.11** **M. Orgeret**, "les piles solaires le composant et ses applications", Masson, Paris, 1985, ISBN : 2-225-80482-6
- III.12** **Eddy Saintaimé**, "Étude et modélisation des substrats ultra-minces de silicium et de leur application au photovoltaïque" Thèse de Doctorat de l'université de D'Orléans – 2020
- III.13** **Mijoe Joseph**. "Fundamentals of Semiconductor Physics". Anchor Academic Publishing (aap_verlag), May 2015. Google-Books-ID: aUg8CQAAQBAJ. 47
- III.14** **Clugston DA, Basore PA**. PC1D Version 5: 32 BIT Solar cell modeling on Personal Computers, Australia, 1997.

- III.15** UNSW, School of Photovoltaic Renewable Energy and Engineering. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.unsw.edu.au/engineering/our-schools/photovoltaic-and-renewable-energy-engineering>. Consulté le : 20.05.2023
- III.16** . **PC1D Help Index**, "PC1D User Manuel version 5.9 pdf", https://www.pveducation.org/sites/default/files/PVCDROM/Characterisation/PDF/PC1D5_9.pdf
- III.17** . **Ioannou D.E. and Dimitriadis C.A., A SEM –EBIC "minority-carrier diffusion-length measurement technique"**, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-29, n°3, 1982, pp. 445-450.
- III.18** **Yassine Sayad**, "Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière matière" Thèse de doctorat de l'INSA-Lyon, 2009.

Chapitre IV

***Simulation d'une cellule solaire
photovoltaïque à base de silicium
cristallin en couche mince déposé sur
un substrat silicium monocristallin***

IV.A Introduction du chapitre IV

Dans le domaine photovoltaïque, la recherche s'oriente sur l'augmentation du rendement tout en diminuant les coûts de production. Il est donc clair que la réduction du coût du module passe par la réduction du coût de l'élaboration des matériaux de base. Dans un but d'abaisser les coûts de la matière, la filière des couches minces en silicium cristallin dans l'industrie photovoltaïque privilégie la diminution de l'épaisseur de la couche active des cellules solaires. En effet, cette diminution entraîne une perte sur la conversion photovoltaïque et par suite une dégradation sur le rendement de la cellule solaire.

Pour réduire la consommation en Si à condition de développer des structures visant à optimiser le confinement électrique et optique dans la couche active, il est nécessaire d'introduire une couche antireflet et une texturisation sur la face avant de la cellule photovoltaïque.

La plupart des cellules solaires sont fabriquées par un dépôt direct du silicium cristallin en couches minces suivant un procédé de croissance épitaxial sur un substrat bas-coût, avec des épaisseurs assez importantes (**dix fois plus épais que la couche active**) car il n'y a pas de réflecteur en face arrière. Ce procédé représente une perspective intéressante pour le développement des cellules solaire car il est compatible avec les équipements employés dans l'industrie photovoltaïque est donne des rendements compétitifs.

C'est dans ce champ que réside les travaux à réaliser dans ce chapitre à travers des simulations seront effectuées à l'aide du logiciel PC1D. La structure de la cellule simulée et de type $n^+/p/p^+$ à base de silicium cristallin en couches minces d'une épaisseur de $56\mu\text{m}$ déposé sur un substrat de silicium monocristallin d'une épaisseur de $500\mu\text{m}$. Le but de cette étude est de voir s'il est possible de réduire encore l'épaisseur de ce matériau sans aucune influence sur les performances de cette cellule photovoltaïque.

IV.B Structure et outils de simulation

L'un des moyens d'abaisser le cout de fabrication des modules photovoltaïques est la réduction de l'épaisseur de silicium utilisé pour la fabrication de cellules solaires. L'idée de base est de réaliser une couche de Silicium de très haute qualité structurale et électronique de faible épaisseurs (10-50 μm) au lieu de 200 μm par un procédé de croissance épitaxiale (figure IV.1) sur un substrat bas-coût avec des épaisseurs assez importantes (**dix fois plus épais que la couche active**) car il n'y a pas de réflecteur en face arrière.

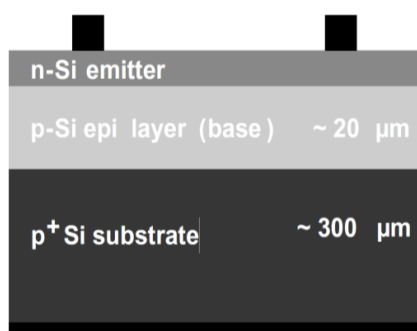


Figure IV.1: structure d'une cellule solaire à base de silicium cristallin en couches minces sur substrat silicium

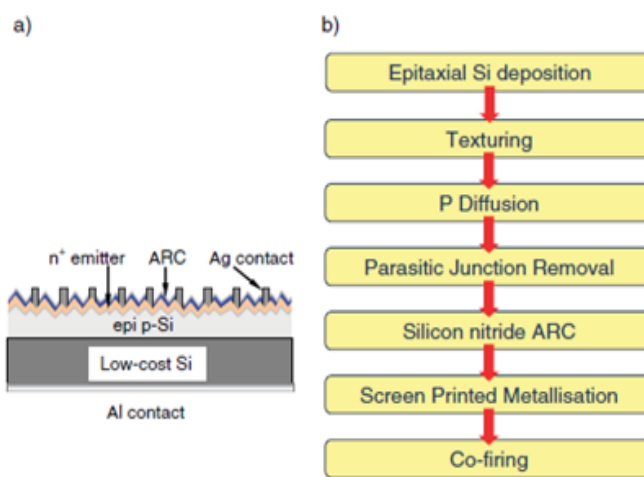


Figure IV.2: (a) coupe transversale schématique de la structure de cellule solaire épitaxiale. (b) processus industriels des cellules solaires épitaxiales

Ce concept est le plus simple et compatible avec le procédé industriel standard utilisé pour la fabrication des cellules solaires en Si cristallin. Les substrats qui répondent à ces critères sont des wafers de Si dopés, rejets de la microélectronique qui ne peuvent pas être directement utilisés pour la fabrication de cellules solaires.

Certains travaux ont montré qu'il est a été possible d'obtenir expérimentalement un rendement de l'ordre de 17.6 % sur une cellule solaire de 4 cm^2 et 37 μm déposée sur un substrat silicium monocristallin avec une surface texturisée [IV.1], un rendement de 15.1% sur une cellule de 92 cm^2 et 19 μm sur monocristallin et 14% sur multicristallin [IV.2].

Chapitre IV | Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de silicium cristallin en couche mince déposé sur un substrat silicium monocristallin

Dans cette étude, nous avons simulé et optimisé les différents paramètres physiques et technologiques d'une cellule de la même architecture que le dispositif cité, schématisée sur la figure 4 a pour but trouver une nouvelle structure de cellule solaire par là qu'elle on garde les mêmes caractéristiques tout en diminuant l'épaisseur de cette cellule. Elle est de type $n^+/p/p^+$ à base de silicium cristallin en couches minces déposé sur un substrat silicium monocristallin fortement dopé avec émetteur diffusé par phosphore. Ainsi des charges positives de surfaces (10^{12} cm^{-2}), aussi une faible résistance série base R_s de $0.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ a été introduite et une résistance parallèle infinie R_p a été appliquée pour négliger les courants de fuites. Le substrat joue le rôle de BSF et n'influence pas les résultats photovoltaïques.

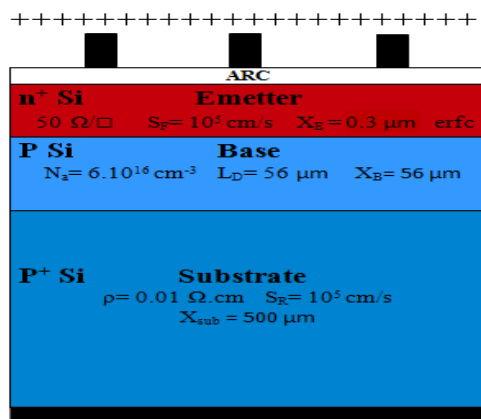


Figure IV.3 : Structure de la cellule solaire sans texturisation avec émetteur réalisé par diffusion [II.50]

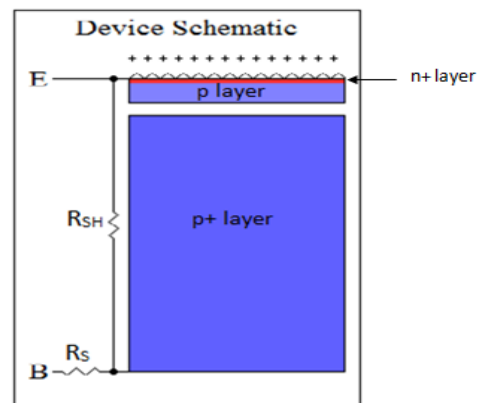


Figure IV.4: Structure de la cellule simulée à base du silicium cristallin sous PC1D

La simulation de cette cellule photovoltaïque en l'absence de texturation de la surface (figure IV.3) donne les résultats suivants : $J_{cc} = 30 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, $V_{co} = 623 \text{ mV}$, $\eta = 15.2\%$

La simulation a été effectuée avec le simulateur PC1D [III.1], ce logiciel permet d'avoir un très bon aperçu de l'influence de différents paramètres sur le comportement de la cellule. Bien que la structure de simulation de la cellule soit représentée en une seule dimension sur la figure IV.4. La texturation de la face avant de la cellule solaire étudiée est envisageable.

Les différents paramètres utilisés sont indiqués sur le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Paramètres physiques et technologiques utilisés par le simulateur PC1D [IV.3]

	Parameters	Valeurs/unites
Device	Device area Front surface texture depth Front surface charge Front surface optically coated (front external): Thickness /index Emitter contact Base contact Internal conductor	1 cm ² 3μm 10 ¹² cm ⁻² 75nm/2.01 Enabled 0.5 Ω 10 ⁻⁵ S
Region 1	Thickness Material Carrier mobilities Dielectric constant Band gap Intrinsic conc. at 300 K Absorption coeff. Free carrier P type background doping 1st front diff. n-type – Sheet Resistance Diffusion length Front surface recombination	56 μm Silicon (Si) Internal model 11.9 1.124 eV 1E10 cm ⁻³ Silicon Enabled 6E16 cm ⁻³ 50 Ω/□ 56 μm 1E5 cm/s
Region 2	Thickness Material Resistivity substrate Rear surface recombination	500 μm Silicon (Si) 0.01 Ω.cm 1E5 cm/s
Excitation	Excitation mode Temperature Base circuit sweep Collector circuit Primary light source Constant intensity Spectrum	Transient, 16 time steps 25 °C -0.8 to 0.8 V Zero Enabled 0.1 W/cm ² AM 1.5

IV.C Résultats et discussions :

Pour étudier et simuler l'influence des différents paramètres sur les caractéristiques de la cellule solaire : le courant de court-circuit, la tension du circuit ouvert et le rendement et après la définition de la cellule de référence, la simulation s'est faite en variant un seul paramètre et en gardant fixes les autres paramètres. Pour l'étude du paramètre suivant, on a fixé le paramètre précédent à sa valeur optimale et en gardant les suivants constants et ainsi de suite. Les paramètres que nous avons étudiés sont :

Chapitre IV | Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de silicium cristallin en couche mince déposé sur un substrat silicium monocristallin

L'épaisseur, la longueur de diffusion et le dopage de la base, l'épaisseur et le dopage de l'émetteur, l'épaisseur et la résistivité du substrat, la vitesse de recombinaison de la face avant et arrière de la cellule solaire et enfin la résistance série.

Les résultats superficiels obtenus nous ont permis de tirer diverses conclusions indiquées ci-dessous :

IV.C.1 Influence des paramètres de la base sur le courant de court-circuit I_{cc} , la tension du circuit ouvert V_{co} et le rendement η :

IV.C.1.1 Effet de l'épaisseur de la base :

Pour faire cette étude on va fixer l'ensemble des paramètres de la cellule et varier celle de l'épaisseur de la base. Les résultats obtenus sont les suivants :

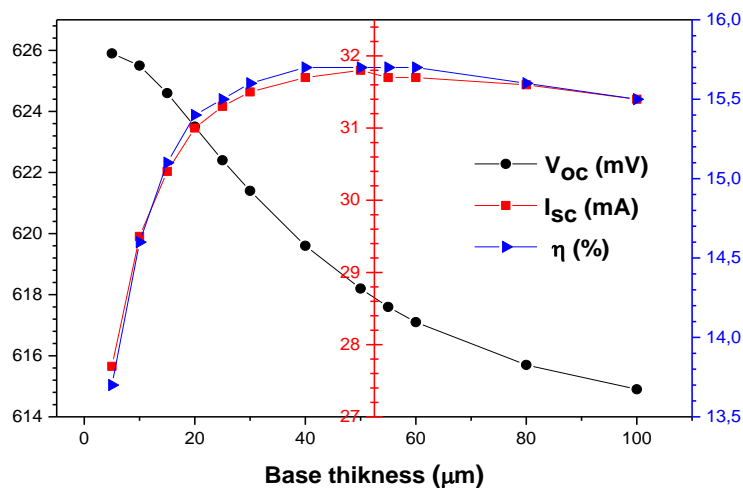


Figure IV.5 : Évolution du court-circuit, de la tension de circuit ouvert et du rendement, en fonction de la variation de l'épaisseur de la base

Dans la figure IV.5 Nous avons reporté l'influence de l'épaisseur de la cellule sur le rendement. On constate que l'épaisseur de la base est un facteur très important pour l'absorption des photons. D'après les résultats obtenus, on remarque que pour les petites épaisseurs de 5 μm jusqu'à 30 μm le courant de court-circuit I_{cc} et le rendement augmentent, lorsque l'épaisseur varie entre 30 et 60 μm les valeurs du rendement et I_{cc} sont presque constants, au-delà de 60 μm , on remarque qu'il y a une diminution du rendement et aussi le courant de court-circuit. L'augmentation de l'épaisseur réduit le nombre de photons qui peuvent être absorbés par le matériau de base.

Chapitre IV | Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de silicium cristallin en couche mince déposé sur un substrat silicium monocristallin

En ce qui concerne la tension de circuit ouvert V_{oc} , on remarque qu'il y a une décroissance avec l'augmentation de l'épaisseur.

Une épaisseur de la couche active de $30\mu\text{m}$ est suffisante pour exploiter une large gamme du spectre solaire. Dans cette approche nous avons choisi de nous focaliser sur une longueur de diffusion qui vaut $30\mu\text{m}$ cellules d'épaisseur de $30\mu\text{m}$.

IV.C.1.2 Effet de la longueur de diffusion L_D :

Après avoir choisis l'épaisseur de la cellule simulée qui offre le rendement de conversion photovoltaïque convenable, on essaye d'optimiser ceux de la longueur de diffusion. Ce paramètre est égal à l'épaisseur de la cellule au niveau de la couche active ($L_D=30\mu\text{m}$). C'est une valeur envisageable pour les couches épitaxiales.

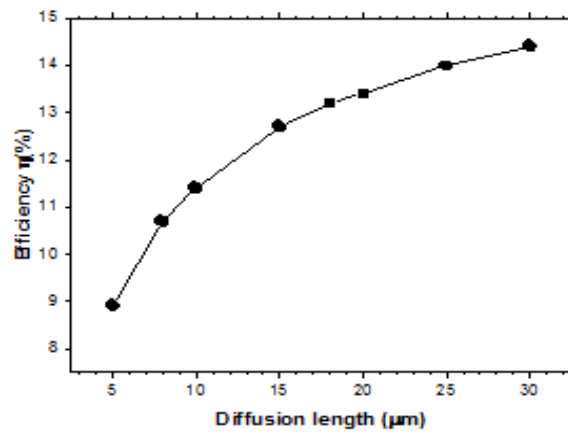


Figure IV.6 : Evolution du rendement en fonction de la longueur de diffusion

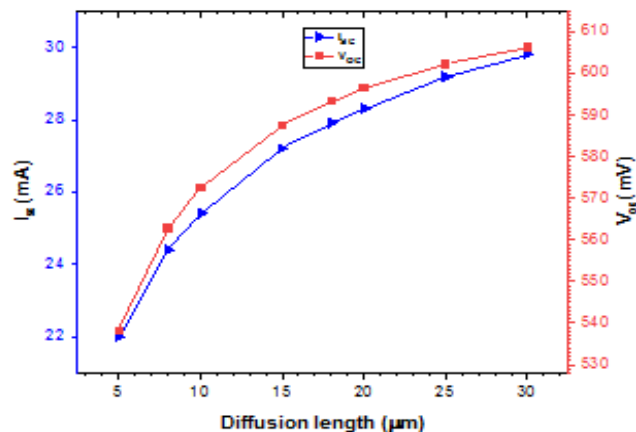


Figure IV.7 : Evolution du court-circuit et la tension de circuit ouvert en fonction de la longueur de diffusion

La longueur de diffusion a une grande influence sur les performances globales de la cellule. On remarque que dans l'intervalle $[5,30] \mu\text{m}$, le rendement en fonction des porteurs minoritaires arrive à son maximum 14.4%. Cette augmentation du rendement est due à l'élimination des recombinaisons en volume.

IV.C.1.3 Effet de la concentration de la base

On remarque que dans l'intervalle $[10^{15}, 8.10^{16}] \text{cm}^{-3}$ le rendement augmente en fonction du dopage de la base (figure IV.8) jusqu'à qu'il atteigne son maximum 14,4%. Au-delà de 8.10^{16}cm^{-3} il se diminue, cela, est due à un effet considérable du fort dopage (excès des recombinaisons).

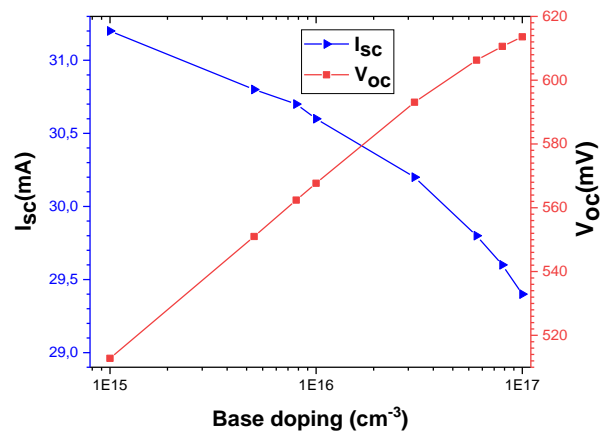


Figure IV.8 : Evolution du court-circuit et la tension de circuit ouvert en fonction de la concentration de la base

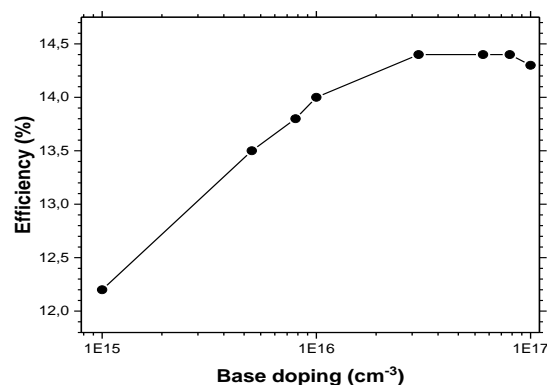


Figure IV.9 : Evolution du rendement en fonction de la concentration de la base

Chapitre IV | Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de silicium cristallin en couche mince déposé sur un substrat silicium monocristallin

La tension du circuit ouvert prend la même allure que le rendement, elle augmente sur tout l'intervalle contrairement au court-circuit qui diminue.

Valeurs des paramètres de la base pour avoir un rendement optimal

- ◆ Epaisseur de la base X_B 30 μm
- ◆ Longueur de diffusion L_D 30 μm
- ◆ Dopage de la base $8.10^{16} \text{ cm}^{-3}$

IV.C.2 Influence des paramètres de l'émetteur sur le courant de court-circuit I_{CC} , la tension de circuit ouvert V_{CO} et le rendement η

Après avoir optimisé l'épaisseur de la cellule offrant le rendement de conversion photovoltaïque optimal, on essaye d'optimiser ceux de l'émetteur, l'épaisseur et le dopage.

Les effets de ces paramètres sont observés dans les résultats suivants :

IV.C.2.1 Effet de l'épaisseur

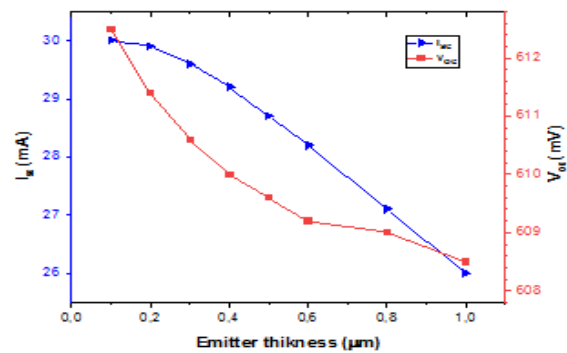


Figure IV.10 : Evolution du court-circuit et la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de l'émetteur

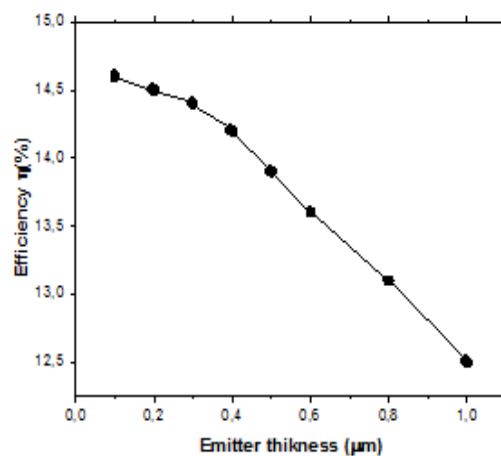


Figure IV.11 : Evolution du rendement en fonction de l'épaisseur de l'émetteur

Dans les figures IV.10 et IV.11, on remarque que le rendement et le courant de court-circuit en fonction de la profondeur de jonction est caractérisé par sa diminution dans le sens positif de l'épaisseur de l'émetteur à cause de l'augmentation de la recombinaison avant d'arriver à la zone de charge d'espace. Une épaisseur de $X_j = 0,1 \mu\text{m}$ permet aux porteurs générés près de la surface et qui n'avait pas une longueur de diffusion suffisante d'être collecter à la surface.

IV.C.2.2 Effet du profil d'émetteur dopage

D'après les résultats trouvés (figure IV.12), nous remarquons que dans l'intervalle $[10^{19}, 5.10^{20}] \text{ cm}^{-3}$ le rendement est constant, il prend sa valeur de 14,6%. Après, il commence à diminuer avec la croissance du dopage, ceci est dû à l'augmentation de la recombinaison du fort dopage.

L'élévation du dopage de l'émetteur $[10^{19}, 1.10^{20}] \text{ cm}^{-3}$ entraîne une augmentation de la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit. Au-delà il dégrade complètement les caractéristiques de la cellule solaire.

Nous constatons que le dopage de l'émetteur de $N_D = 1.10^{20} \text{ cm}^{-3}$ présente les meilleures performances ($\eta = 14,6\%$, $I_{CC} = 30.1 \text{ mA}$ et $V_{co} = 611,4 \text{ mV}$)

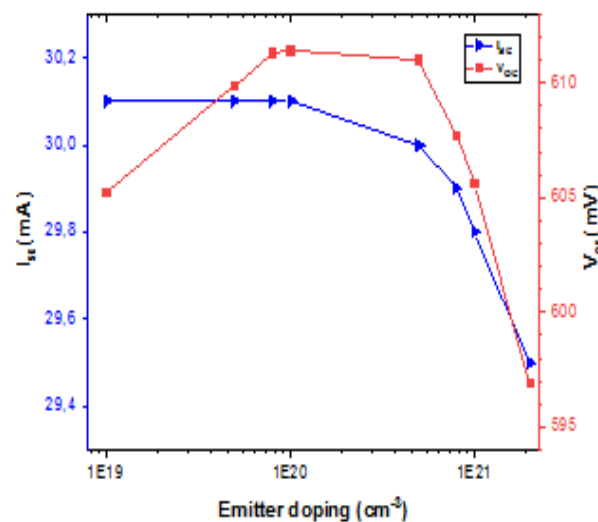


Figure IV.12 : Evolution du court-circuit et la tension de Circuit-ouvert en fonction du dopage de l'émetteur

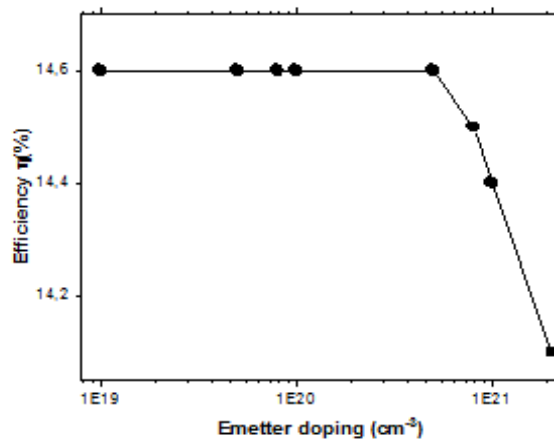


Figure IV.13 : Evolution du rendement en fonction du dopage de l'émetteur

IV.C.3 Influence du substrat

IV.C.3.1 Effet de la résistivité du substrat

Les figures (IV.14, IV.15) représentent l'évolution du courant de court-circuit I_{cc} , la tension du circuit ouvert V_{co} et du rendement de conversion η en fonction de la résistivité du substrat. On remarque que des faibles valeurs de la résistivité de substrat dans l'intervalle [0.01, 0.02] $\Omega.cm$ entraînent une petite augmentation sur le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert et par suite le rendement de conversion qui s'explique par l'augmentation du dopage de substrat. Dans l'intervalle [0.02, 0.1] $\Omega.cm$ ces paramètres sont presque constants. Lorsque la résistivité passe $R_{sub} = 0.1 \Omega.cm$, c'est la diminution conjointe de la tension du circuit ouvert et le courant de court-circuit qui entraîne une diminution du rendement de la conversion.

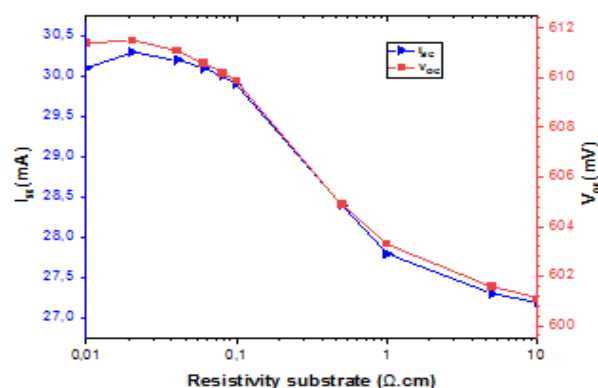


Figure IV.14 : Evolution du court-circuit et la tension de circuit ouvert en fonction de la résistivité du substrat

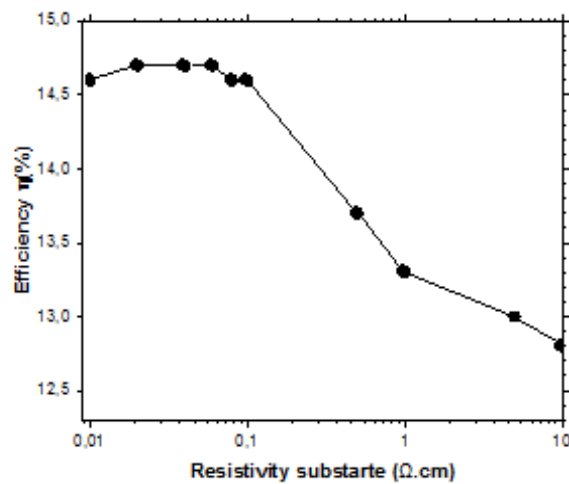


Figure IV.15 : Evolution du rendement en fonction de la résistivité du substrat

IV.C.3.2 Effet de l'épaisseur du substrat

On constate que le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert et le rendement ne sont pas affectés par la variation de l'épaisseur du substrat. On a un bon rendement photovoltaïque de 14,8% pour une résistivité du substrat de 0,02Ωcm et une épaisseur choisie de 300μm (le substrat étant approximativement dix fois plus épais que la couche épitaxiée).

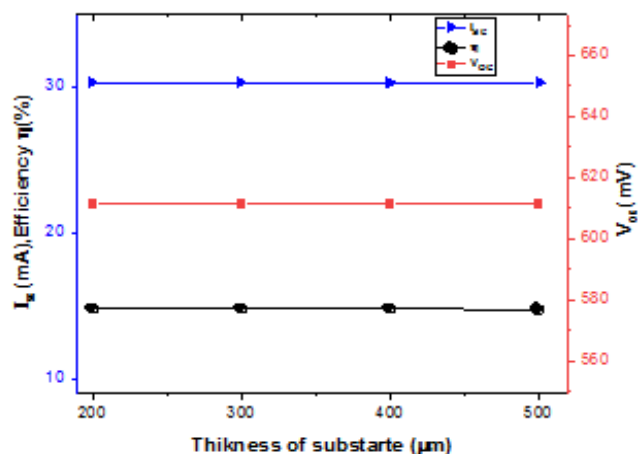


Figure IV.16 : Evolution du court-circuit, de la tension du circuit ouvert et du rendement, en fonction de la variation de l'épaisseur du substrat

IV.C.4 Influence de la vitesse de recombinaison en face avant et arrière

Dans les figures (IV.17, IV.18) nous avons présenté la variation du courant de court-circuit, la tension du circuit ouvert et le rendement en fonction des vitesses de la recombinaison en face avant et arrière. D'après les résultats obtenus, On constate que la vitesse de recombinaison en face avant est un paramètre très influant du rendement de la cellule solaire. Dans l'intervalle [100, 1000] cm/s les paramètres sont constants ($\eta = 15\%$, $I_{cc} = 30.4$ mA et $V_{co} = 622,8$ mV), lorsque les vitesses de recombinaison dépassent les valeurs de 1000 cm/s il y aura une dégradation complète des performances de la cellule solaire.

En ce qui concerne la variation de la vitesse de recombinaison en face arrière (Fig. IV.19), on remarque qu'il n'y a pas d'influence sur les caractéristiques de la cellule.

On constate qu'on a un bon rendement photovoltaïque de 15 % pour une vitesse de recombinaison sur les deux surfaces avant et arrière de 100 cm/s.

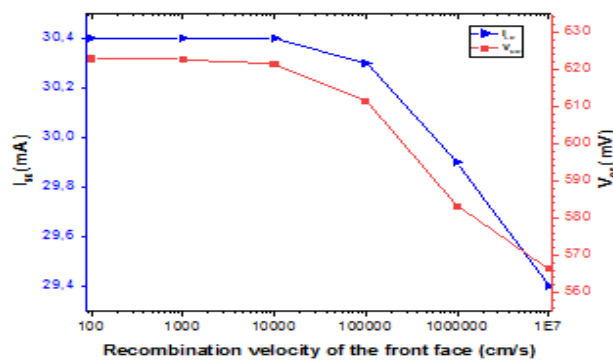


Figure IV.17 : Evolution du court-circuit et la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison de la face avant

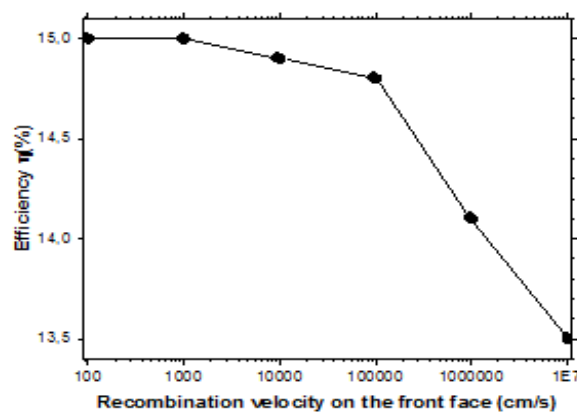


Figure IV.18 : Evolution du rendement en fonction de la vitesse de recombinaison de la face avant

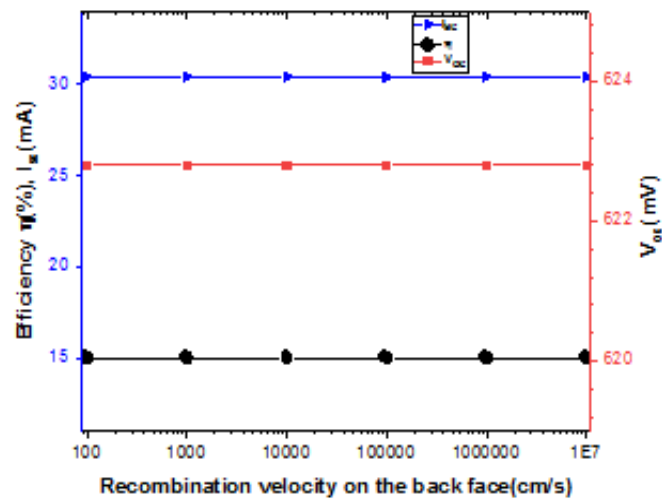


Figure IV.19 : Evolution du rendement, court-circuit et la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison de la face arrière

IV.C.5 Résistance série

D'après les graphes (IV.20, IV.21), et pour avoir les caractéristiques souhaitées notamment le rendement, une application d'une résistance série de 0.04Ω conduit à un rendement de 15.2%. La variation de la résistance série sur l'intervalle $[5, 0.01] \Omega$ entraîne une petite diminution de la tension de circuit ouvert du 623.5mV jusqu'à 622.6mV, ce qui est en accord avec la théorie.

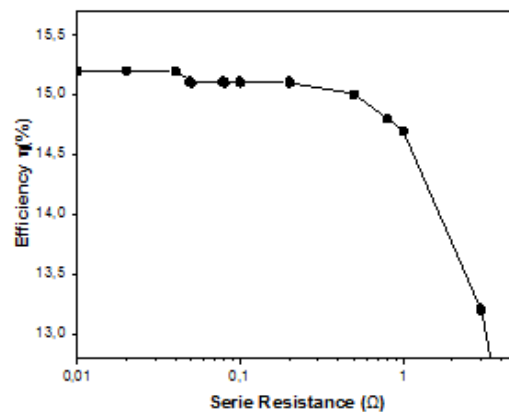


Figure IV.20 : Evolution du rendement en fonction de la résistance série

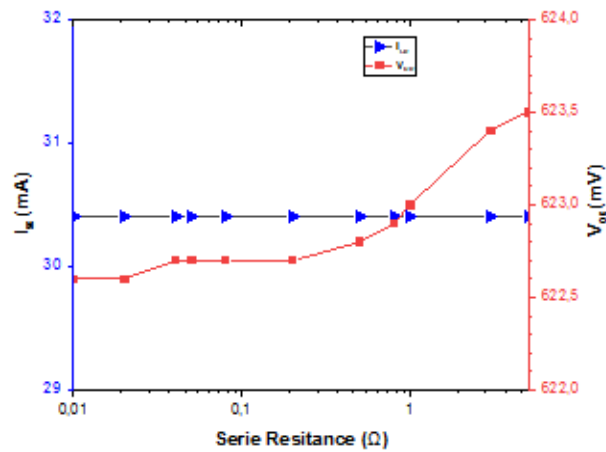


Figure IV.21 : Evolution du court-circuit et la tension de circuit ouvert en fonction de la résistance série

IV.C.6 Caractéristiques I(V)

La Figure IV.22 représente une caractéristique courant-tension sous éclairage de la cellule Solaire simulée, avec une épaisseur de la couche active de 30 μ m. Cette cellule atteint 15,2 % de rendement. On remarque que la densité de courant de court-circuit est déjà assez élevée de 30,4 mA/cm². Sa tension de circuit ouvert atteint la valeur de 622.7 mV.

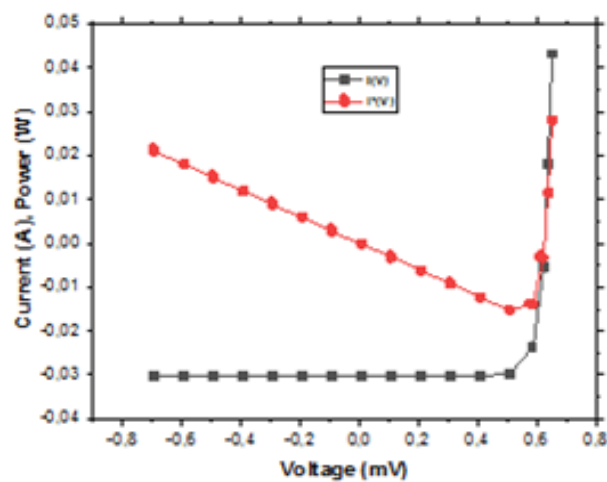


Figure IV.22 : Caractéristique courant-tension obtenue par la simulation de la cellule solaire

Chapitre IV | Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de silicium cristallin en couche mince déposé sur un substrat silicium monocristallin

Après la simulation et l'optimisation, les résultats obtenus montrent que la nouvelle structure de la cellule solaire est indiquée au tableau suivant :

Tableau IV.2 : Paramètres de la cellule solaire après simulation et optimisation

Paramètres	Valeurs/unités	Résultats
Device area	1 cm ²	I_{sc} = 30.4 mA V_{oc} = 627 mV P_{max} = 0.0152 W η = 15,2% F. F = 80.29%
Front surface texture depth	3μm	
Front surface optically coated (front external)	75nm/2.01	
Emitter contact	Entable	
Base contact	0.5 Ω	
Internal conductor	10 ⁻⁵ S	
Thickness- Based	30 μm	
Material	Silicon (Si)	
P type background doping	8E ¹⁶ cm ⁻³	
1st front diff. n-type – N _D	10 ²⁰ cm ⁻³	
Thikness - Emitter	0.1 μm	
Diffusion length	30 μm	
Front surface recombination	100 cm/s	
Thickness Material	300 μm	
Resistivity substrate	0.02 Ω.cm	
Rear surface recombination	100 cm/s	
Serie Resistance	0.04 Ω	
Rp	∞	

Tableau IV.3 : Vue d'ensemble sur les rendements atteints à partir de l'approche de croissance de Si par épitaxie sur substrat bas coût.

Substrat	Procédé	Air [cm ²]	d _{base} [μm]	V _{co} [mV]	J _{sc} [mA/m ²]	F.F [%]	η [%]	Références
Cz-Wafers	CVD	4	37	660.8	32.5	82.2	17.6	[IV.1]
Si monocristallin Cz	CVD	92	19	645	29.8	78.2	15.1	[IV.2]
Si multi-cristallin	CVD	92	28	626	29.4	76.3	14	[IV.2]
Si monocristallin	Epitaxial layer	4	56	623	30	81.32	15.2	[IV.3]
p ⁺ Si	Epitaxial-CVD emitters	70	30	630	32	80	16.2	[IV.4]
Si	Epitaxial Layer	0.5	70	515	26.8	59.7	8.2	[IV.5]
Si monocristallin	Epitaxial Layer	1	30	627	30.4	80.29	15.2	Notre cellule

Chapitre IV | Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de silicium cristallin en couche mince déposé sur un substrat silicium monocristallin

Le tableau II.5 démontre le potentiel et la fiabilité des cellules solaires en couches minces à base du silicium cristallin déposé par épitaxie sur des substrats silicium cristallin bas coût et par comparaison aux résultats obtenus dans notre étude.

Conclusion du chapitre IV

Dans le domaine photovoltaïque, les recherches actuelles se focalisent sur l'amélioration du rendement et la réduction du coût de la production des modules solaires. L'un des moyens pour abaisser ce coût est la réduction de l'épaisseur du matériau de base. Parmi les technologies utilisées, on trouve le dépôt direct de silicium cristallin en couches minces par épitaxie sur un substrat silicium monocristallin grâce à sa meilleure qualité électronique, ainsi, l'épaisseur de ce substrat est assez importante (dix fois plus épais que la couche active) car il n'y a pas de réflecteur en face arrière.

La réduction de l'épaisseur des cellules solaires doit donc être accompagnée par un piégeage efficace de la lumière dans la couche active. Ce piégeage peut être obtenu par le recours combiné aux couches antireflet et à la texturisation des interfaces.

Dans ce travail, nous avons simulé sous PC1D (spectre solaire AM1.5G, d'une puissance de 1000 W/m², à 25°C) une structure de cellule solaire de type n⁺/p/p⁺ à base de silicium cristallin en couches minces d'une épaisseur de 56 μm déposé sur un substrat silicium monocristallin d'une épaisseur de 500 μm, avec un émetteur en face avant réalisé par diffusion. Cette structure est compatible avec le procédé élaboré par la technique épitaxiale à l'échelle industrielle.

La simulation effectuée a pour but d'étudier et d'analyser l'influence des paramètres physiques et électriques sur les performances de la structure de cellule à travers la diminution de l'épaisseur de la couche active et de voir si le changement imposé par la faible épaisseur peut rendre les cellules solaires plus efficaces.

Les résultats obtenus, montrent qu'il est possible de réduire encore l'épaisseur de la couche active du silicium cristallin de 56μm à 30μm tout en préservant le rendement qui est de l'ordre de 15.2%, le courant de court-circuit qui est proche de 30.4 mA, la tension de circuit ouvert est de l'ordre de 622.7 mV et le facteur de forme qui est égale à 80.29%.

Références bibliographiques

- IV.1** **Faller, F.R., Hurrel, A.** "High-temperature CVD for crystalline silicon thin-film solar cells". IEEE Trans. Electron Dev. 46, 1999, 2048–2054.
- IV.2** **E. Schmich, N. Schillinger, and S. Reber,** "Silicon CVD deposition for low cost applications in photovoltaics", Surface and Coatings Technology, vol. 201, no. 22-23, pp.9325 – 9329, 2007.
- IV.3** **Sévak AMTABIAN,** "Du transfert de films minces de silicium monocristallin vers un procédé cellule à faible budget thermique", Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon - 2008.
- IV.4** **I. Kuzma-Filipek^{1*}, F. Dross, K.Baert, JL.Hernandez, S.Singh, K. Van Nieuwenhuysen¹, J.Poortmans¹,** " >16% thin film epitaxial silicon solar cells on 70 cm² area with 30µm active layer, porous silicon back reflector and Cu-based top-contact metallization" Belgium-2011
- IV.5** **Kraiem, J., Amtablian, S., Nichiporuk, O., Papet, P., Lelievre, J.F., Fave, A., Kaminski, A. Ribeyron, P. J., Lemiti, M.,** "ELIT process: epitaxial layer for interdigitated back contact on transferred solar cells", 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 1268-1271 (2006).

Conclusion générale et perspectives

L'épuisement des ressources naturelles et les impératifs de protection de l'environnement ont amorcé un processus dynamique de transition énergétique dans le monde. Il consiste à passer du système énergétique actuel, dépendant fortement des énergies fossiles à un système reposant principalement sur des sources renouvelables bas carbone. On distingue parmi ces dernières l'énergie solaire photovoltaïque qui connaît un fort développement ces dernières années. Elle offre une solution très pratique pour l'obtention de l'électricité partout, aussi bien dans de grands parcs solaires que sur des petites installations autonomes isolées. Elle s'est d'abord principalement développée grâce à l'industrie spatiale avant d'être largement démocratisée pour s'installer sur nos toits et devenir l'une des énergies alternatives de demain.

Aujourd'hui les enjeux de développement des modules PV concernent l'abaissement des coûts de production, et de façon complémentaire l'augmentation du rendement de conversion. Pour répondre à cette problématique, plusieurs filières technologiques se sont développées. Mais le Si domine toujours le marché du PV car c'est un matériau abondant, bon marché et non toxique.

De plus, le prix du module est fortement lié au nombre élevé d'étapes retenues pour la fabrication de la cellule photovoltaïque, qui engendrent une forte consommation énergétique. Ces problèmes d'approvisionnement et de consommation d'énergie ont conduit de nombreuses équipes de recherche et d'industrie à s'engager dans le développement d'une nouvelle voie de production de cellules photovoltaïques : les couches minces.

Notre démarche nous a conduit à étudier globalement les différents concepts de cellules en couches minces de type homojonction et hétérojonction à savoir les filières « basse et haute température ». L'enjeu économique principal réside dans la substitution des plaquettes de silicium photovoltaïque par un substrat de silicium de basse qualité, donc moins coûteux, sur lequel une croissance de silicium de haute qualité et de faible épaisseur sera réalisée par épitaxie. Cette technique est très utile, d'un coût de revient relativement bas et un potentiel des rendements élevé. Le dépôt par épitaxie pour l'approche « haute température » est préférable et se réalise par trois méthodes principales : l'épitaxie par jet moléculaire (MBE), l'Épitaxie en Phase Vapeur (VPE ou CVD) et l'Épitaxie en Phase Liquide (EPL).

Il apparaît clairement qu'un compromis devra être trouvé entre la qualité du matériau à déposer et le coût de son élaboration. Ce substrat doit supporter les hautes températures des étapes de fabrication comme l'épitaxie et avoir un coefficient d'expansion proche du Si afin d'éviter les contraintes dans le matériau. Il doit, de plus, conduire l'électricité et ne pas

Chapitre IV | Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de silicium cristallin en couche mince déposé sur un substrat silicium monocristallin

contaminer la cellule en impuretés. Et par-dessus tout, il doit être peu coûteux. Les substrats qui répondent à ces critères sont des wafers de Si monocristallin dopés, **rejets de la microélectronique qui ne peuvent pas être directement utilisés pour la fabrication de cellules solaires**. Cependant, pour avoir un rendement aussi élevé que les cellules conventionnelles, les pertes dues à une plus faible absorption dans les couches minces de silicium cristallin nécessitent de développer des structures spécifiques. Le confinement optique est une part importante de la recherche dans la filière des couches minces en Si cristallin à travers un dépôt des couches antireflet et une texturisation sur la face avant.

Ce travail de thèse s'est inscrit dans cette démarche et avait pour objectif à travers la simulation effectuée : En premier lieu, d'étudier et d'analyser l'influence des différents paramètres physiques et électriques sur les performances d'une cellule solaire en couches minces à base du silicium cristallin déposé sur un substrat silicium monocristallin, et de voir aussi si le changement imposé par la réduction de l'épaisseur du matériau de la couche active afin de minimiser les coûts de production peut rendre ces cellules solaires plus efficaces.

Dans ce travail, Nous avons simulé et optimisé sous PC1D dans les conditions normales : (spectre solaire AM1.5G, d'une puissance de 1000 W/m^2 , à 25°C) une structure de cellule solaire de type $n^+/p/p^+$ à base de silicium cristallin en couches minces d'une épaisseur de $56 \mu\text{m}$ déposé sur un substrat silicium monocristallin fortement dopé de type p d'une épaisseur de $500 \mu\text{m}$, avec un émetteur en face avant réalisé par diffusion. Aussi une faible résistance série base R_s de $0.5 \Omega.\text{cm}^2$ a été introduite et une résistance parallèle infinie R_p a été appliquée pour négliger les courants de fuites. Cette structure est compatible avec le procédé élaboré par la technique épitaxiale à l'échelle industrielle.

La simulation de cette cellule photovoltaïque en l'absence de texturation de la surface avant donne les résultats suivants : $J_{cc} = 30 \text{ mA.cm}^{-2}$, $V_{co} = 623 \text{ mV}$, $\eta = 15.2\%$.

L'optimisation de la structure de cellule solaire en couches minces simulée a mis en évidence qu'il est possible de réduire encore l'épaisseur de la couche active du silicium cristallin de $56\mu\text{m}$ à $30\mu\text{m}$ tout en préservant le rendement qui est de l'ordre de 15.2% , le courant de court-circuit qui est proche de 30.4 mA , la tension de circuit ouvert est de l'ordre de 622.7 mV et le facteur de forme qui est égale à 80.29% .

Les perspectives de ce travail de thèse dépassent aussi le domaine de la filière silicium. Par exemple, la fabrication de cellules tandem Si/pérovskite ou Si/GaAs en couches minces. Dans ces structures, il serait possible, théoriquement, d'optimiser l'épaisseur de la couche active pour obtenir les meilleurs rendements.

Résumé

Dans le domaine photovoltaïque, la recherche s'oriente sur deux axes importants : l'augmentation du rendement des cellules solaires et la réduction des coûts de fabrication. Pour réduire le coût, il est nécessaire de réduire l'épaisseur des couches actives. L'idée de base est de réaliser une couche de silicium de haute qualité structurale et électronique de faible épaisseur (10 à 50 μm) par un procédé de croissance épitaxiale sur un substrat silicium monocristallin bas-coût.

Cette structure est caractérisée par les paramètres suivants : (Épaisseur de la couche de base $X_B = 56 \mu\text{m}$, le rendement $\eta = 15,2\%$, la tension en circuit ouvert $V_{co} = 623 \text{ mV}$ et le courant de court-circuit $I_{cc} = 30 \text{ mA}$). La simulation a été effectuée par le logiciel PC1D, visant à trouver une nouvelle structure de cellule solaire en gardant les mêmes caractéristiques mentionnés ci-dessus (η , I_{cc} et V_{co}) tout en diminuant l'épaisseur de cette cellule solaire.

Mots clés :

Cellule solaire, Silicium cristallin, Couches minces, Epitaxie, Epaisseur, Performances, Simulation PC1D

Abstract

In the photovoltaic field, research is focused on two important axes: increasing cell efficiency, and reducing fabrication costs. To reduce the cost of the base materials, it is necessary to reduce the thickness of the active layers. The basic idea is to make a layer of high structural and electronic quality silicon of small thickness (10–50 μm). This layer could be grown by epitaxial techniques on a low-cost monocrystalline silicon substrate.

This structure is characterized by the following parameters: (Thickness of the base layer $X_B = 56 \mu\text{m}$, the efficiency $\eta = 15.2\%$, the open-circuit voltage $V_{oc} = 623 \text{ mV}$ and the short-circuit current $I_{sc} = 30 \text{ mA}$). The calculations were carried out by the PC1D software, aiming to find a new solar cell structure by keeping the same characteristic parameters mentioned above (η , I_{sc} , and V_{oc}) while decreasing the thickness of this solar cell. The effect of the different parameters on the performance of the solar cell was investigated. The obtained results showed that it is possible to reduce the substrate thickness from 56 to 30 μm while keeping the same characteristics parameters of the cell ($\eta = 15.2\%$, $V_{oc} = 622.7 \text{ mV}$, $I_{sc} = 30.1 \text{ mA}$).

Keywords: Silicon solar cell, thickness, thin film, Epitaxy, performance, PC1D software

ملخص

وفي شعبة الخلايا الكهروضوئية، تركز الأبحاث على محورين مهمين: زيادة كفاءة الخلية، وتقليل تكاليف التصنيع. لتقليل تكلفة المواد الأساسية، من الضروري تقليل سمك الطبقات النشطة. الفكرة الأساسية هي صنع طبقة من السيليكون عالي الجودة هيكليًا وإلكترونيًا بسمك صغير (10-50 ميكرومتر). يمكن زراعة هذه الطبقة عن طريق التقنيات الفوقية على ركيزة من السيليكون أحادي البلورية منخفضة التكلفة.

تتميز هذه الخلية بالخصائص التالية: (سمك الطبقة الأساسية $X_B = 56 \mu\text{m}$ ، الكفاءة $\eta = 15.2\%$ ، جهد الدائرة المفتوحة $V_{co} = 623 \text{ mV}$ وتيار الدائرة القصيرة $I_{cc} = 30 \text{ mA}$). تم إجراء المحاكاة بواسطة برنامج PC1D، بهدف إيجاد بنية خلية شمسية جديدة بتقليل سمك هذه الخلية الشمسية مع الحفاظ على نجاعتها المذكورة أعلاه (η ، I_{cc} ، V_{co}).

تمت دراسة تأثير العوامل المختلفة على أداء الخلية الشمسية، حيث أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أنه من الممكن تقليل سمك الركيزة من $56 \mu\text{m}$ إلى $30 \mu\text{m}$ مع الحفاظ على نفس أداء و نجاعة هذه الخلية :

($\eta = 15.2\%$ ، $V_{co} = 622.7 \text{ mV}$ ، $I_{cc} = 30.1 \text{ mA}$)

كلمات مفتاحية: خلية شمسية، سيليكون بلوري، سمك، فيلم رقيق، كفاءة، PC1D