

République Algérienne Démocratique Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen-

Faculté de technologie



Département de génie électrique et électronique

Thèse

Pour l'obtention du diplôme de doctorat en micro-électronique

Thème

**OPTIMISATION DES PARAMETRES GEOMETRIQUES
ET PHYSIQUES DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES A
CONTACTS ARRIERE INTERDIGITES**

Présenté par :

Mme BERROUBA TANI née KADDOURI Nadéra

Soutenu publiquement en Avril 2015 devant le jury d'examen composé de :

CHABANE SARI Nasreddine	Professeur	U.Tlemcen	Président
KADOUNE Abd-Ed-Daïm	Professeur	U.Sidi-Belabbes	Examineur
LASRI boumédiène	Professeur	U. Saïda	Examineur
GHAFFOUR Kheir-Eddine	Professeur	U.Tlemcen	Directeur de thèse
BOUAZZA née GUEN Ahlam	MCA	U.Tlemcen	Invitée
ZERGA Abdellatif	MCA	U.Tlemcen	Invité

Année universitaire : 2014-2015

Je dédie ce modeste travail

Aux personnes qui me sont les plus chères, à :

Mon mari et mon fils Yassine

Mes parents et mes frères

Mes beaux-parents, mes belles sœurs, mes beaux frères

Et à tous ceux que j'aime.

Remerciements

Je remercie ALLAH, le Tout-Puissant, qui m'a donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.

J'exprime mes remerciements les plus chaleureux à monsieur **GHAFFOUR Kheir-Eddine**, Professeur à l'université Abou Bakr Belkaïd-Tlemcen, de m'avoir accueillie pour cette thèse, pour ses encouragements, et d'avoir mis à ma disposition les outils nécessaires pour cette étude. Ces quatre années passées sous sa direction ont été enrichissantes, aussi bien sur le plan scientifique que sur le plan humain.

Je tiens à exprimer ma respectueuse gratitude à monsieur **CHABANE SARI Nasreddine**, Professeur à l'université Abou Bakr Belkaïd-Tlemcen, qui a eu l'honneur de présider ce jury.

Mes vifs remerciements vont aussi à :

- **Mr. KADOUNE Abd-Ed-Daïm**, Professeur à l'université Sidi-Belabbes.
- **Mr. LASRI boumédiene**, Professeur à l'université Saïda
- **Mme. BOUAZZA née GUEN Ahlam**, maître de conférences (MCA) à l'université Abou Bakr Belkaïd- Tlemcen.
- **Mr. ZERGA Abdellatif**, maître de conférences (MCA) à l'université Abou Bakr Belkaïd- Tlemcen.

Qui m'ont faits l'honneur d'acceptés de juger ce travail et d'être membres du jury.

Introduction générale		
Figure	Titre	Page
Figure 1.	<i>Puissance photovoltaïque globale installée par région du monde 2000-2013</i>	01
Etat de l'art		
Figure	Titre	Page
Figure 1.	<i>Représentation schématique de la structure cristalline du silicium (a) et de la structure amorphe du silicium (b).</i>	05
Figure 2.	<i>Production des plaquettes de silicium de qualité électronique</i>	06
Figure 3.	<i>Méthode de Czochralski</i>	09
Figure 4.	<i>Deux lingots de silicium monocristallin</i>	10
Figure 5.	<i>Silicium monocristallin</i>	10
Figure 6.	<i>Fabrication de lingots de Si polycristallin</i>	11
Figure 7.	<i>Silicium multicristallin</i>	11
Figure 8.	<i>Utilisation d'une scie annulaire diamantée</i>	12
Figure 9.	<i>Principe d'une scie à fils pour le découpage des substrats de silicium</i>	13
Figure 10.	<i>Tirage d'un ruban de silicium en filière</i>	14
Figure 11.	<i>Représentation schématique de la structure cristalline du silicium (a) et de la structure amorphe du silicium (b)</i>	15
Figure 12.	<i>Diagrammes de bande du silicium amorphe hydrogéné et du silicium cristallin</i>	16
Figure 13.	<i>Répartition de la production mondiale (en watt-crête) de modules photovoltaïques suivant les différentes filières, en 2006.</i>	18
Figure 14.	<i>Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde</i>	19
Chapitre I		
Figure	Titre	Page
Figure I-1.	<i>Définition de la norme AM_m.</i>	24
Figure I-2.	<i>Représentation graphique des spectres AM0 et AM1,5. Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence.</i>	25
Figure I-3.	<i>Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect</i>	28
Figure I-4.	<i>Influence du niveau d'injection sur les différents mécanismes de recombinaisons (radiative, Auger et SRH)</i>	31
Figure I-5.	<i>Structure (a) et diagramme de bande (b) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.</i>	33
Figure I-6.	<i>Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.</i>	34
Figure I-7.	<i>(a) Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairage et sous obscurité et (b) représentation conventionnelle de la courbe I(V).</i>	36
Figure I-8.	<i>Caractéristique I(V) pour plusieurs valeurs de résistance série</i>	38
Figure I-9.	<i>Différents facteurs limitant le rendement.</i>	40
Figure I-10.	<i>Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque.</i>	42
Figure I-11.	<i>Schéma comparatif des phénomènes de réflexion sur surfaces plane et texturée.</i>	43
Figure I-12.	<i>L'introduction d'une couche mince entraîne la division d'amplitude de l'onde incidente, conduisant à des phénomènes d'interférences entre les rayons réfléchis.</i>	44
Figure I-13.	<i>Structure standard d'une cellule PV</i>	46
Figure I-14.	<i>Structure standard : Photographie de la face avant (wafer pseudo-carré 150 cm²)</i>	47
Chapitre II		
Figure	Titre	Page
Figure II-1.	<i>Evolution du marché photovoltaïque selon les technologies</i>	54
Figure II-2.	<i>Répartition du prix du module photovoltaïque à base de silicium multicristallin.</i>	55
Figure II-3.	<i>Présentation simplifiée des trois principales filières photovoltaïques</i>	56
Figure II-4.	<i>Structure d'une cellule photovoltaïque en Si monocristallin à haut rendement</i>	57

	(24.7%) PERL	
Figure II-5.	Structure d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium cristallin	59
Figure II-6.	(a) principe de fonctionnement (cellule tandem a deux jonctions) (b) Représentation schématique d'une structure a trois cellules montées en série suivant la configuration monolithique.	61
Figure II-7.	Cellule solaire en CdTe	62
Figure II-8.	Cellule solaire en chalcopyrites	62
Figure II-9.	Cellule solaire en silicium amorphe	63
Figure II-10.	Cellule solaire organique	64
Figure II-11.	Cellule solaire à colorant	65
Figure II-12.	Cellule solaire de type Schottky	65
Figure II-13.	Diagramme énergétique d'une cellule solaire à couche BSF	66
Figure II-14.	Cellule solaire de type MIS	67
Figure II-15.	Exemple d'une hétérojonction entre deux matériaux (E_{g1}, E_{g2})(χ_1, χ_2)	69
Figure II-16.	Diagramme de bandes d'une hétérojonction p/n selon 3 modèles : (a) l'influence des états d'interface et dipôles (Anderson), (b) en incluant les états d'interface et (c) en incluant les dipôles	70
Figure II-17.	Diagramme de bandes de l'hétérojonction a-Si:H(n^+)/c-Si(p).	72
Figure II-18.	Diagramme de bande a-Si:H(n)/c-Si(p) et a-Si:H(p)/c-Si(n)	73
Figure II-19.	Structures d'une cellule photovoltaïque silicium à hétérojonctions -a-substrat type (n) ; -b- substrat type (p).	74
Figure II-20.	Contact entre l'ITO et le silicium amorphe dopé n et p à l'équilibre thermodynamique pour un travail de sortie de l'ITO fixé à $\phi_m=4.4$ ev et $\phi_m=5.2$ ev.	77
Figure II-21.	Evolution du diagramme de bande de l'hétérojonction a-Si(p)/c-Si(n) en fonction de largeur de bande interdite et l'affinité électronique de a-Si(p).	77
Figure II-22.	Influence de l'épaisseur de l'émetteur amorphe a-Si:H (n) sur les recombinaison déduite des simulations sous AFORS-HET.	78
Figure II-23.	Structure HIT produit par SANYO consistant en un dépôt de fines couches de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque est dopé de part et d'autre d'un substrat de silicium monocristallin de type n	81
Figure II-24.	Structure de la cellule à double hétérojonction de Sanyo	83
Figure II-25.	(a) Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairément et sous obscurité et (b) représentation conventionnelle de la courbe I(V)	86
Figure II-26.	Caractéristiques sous éclairément d'une cellule test (à jonction arrière) sous AM1.5D. La courbe noire correspond à la réponse I-V et la courbe rouge à l'évolution de la puissance fournie	86
Figure II-27.	Modèle à deux diodes d'une cellule sous éclairément	87
Figure II-28.	Schéma du simulateur	88
Figure II-29.	Plateforme de mesure des cellules à jonction arrière	88
Figure II-30.	Schéma de principe de la mesure Suns-Voc	89
Figure II-31.	Modèle à deux diodes d'une cellule lors de la mesure Suns-Voc	89
Figure II-32.	Caractéristique I(V) pour plusieurs valeurs de résistance série	90
Figure II-33.	Exemple de Rendements Quantiques Externe et Interne d'une cellule solaire. La méthode LBIC (Light Beam Induced Current)	93
Figure II-34.	Modèle à deux diodes d'une cellule sous obscurité	93
Chapitre III		
Figure	Titre	Page
Figure III-1.	Structures de cellules PV à contacts arrière interdigités IBC	98
Figure III-2.	Différentes étapes de réalisation d'une structure IBC par le procédé 1	104
Figure III-3.	Disposition des cellules sur substrat de 2 pouces pour le procédé 1	104
Figure III-4.	Dessin des masques utilisés pour la fabrication des cellules à contacts arrière interdigités par le procédé 1	105

Figure III-5.	<i>Différentes étapes de réalisation d'une structure IBC par le procédé 2</i>	107
Figure III-6.	<i>Disposition des cellules sur substrat de 2 pouces pour le procédé 2</i>	108
Figure III-7.	<i>Dessin des masques utilisés pour la fabrication des cellules à contacts arrière interdigités par le procédé 2</i>	108
Figure III-8.	<i>Structure des cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités élaborés par le procédé auto-aligné de Sinton</i>	109
Figure III-9.	<i>Différentes étapes de réalisation d'une structure IBC par le procédé 2</i>	111
Figure III-10.	<i>Représentation schématique de la structure d'une cellule solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigités IBC-SiHJ développée à l'université du Delaware.</i>	113
Figure III-11.	<i>Schéma d'une cellule solaire à hétérojonction a contacts arrière interdigités BEHIND développée à l'ENEA</i>	114
Figure III-12.	<i>Schéma de la structure de la cellule interdigitée à hétérojonctions réalisée</i>	114
Figure III-13.	<i>Schéma de principe de la structure solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigités RECASH développée au HZB.</i>	115
Figure III-14.	<i>Représentation schématique de la cellule interdigitée à hétérojonction BACH développée à L'université de Toronto</i>	116
Figure III-15.	<i>Schéma de principe de la structure interdigitée à hétérojonctions IBC-SHJ développée à l'IMEC.</i>	116
Figure III-16.	<i>Représentation schématique d'une cellule solaire à hétérojonction émetteur IBC-SiHJ</i>	117
Figure III-17.	<i>L'influence du champ face avant FSF sur le rendement d'une cellule IBC [35]</i>	120
Figure III-18.	<i>Schématique de deux niveaux de métallisation (a) une métallisation niveau 1 et (b) une métallisation niveau 2 pour une cellule IBC</i>	121
Chapitre IV		
Figure	Titre	page
Figure IV-1.	<i>Principe de base de la recombinaison Schokley-Read-Hall (SRH)</i>	130
Figure IV-2.	<i>Mécanisme de recombinaison Auger. L'excès d'énergie issu de la recombinaison peut être transféré à un électron -a- ou à un trou -b-</i>	132
Figure IV-3.	<i>Mécanisme de recombinaison en surface</i>	133
Figure IV-4.	<i>Structure d'une cellule solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigitée avec couche intrinsèque</i>	137
Figure IV-5.	<i>Structure de référence IBC-SiHJ avec couche intrinsèque simulée sous Silvaco/Atlas.</i>	138
Figure IV-6.	<i>Maillage et affinements utilisés pour les simulations d'une cellule IBC-SiHJ.</i>	140
Figure IV-7.	<i>Caractéristiques I(V) d'une cellule IBC-SiHJ pour différents pitch</i>	144
Figure IV-8.	<i>Evolution de la tension de circuit ouvert, du courant de court-circuit, facteur de forme et du rendement de la cellule IBC-SiHJ en fonction de la largeur de la structure élémentaire simulée (a,b,c,d) et littérature.(α,β,γ)</i>	144
Figure IV-9.	<i>Influence des couches antireflets (CAR et DCAR) sur les performances d'une cellule à hétérojonction a contact arrière sous éclairnement AM 1.5G (V_{co}, J_{cc}, FF et η)</i>	148
Figure IV-10.	<i>Evolution du courant de court-circuit J_{cc}, de la tension de circuit ouvert V_{co} et du rendement η de la cellule en fonction de la recombinaison sur les faces avant.</i>	149
Figure IV-11.	<i>Influence de la vitesse de recombinaison en face avant avec et sans couche FSF (a) cellule de référence de type n et (b) la cellule de littérature</i>	150
Figure IV-12.	<i>Evolution de la tension de circuit ouvert, du courant de court-circuit, facteur de forme et du rendement de la cellule IBC-SiHJ en fonction de la durée de vie des porteurs minoritaires. Pas de défaut à l'interface. (a) simulée ; (b) littérature</i>	152
Figure IV-13.	<i>Variation du rendement quantique pour une cellule solaire à contact arrière interdigitée à hétérojonction à base de silicium cristallin pour une durée de vie de 5ms.(a) simulée ; (b) littérature</i>	153
Figure IV-14.	<i>Variation du rendement électrique en fonction de la longueur de diffusion dans le substrat (c-Si type n), d'une cellule solaire à contacts arrière interdigités à hétérojonction.(a) simulée ; (b) littérature</i>	154
Figure IV-15.	<i>(a),(b) Evolution de la tension de circuit ouvert(a), du courant de court-circuit(b) de la cellule IBC-SiHJ en fonction de l'épaisseur du substrat</i>	155
Figure IV-15.	<i>(c),(d) Evolution du facteur de forme(c) et du rendement(d) de la cellule IBC-SiHJ en</i>	156

	<i>fonction de l'épaisseur du substrat.</i>	
Figure IV-16.	<i>(a), (α) Variations de densité de courant de court-circuit J_{cc}, en fonction de la concentration du dopage du substrat (c-Si).(a) pour la cellule de référence de type n et(α) pour la cellule de littérature ,avec différents durée de vie . Pas de défauts à l'interface a-Si: H /c-Si.</i>	158
Figure IV-16.	<i>(b), (β) Variations de la tension en circuit ouvert V_{co}, en fonction de la concentration du dopage du substrat (c-Si).(b) pour la cellule de référence de type n et(β) pour la cellule de littérature ,avec différentes durées de vie . Pas de défauts à l'interface a-Si: H /c-Si.</i>	158
Figure IV-16.	<i>(c), (γ) Variations du facteur de forme FF, en fonction de la concentration du dopage du substrat (c-Si).(c) pour la cellule de référence de type n et(γ) pour la cellule de littérature, avec différentes durées de vie .</i>	159
Figure IV-16.	<i>(d), (θ) Variations du rendement électrique η(%), en fonction de la concentration du dopage du substrat (c-Si).(d) pour la cellule de référence de type n et(θ) pour la cellule de littérature, avec différentes durées de vie</i>	160
Figure IV-17.	<i>Structure d'une cellule solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigitée avec couche intrinsèque</i>	161
Figure IV-18.	<i>(a),(α)Variations de la tension en circuit ouvert V_{co}, en fonction de la densité d'états d'interface N_{SS} silicium cristallin type (n)/ émetteur (silicium amorphe).(a) pour la cellule de référence et(α) pour la cellule de littérature,(l'hétérojonction de BSF étant libre de défauts d'interface)</i>	162
Figure IV-18.	<i>(b),(β)Variations du facteur de forme FF, en fonction de la densité d'états d'interface N_{SS}(silicium cristallin type (n)/ émetteur (silicium amorphe).(b) pour la cellule de référence et(β) pour la cellule de littérature,(l'hétérojonction de BSF étant libre de défauts d'interface)</i>	163
Figure IV-18.	<i>(c),(d) Variations de densité de courant en court-circuit J_{cc}, et le rendement de conversion électrique η en fonction de la densité d'états d'interface N_{SS}(silicium cristallin type (n)/ émetteur (silicium amorphe),(l'hétérojonction de BSF étant libre de défauts d'interface)</i>	163
Figure IV-19.	<i>(a),(α)Variations de la tension en circuit ouvert V_{co}, en fonction de la densité d'états d'interface N_{SS} silicium cristallin type (n)/ émetteur (silicium amorphe.(a) pour la cellule de référence et(α) pour la cellule de littérature,(l'hétérojonction d'émetteur étant libre de défauts d'interface)</i>	164
Figure IV-19.	<i>(b),(β)Variations du facteur de forme FF, en fonction de la densité d'états d'interface N_{SS}(silicium cristallin type (n)/ émetteur (silicium amorphe).(b) pour la cellule de référence et(β) pour la cellule de littérature,(l'hétérojonction de BSF étant libre de défauts d'interface)</i>	165
Figure IV-19.	<i>(c),(d)Variations de densité de courant en court-circuit J_{cc}, et le rendement de conversion électrique η en fonction de la densité d'états d'interface N_{SS}(silicium cristallin type (n)/ émetteur (silicium amorphe),(l'hétérojonction de BSF étant libre de défauts d'interface)</i>	165
Figure IV-20.	<i>(a),(α) Evolution des V_{co} en fonction soit de la section efficace de capture des électrons, σ_n,ou la section efficace de capture des trous, σ_p, (l'autre section efficace de capture est fixé à 10^{-15}cm^2) de chaque hétéro-interface (a) de la cellule de référence de type n. Dans tous les cas, $N_{SS}=5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ à l'hétéro-interface indiquée, (α) littérature</i>	167
Figure IV-21.	<i>(b),(α). Evolution des V_{co} en fonction soit de la section efficace de capture des électrons σ_n, ou la section efficace de capture des trous σ_p, (l'autre section efficace de capture est fixé à 10^{-15}cm^2) de chaque hétéro-interface (b) de la cellule de référence de type n. (α) littérature</i>	167
Figure IV-22.	<i>(a),(b) Caractéristiques I(V) d'une cellule IBC-SiHJ sans et avec couche intrinsèque ($E_{i-a-Si}=10\text{nm}$, $E_{i-a-Si}=50\text{nm}$)(A) ;littérature (a)</i>	168
Figure IV-23.	<i>(a),(b) ,(c),(d) Evolution de la tension de circuit ouvert(a), du courant de court-circuit(b), du facteur de forme(c) et du rendement η(d) de la cellule IBC-SiHJ en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque (i-a-Si), à gauche résultats de la littérature.</i>	170
Figure IV-24.	<i>(a, b, c, d) Evolution du rendement(a), du courant de court-circuit (b) tension de circuit ouvert (c) et de la de la cellule en fonction de l'épaisseur de l'émetteur pour un substrat (n-Si).</i>	171

Figure IV-25.	<i>(a,b,c,d) Evolution courant de court-circuit $J_{cc}(a)$, du facteur de forme $FF(b)$, du rendement (c) et de la tension de circuit ouvert V_{co} (d) de la cellule IBC-SiHJ en fonction de la largeur de l'émetteur pour un substrat a-Si(n), à gauche les résultats de littérature.</i>	173
Figure IV-26.	<i>(a),(b) Evolution du rendement η (a) et de la tension de circuit ouvert de la cellule (b) en fonction du dopage de l'émetteur différentes durées de vie (5ms, 1ms).</i>	174
Figure IV-27.	<i>(a,b) Evolution du courant en court-circuit $J_{cc}(a)$ et du rendement de conversion électrique (b) en fonction de l'épaisseur du BSF</i>	175
Figure IV-28.	<i>(a,b) Evolution du courant en court-circuit $J_{cc}(a)$ et du rendement de conversion électrique (b) en fonction de la largeur du BSF</i>	175
Figure IV-29.	<i>Evolution du rendement de conversion électrique en fonction du dopage du BSF, avec différentes vitesses de recombinaisons</i>	176
Figure IV-30.	<i>Caractéristiques $I(V)$ d'une cellule IBC-SiHJ pour différents Gap</i>	179
Figure IV-31.	<i>Evolution de la tension de circuit ouvert (a), du courant de court-circuit (b), facteur de forme (c) et du rendement de la cellule IBC-SiHJ (d) en fonction de l'espacement entre les contacts (Gap). à gauche résultats de la littérature</i>	179
Figure IV-32.	<i>(a),(b),(c),(d) Evolution du courant de court-circuit (a), le rendement de conversion électrique (b), du facteur de forme $FF(c)$ et de la tension en circuit ouvert (d), de la cellule IBC-SiHJ en fonction du coefficient de réflexion en face arrière.</i>	181

Chapitre II		
Tableau	Titre	Page
Tableau II-1.	<i>Paramètres généralement fixes pour le silicium amorphe et le silicium cristallin</i>	73
Tableau II-2.	<i>Résultats des performances des cellules HIT de SANYO de l'année 2004, 2009. Et le Groupe SANYO Panasonic 10 avril 2014</i>	84
Tableau II-3.	<i>Résumé des meilleurs résultats obtenus sur les cellules à hétérojonctions avec un substrat de silicium cristallin de type p.</i>	84
Tableau II-4.	<i>Résumé des meilleurs résultats obtenus sur les cellules à hétérojonctions avec un substrat de silicium cristallin de type p.</i>	84
Tableau II-5.	<i>Résumé des meilleurs résultats obtenus sur les cellules à hétérojonctions avec un substrat de silicium cristallin de type n.</i>	86
Chapitre III		
Tableau	Titre	Page
Tableau III-1	<i>Présentation des rendements obtenus des cellules solaires IBC classiques rapportés dans la littérature</i>	97
Tableau III-2	<i>Résultats des différents laboratoires sur les cellules solaires à contacts arrière interdigités</i>	112
Chapitre IV		
Tableau	Titre	Page
Tableau IV-1	<i>Paramètres par défaut du modèle de recombinaison Shockley Read Hall dans Silvaco.</i>	131
Tableau IV-2	<i>Paramètres par défauts du modèle de recombinaison Shockley Read Hall dans Silvaco.</i>	131
Tableau IV-3	<i>Paramètres par défaut du modèle de recombinaison Shockley-Read-Hall dans Silvaco</i>	132
Tableau IV-4	<i>Paramètres par défaut du modèle de recombinaison Auger dans Silvaco</i>	133
Tableau IV-5	<i>paramètres utilisés par défaut dans Silvaco pour le modèle Masetti en introduisant le phosphore dans le silicium</i>	134
Tableau IV-6	<i>Paramètres utilisés par défaut dans Silvaco pour le modèle de Canali.</i>	135
Tableau IV-7	<i>Paramètres utilisés par défaut dans Silvaco pour les modèles de Benett-Wilson</i>	136
Tableau IV-8	<i>Paramètres de la cellule de référence</i>	139
Tableau IV-9	<i>Résultats de la variation la structure élémentaire (pitch)</i>	142
Tableau IV-10	<i>Caractéristiques de cellule de référence</i>	145
Tableau IV-11	<i>Résultats de l'influence de la couche antireflet sur les performances d'une cellule IBC-SiHJ</i>	147
Tableau IV-12	<i>Résultats de la variation de la durée de vie dans un substrat</i>	152
Tableau IV-13	<i>Résultats de la variation de la distance entre l'émetteur et BSF (Gap)</i>	177

Table des matières

Introduction générale	01
Bibliographie de l'introduction.....	04
 Etat de l'art. Notions préliminaires sur le silicium pour l'utilisation photovoltaïque	
Introduction	05
1. Aperçus sur la structure cristalline et la structure amorphe	05
1.1 Un état dit amorphe	05
1.2 Un état cristallisé	06
1.2.1 <i>Des monocristaux</i>	06
1.2.2 <i>Poly-cristaux</i>	06
2. Obtention d'un silicium de qualité électronique	06
2.1 Réduction de la silice	07
2.2 Purification du silicium	08
3. Différents types de silicium	08
3.1 Le silicium cristallin	09
3.1.1 <i>Production du silicium cristallin</i>	09
3.1.1.1 Procédé de Czochralski pour la fabrication de silicium monocristallin.....	09
3.1.1.2 Procédés de fabrication du silicium polycristallin (multicristallin)	11
3.1.2 <i>Préparation des plaquettes de silicium cristallin</i>	13
3.1.2.1 Orientation et découpage	13
3.1.2.2 Découpage et polissage	13
3.1.2.3 Défauts cristallins dans le silicium.....	14
3.2 Le silicium amorphe	14
3.2.1 <i>Définition du silicium amorphe hydrogéné</i>	14
3.2.2 <i>Propriétés électroniques du silicium amorphe</i>	15
3.2.3 <i>Particularités</i>	16
3.2.3.1 Avantages de silicium amorphe	16
3.2.3.2 Inconvénients de silicium amorphe.....	17
3.2.4 <i>Applications</i>	17
3.2.4.1 Avantage.....	18
3.2.4.2 Inconvénient	18
4. Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque	18
4.1 Choix du matériau silicium	20
Conclusion	21
Références bibliographiques de l'état de l'art	22

Chapitre I. Généralités sur la cellule photovoltaïque en silicium

Introduction	23
1. Notions de base sur le rayonnement solaire et l'effet photovoltaïque	23
1.1 Rayonnement et spectre solaire	23
1.1.1 <i>Rayonnement solaire</i>	23
1.1.2 <i>Spectre solaire</i>	24
1.2 L'effet photovoltaïque	25
1.2.1 <i>L'énergie photovoltaïque</i>	26
1.2.2 <i>Principe de l'effet photovoltaïque</i>	26
1.2.3 <i>Avantages du photovoltaïque</i>	26
1.2.4 <i>Principal inconvénient du photovoltaïque</i>	26
1.2.5 <i>Historique du photovoltaïque</i>	26
2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	27
2.1 L'interaction photon /semi-conducteur	27
2.2 Différentes formes de recombinaison des porteurs	29
2.2.1 <i>Recombinaisons volumiques</i>	29
2.2.1.1 Recombination Shockley-Read-Hall (SRH)	30
2.2.1.2 Recombinaison Auger	30
2.2.1.3 Recombinaison radiative	30

2.2.2 Recombinaisons surfaciques	31
2.4 La jonction p/n: base de cellule photovoltaïque	32
3. Propriétés électriques des cellules photovoltaïques	34
3.1 Schéma électrique équivalent	34
3.2 Paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque	35
3.2.1 Tension en circuit ouvert (V_{co})	37
3.2.2 Densité de courant en court-circuit (J_{cc})	37
3.2.3 Puissance débitée P	37
3.2.4 Facteur de forme (FF)	38
3.2.5 Rendement de conversion d'une cellule solaire (η)	39
4. Facteurs limitant le rendement	40
4.1 Pertes énergétiques par non absorption du rayonnement	41
4.2 Pertes aux puissances électriques dûes au procédé de fabrication de la cellule	41
5. Rendement quantique et réponse spectrale	41
5.1 Rendement quantique	41
5.2 La réponse spectrale	42
6. Technologies pour la réduction des pertes de rayonnements (les constituants de base d'une cellule photovoltaïque)	43
6.1 Texturisation	43
6.2 Couche antireflet (CAR)	44
6.3 Réflecteur arrière (BSR : Back Surface Reflector)	45
7. La cellule photovoltaïque standard en silicium cristallin	45
7.1 Architecture de la cellule photovoltaïque standard	45
7.2 Les différents types de silicium utilisé	47
Conclusion	48
Références bibliographiques du chapitre I	49

Chapitre II. Différentes technologies PV et cellules solaires à haut rendement

Introduction	51
1. Les différentes technologies photovoltaïques	51
1.1 Evolution du marché photovoltaïque selon les technologies	51
1.2 Le coût des cellules photovoltaïques	52
1.3 Classification simplifiée des filières photovoltaïques	53
1.4 Etude des principales filières photovoltaïques	53
1.4.1 La filière du silicium	53
1.4.1.1 Structure photovoltaïque à haut rendement (PERL)	54
1.4.1.2 Structure de cellules photovoltaïques industrielles en silicium	55
1.4.2 La filière des couches minces (la technologie de deuxièmes générations)	56
1.4.2.1 Cellules tandem (multijonctions)	57
1.4.2.2 Cellule solaire sur un substrat CdTe	58
1.4.2.3 Cellules en couches minces de la famille des chalcopyrites	59
1.4.2.4 Cellule photovoltaïque en silicium amorphe	59
1.4.3 Nouveaux concepts	60
1.4.3.1 Cellules organiques	60
1.4.3.2 Cellules à colorant	61
2. Autres types de cellules solaires	62
2.1 Cellule solaire de type Schottky	62
2.2 Cellules à BSF	62
2.3 Cellule solaire de type structure MIS arrière Métal	63
3. Les cellules photovoltaïques industrielles en silicium cristallin à haut rendement.....	64
3.1 L'association des deux filières amorphes–cristallines.....	64
3.2 Etude théorique des cellules conventionnelles de silicium à hétérojonctions	64
3.2.1 L'intérêt de l'Hétérojonction	64
3.2.2 Principe de l'hétérojonction	65
3.2.2.1 Généralités	65
3.2.2.2 Etude du modèle d'Anderson.....	66
3.2.2.3 Affinité électronique et discontinuité des bande.....	67
3.2.3 Etude de l'hétérojonction silicium amorphe/ silicium cristallin face avant	67
3.2.3.1 Analyse de bande de diagramme de l'hétérojonction	

silicium amorphe (n)/ silicium cristallin (p).....	68
3.3.3 Structures solaires à hétérojonctions	70
3.3.4 Les composants de base d'une cellule de silicium à hétérojonctions	71
3.3.4.1 Les oxydes transparents conducteurs (TCO)	71
3.3.4.2 L'émetteur	74
3.3.4.3 Le BSF	75
3.3.4.4 Les contacts	75
3.4 Optimisation de l'hétérojonction silicium amorphe / silicium cristallin (naissance de la structure HIT)	76
3.4.1 L'intérêt d'introduire une couche intrinsèque dans une hétérojonction	76
3.4.2 Développement et avantages de la technologie silicium à hétérojonctions	76
3.4.3 Description d'une structure à hétérojonction répandue dans les cellules photovoltaïques « la structure HIT »	76
3.3.2.1 Les avantages de la structure HIT	78
3.4.4 Les cellules solaires à double hétérojonction	78
3.4.4.1 Architecture : double hétérojonction	78
3.5 Cellules solaires de silicium à hétérojonctions résultats et perspectives.....	79
3.5.1 Choix de type de substrat.....	79
4. Cellules photovoltaïques avec des contacts arrière interdigités	81
5. Des techniques de caractérisation d'une cellule photovoltaïque	81
5.1 La caractérisation I-V sous éclairage	82
5.1.1 Le principe	82
5.1.2 Procéder de mesure	84
5.2 La mesure Suns-Voc	85
5.3 Caractérisation par réponse spectrale	87
5.3.1 Principe	87
5.4 La mesure I-V sous obscurité	89
Conclusion	91
Références bibliographiques du chapitre II.....	92

Chapitre III : Technologies des cellules solaires à contacts arrière interdigités classiques IBC et à hétérojonctions IBC-SiHJ

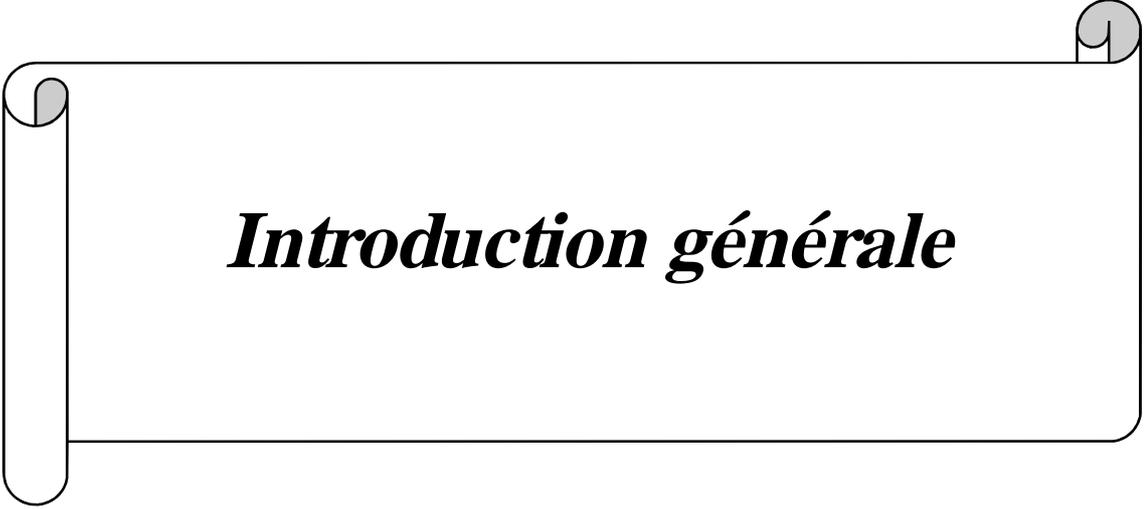
Introduction	96
1. Les cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités	96
1.1 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités IBC classique	96
1.1.1 Résultats de littérature (Historique)	96
1.1.2 Représentation de la structure d'une cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités IBC classique	97
1.1.3 Principe de fonctionnement.....	98
1.2 Les avantages des cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités IBC Classique	99
1.3 Les inconvénients des cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités IBC	99
2. Les technologies de base pour la réalisation des cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités IBC classique	100
2.1 Réalisation de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités par le premier procédé.....	100
2.1.1 Etapes technologiques pour la réalisation de cellules solaires à contacts arrière interdigités par le procédé	100
2.1.2 Les masques utilisés dans les cellules solaires à contacts arrière interdigités par le procédé 1	104
2.2 Réalisation des cellules solaires à contacts arrière interdigités par le deuxième procédé	105
2.2.1 Etapes technologiques pour la réalisation des cellules solaires à contacts arrière Interdigités par le procédé 2.....	105
2.2.2 Les masques utilisés dans les cellules solaires à contacts arrière interdigités Par le procédé 2.....	108
2.3 Réalisation des cellules solaires à contacts arrière interdigités par le procédé 3	109
2.3.1 Etapes technologiques pour la réalisation des cellules solaires à contacts arrière	

interdigités par le procédé 3 (auto-aligné)	109
3. La cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités à hétérojonction (IBC-SiHJ)	112
3.1 Historique des cellules solaires IBC-SiHJ (Résultats expérimentaux)	112
3.1.1 La structure IBC-SiHJ (Interdigitated Back Contact Silicon Heterojunction).....	113
3.1.2 La structure BEHIND (Back Enhanced Heterostructure with Interdigitated contacts)	113
3.1.3 La cellule IBC-SiHJ non texturés.....	114
3.1.4 La structure RECASH « Rear Contact Amorphous / crystalline Silicon Heterojunction »	115
3.1.5 La structure BACH « Back Amorphous-Crystalline silicon Heterojunction»	115
3.1.6 La structure IBC-SHJ « Interdigitated Back Contact Silicon Heterojunction »	116
3.2 Structure d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction à contacts arrière interdigités IBC-SiHJ	117
3.3 Problématique de la réalisation de la face arrière et la face avant dans une structure solaire interdigitée	118
3.4 Paramètres d'optimisation d'une cellule IBC-SiHJ (étude théorique)	118
3.4.1 Étude du substrat	118
3.4.1.1 Choix du type de substrat dans la littérature	119
3.4.2 Passivation de surface	120
3.4.3 Structuration des jonctions arrière dans une cellule IBC	120
3.4.4 Métallisation	121
Conclusion	122
Références bibliographiques du chapitre III	123

Chapitre IV. Simulation des cellules photovoltaïques à hétérojonction à contacts arrières interdigités

Introduction.....	126
1. Equations fondamentales et modèles physiques utilisés pour la simulation sous SILVACO/ATLAS.....	127
1.1 Equations fondamentales.....	127
1.1.1 Equations de continuité.....	127
1.1.2 Equation de poisson.....	128
1.1.3 Equation de transport	128
1.1.3.1 Diffusion	128
1.1.3.2 Drift	129
2. Modèles physiques utilisés pour la simulation sous Silvaco/Atlas	129
2.1 Modèle de recombinaison Shockley-Read-Hall	129
2.2 Modèle de recombinaison Auger	132
2.3 Modèle de recombinaison en surface	133
2.4 Modèle de Masetti (Mobilité des porteurs dépendant du dopage)	134
2.5 Modèle de Canali (saturation de la vitesse des porteurs dans le champ électrique)	134
2.6 Modèle de BGN- réduction de la bande interdite (Bandgap-Narrowing)	135
2.7 Les modèles optiques	136
3. Simulation numérique d'une cellule solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigités sous Atlas /Silvaco	137
3.1 Structure simulée	137
3.2 Paramètre de la structure simulée (cellule de référence)	138
3.3 Maillage de la structure	140
3.4 Présentation d'une cellule de référence	141
4. Exploitation des résultats de simulation	141
4.1 Optimisation de la structure élémentaire (pitch)	142
4.1.1 L'influence de la largeur de la structure élémentaire (Pitch) sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ	142
4.2 Optimisation géométriques et physiques de la face avant d'une cellule photovoltaïque (IBC-SiHJ)	142
4.2.1 Etude de l'influence de la présence d'une couche antireflet à la surface sur Les performances d'une cellule solaire IBC-SiHJ	145
4.2.1.1 Le dioxyde de silicium SiO ₂	146
4.2.1.2 Le nitrure de silicium SiN	146
4.2.1.3 Doubles couches antireflets DACR (SiO ₂ +SiN)	146

4.2.1.4 Analyse des résultats de l'influence des couches antireflets sur les performances d'une cellule solaire IBC-SiHJ	146
4.2.1.5 Interprétation des résultats de l'amélioration dans les performances d'une cellule IBC-SiHJ due à l'utilisation de double couche antireflet (DCAR)	148
4.2.2 Etude de l'influence de la vitesse de recombinaison et de la couche fortement dopée FSF sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ	148
4.2.2.1 Etude de l'influence de la vitesse de recombinaison face avant sur les performances d'une cellule solaire IBC-SiHJ	148
4.2.2.2 Etude de l'influence de la présence d'une couche fortement dopée à la surface (FSF) sur performances d'une cellule solaire IBC-SiHJ	150
4.3 Influence de substrat sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ	151
4.3.1 Etude de l'influence de la durée de vie des charges minoritaires dans le substrat (qualité du substrat).....	151
4.3.2 Etude de l'influence de la variation des durées de vie sur le rendement quantique RQE	153
4.3.3 Etude de l'influence de la longueur de diffusion sur le rendement d'une cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités IBC-SiHJ	154
4.3.4 Etude de l'influence de l'épaisseur du substrat sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ	155
4.3.5 Etude de l'influence du dopage de substrat sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ	157
4.4 Etude de l'impact des densités d'états d'interface silicium amorphe /silicium cristallin Dans une IBC-SiHJ (cas d'une structure sans couche intrinsèque)	161
4.4.1 Défauts d'interface silicium cristallin / silicium amorphe (c-Si/ a-Si: H).....	161
4.4.2 Influence des défauts d'interface substrat/émetteur sur les performances d'une cellule IBC-SiHJ	162
4.4.3 Influence des défauts d'interface substrat/BSF sur les performances d'une cellule IBC-SiHJ	164
4.4.4 Influence des sections de capture des électrons σ_n , et des trous, σ_p	166
4.4.4.1 Etude de l'influence σ_n et σ_p de l'interface substrat (n) / émetteur (p)	166
4.4.4.2 Etude de l'influence σ_n et σ_p du l'interface substrat(n)/BSF(n)	167
4.5 Optimisation géométrique et physique de la face arrière d'une cellule photovoltaïque (IBC-SiHJ) (structure IBC-SiHJ avec couche intrinsèque)	168
4.5.1 Etude de l'intérêt de la couche intrinsèque de la face arrière sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ.....	168
4.5.2 Etude de l'influence de l'épaisseur, de la largeur de l'émetteur (a-Si :H(p)) et du dopage de l'émetteur sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ	171
4.5.2.1 Variation de l'épaisseur de l'émetteur	171
4.5.2.2 Variation de la largeur de l'émetteur	172
4.5.2.3 Variation du dopage de l'émetteur	174
4.5.3 Etude de l'influence de l'épaisseur, de la largeur du BSF (a-Si :H(n)) et du dopage du BSF sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ	174
4.5.3.1 Variation de l'épaisseur du BSF	175
4.5.3.2 Variation de la largeur du BSF	175
4.5.3.3 Variation du dopage du BSF	176
4.5.4 Influence de l'espacement entre les contacts (émetteur et le BSF) (Gap) sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ	177
4.5.5 Synthèse de cette partie	180
4.6 Etude de l'influence du coefficient de réflexion sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ	181
Conclusion	182
Références bibliographiques du chapitre IV	184
Conclusion générale et perspectives	187



Introduction générale

Introduction générale

Les besoins croissants en énergie et la multiplication des dispositifs électriques ont conduit à diversifier les sources d'approvisionnement. L'utilisation d'une énergie dépend de sa disponibilité et de sa facilité de mise en œuvre. Le soleil est une énergie propre, silencieuse et inépuisable. La conversion électrique de ce formidable potentiel énergétique s'obtient en utilisant des matériaux semi-conducteurs. Ces matériaux devront conduire à un bon rendement et à un faible coût du kW. La difficulté principale étant de trouver un équilibre entre une technologie efficace et un prix raisonnable, tout en contrôlant l'impact environnemental du procédé de fabrication. L'électricité est un vecteur d'énergie qui se stocke difficilement. Son utilisation à grande échelle s'est donc développée sur un modèle centralisé, où les unités de production sont reliées aux consommateurs par un réseau. Au niveau mondial, plus de 80% de l'électricité est produite à partir de combustibles fossiles (67%) et fissiles (15%) non renouvelables [1]. En site isolé (non connecté à un réseau), l'électricité photovoltaïque est en revanche compétitive et donc largement utilisée. C'est pourquoi le photovoltaïque fait l'objet d'un intérêt croissant de la part des pouvoirs publics de pays comme l'Europe, la Chine et plus récemment, les USA, comme le montre la figure 1, la capacité de production d'électricité par des modules photovoltaïque a ainsi connu un très fort développement depuis les années 2000.

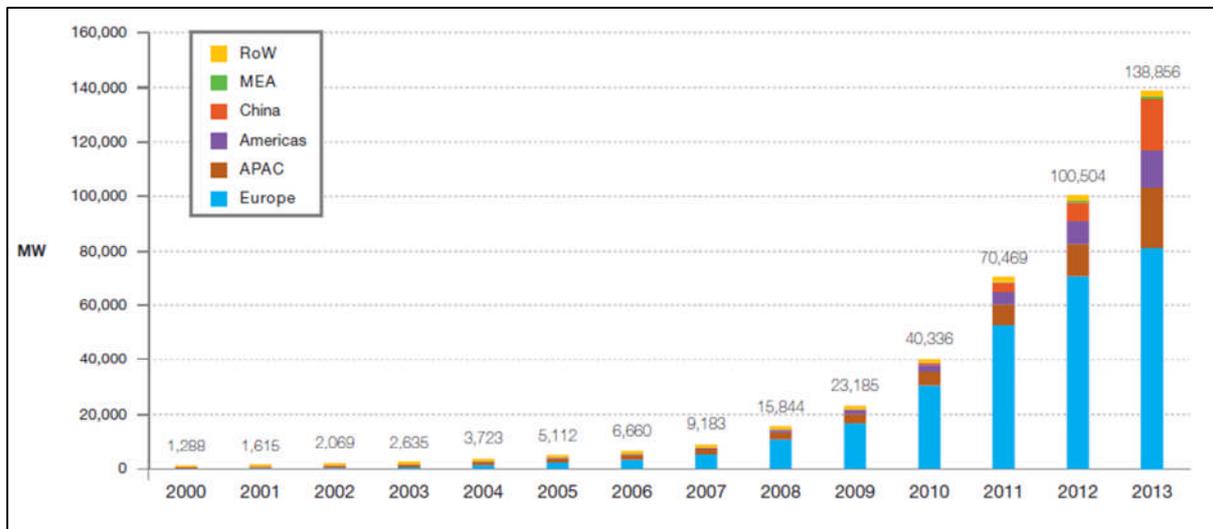


Figure 1. Puissance photovoltaïque globale installée par région du monde 2000-2013 [2]
(RoW: Rest of the World. MEA: Middle East and Africa. APAC: Asia Pacific)

Un système photovoltaïque est constitué de plusieurs modules photovoltaïques composés de cellules interconnectées, ainsi qu'un onduleur chargé de transformer le courant

continu en courant alternatif. L'efficacité du module photovoltaïque est d'abord caractérisée par son rendement, c'est-à-dire l'énergie qu'il produit par rapport à l'énergie lumineuse incidente. Au cours des 20 dernières années, la recherche et le développement dans le domaine de l'énergie solaire a augmenté de façon exponentielle que ce soit en termes d'investissements, de nombre de publications scientifiques, ou de nombre des laboratoires de recherches. Cet intérêt croissant pour les cellules solaires à haut rendement peut être attribué aux progrès technologiques importants dans le domaine de la microélectronique (développements dans l'industrie des semi-conducteurs, transducteurs de plus en plus performants et miniaturisés...), des matériaux (matériaux nouveaux...). Aujourd'hui la technologie la plus répandue reste celle qui utilise le silicium comme matériau actif, actuellement c'est le matériau le plus utilisé pour la conversion photovoltaïque ; sa disponibilité et le savoir-faire sur le procédé acquis grâce à l'industrie microélectronique qui en font un matériau optimal. Cette technologie existe depuis environ 50 ans et constitue actuellement plus de 80% des ventes au niveau mondial [3]. Les cellules en silicium cristallin (c-Si) permettent d'obtenir les meilleures performances au niveau du module avec 13 à 15% de rendement en moyenne. Cette technologie est bien limitée par son coût élevé au niveau industriel. Diminuer le coût de l'électricité photovoltaïque, s'accompagne d'une part avec la diminution du coût du substrat cristallin (c-Si) (l'utilisation des couches minces) et d'autre part par l'augmentation du rendement des cellules. Le fait d'utiliser des cellules d'un rendement de conversion plus haut dans les modules photovoltaïques permet de diminuer le coût du système complet. De nombreuses recherches ont été menées depuis les années 1980 pour améliorer le rendement des cellules photovoltaïques en silicium cristallin (c-Si) vers leur limite théorique de 29% [4]. Trois structures de cellules ont démontré leur potentiel pour atteindre de très hauts rendements sur des substrats de silicium de bonne qualité (monocristallin) : comme par exemple la structure PERL (Passivated Emitter Rear Locally Diffused) qui a été développée par UNSW (University of New South Wales, Australie) sur le modèle de la cellule standard à base de silicium cristallin (c-Si) de type p, avec un rendement expérimental de 24.7% sur une cellule de 4 cm² [5]. Un autre type de cellules à haut rendement : la cellule solaire à hétérojonction en silicium (Si-HJ) qui est une combinaison entre le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) et le silicium cristallin (c-Si). Cette structure, découverte par Fuhs et al en 1974 [6], a été développée par Sanyo depuis les années 1990. La structure à contacts arrière interdigités IBC (Interdigitated Back Contacts) où des cellules ont été fabriquées avec un rendement moyen de 22.4%.

La combinaison des deux dernières technologies a donné naissance à une nouvelle structure : les cellules photovoltaïques en silicium à hétérojonctions à contacts arrière interdigités (IBC-SiHJ). Ce dernier type de cellules permettrait théoriquement de réduire les pertes optiques et la résistivité dans la cellule solaire. Tout en limitant les recombinaisons de surface, cette innovante structure est le sujet de cette thèse. Le fort potentiel des cellules photovoltaïques en silicium à hétérojonction à contacts arrière interdigités (IBC-SiHJ) justifie notre étude visant à développer cette structure sur le silicium cristallin (c-Si) de type n, principalement du point de vue modélisation.

Ce travail se décompose en quatre chapitres plus un état de l'art sur les deux matériaux utilisés (silicium amorphe et silicium cristallin) ainsi qu'une partie « conclusion et perspectives» qui synthétise l'ensemble des résultats et donne quelques pistes de recherches à court et à long terme sur les cellules photovoltaïques à haut rendement.

L'état de l'art s'attache à souligner le rôle de la technologie du silicium amorphe et cristallin comme matériaux de base pour la fabrication des cellules photovoltaïques.

Le chapitre I est un rappel sur les notions principales de l'énergie solaire et le principe de fonctionnement des cellules solaires conventionnelles.

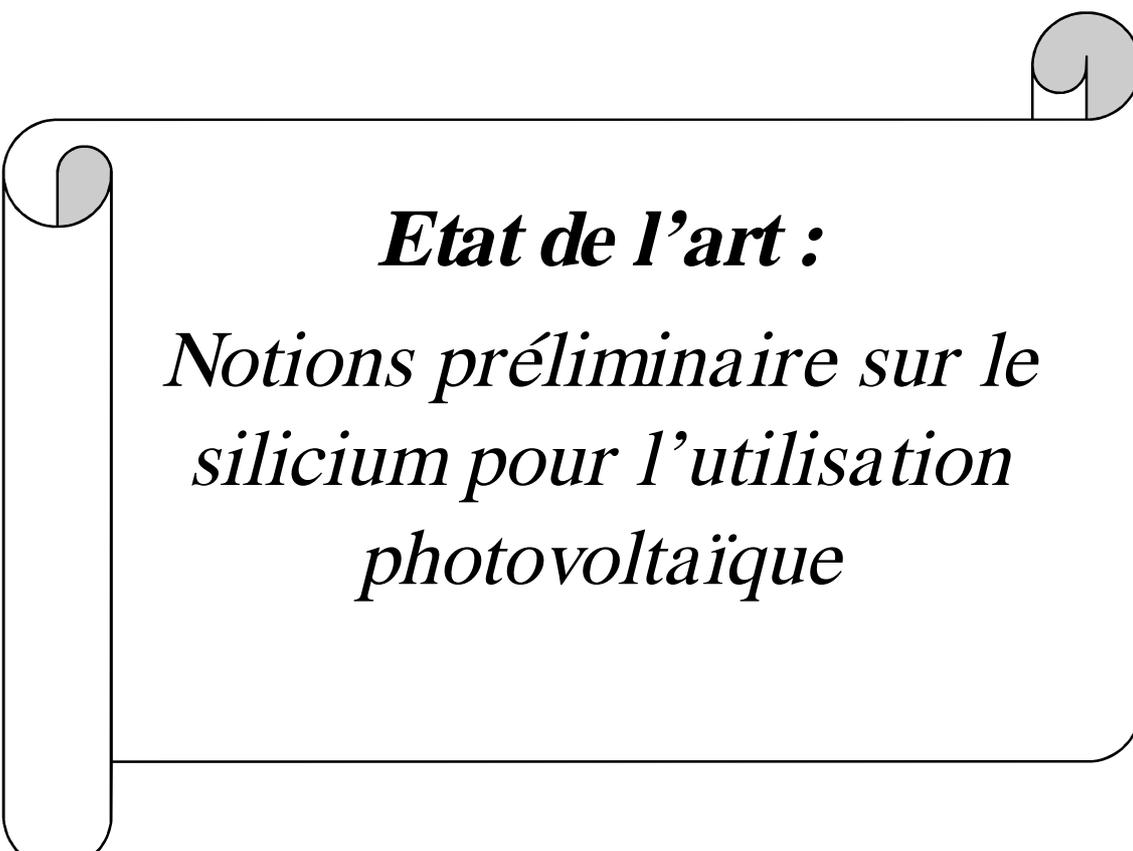
Le chapitre II est l'étude des différentes technologies se basant sur les cellules solaires à haut rendement. Nous détaillons la théorie des cellules photovoltaïques à hétérojonctions (Si-HJ) silicium amorphe/silicium cristallin (a-Si:H/c-Si). Ainsi on aura un aperçu sur des cellules à hétérojonctions à contacts arrière interdigités IBC, en plus d'une présentation de quelques méthodes de caractérisations.

Le chapitre III sera consacré à une étude théorique sur les cellules solaires à contacts arrière (IBC) interdigités y compris la structure de cellule solaire en silicium à hétérojonction à contacts arrière interdigités (IBC-SiHJ)

Finalement le chapitre IV sera consacré à la simulation de la cellule solaire en silicium à hétérojonction à contacts arrière interdigités (IBC-SiHJ). Une étude approfondie sur l'influence des différents paramètres géométriques (liés à la structure utilisée) et physique sera menée afin de comprendre le fonctionnement de ce type de cellules pour atteindre un rendement maximal. Nous nous intéressons à l'optimisation grâce à la simulation par le simulateur numérique Atlas/Silvaco qui peut nous aider à déterminer des paramètres critiques des cellules photovoltaïques à hétérojonctions à contacts arrière interdigités afin d'augmenter le rendement et par suite diminuer le prix.

Références bibliographiques de l'introduction générale

- [1] JM. Jancovici « **Ne suffit-il pas d'attendre d'avoir moins d'énergie fossile ?** » Disponible sur <http://www.manicore.com/documentation/serre/fossile.html>, (2008).
- [2] EPIA (European Photovoltaic Industry Association) « **Global market outlook for photovoltaics 2014-2018.** », Disponible sur <http://www.epia.org/publications/epia-publications.html>, (2014).
- [3] EPIA (European Photovoltaic Industry Association). « **Solar Generation V – 2008, Solar electricity for over one billion people and two million jobs by 2020** ». Disponible sur <http://www.epia.org/publications/epia-publications.html>, (2008).
- [4] MJ. Kerr, P. Campbell, A.Cuevas « **Lifetime and efficiency limits of crystalline silicon solar cells.** » Conference Record of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, USA, pages 438- 441, (2002).
- [5] J.Zhao, A.Wang, MA. Green « **24.5% Efficiency silicon PERT cells on CZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates** ». Progress in Photovoltaics: Research and Applications, volume 7, numéro 6, pages 471-474, (1999).
- [6] W.Fuhs « **Heterojunctions of Amorphous Silicon and Silicon Single Crystals** » Proceedings of the International Conference on Tetrahedrally Bonded Amorphous Semiconductors, New York, USA, pages 345-350, (1974).



Etat de l'art :

*Notions préliminaire sur le
silicium pour l'utilisation
photovoltaïque*

Etat de l'art. Notions préliminaire sur le silicium pour l'utilisation photovoltaïque

Introduction

Le silicium fut découvert en 1824 par J.J. Berzelius à Stockholm, en Suède [1], c'est l'élément le plus abondant de la terre après le carbone, non toxique. On le trouve généralement sous forme de silicate dans de nombreuses roches, argiles et terres.

Le silicium est un élément chimique de la famille des cristallogènes de symbole Si et de numéro atomique 14, il possède 4 électrons sur sa couche périphérique car il appartient à la 4^{ème} colonne de la classification périodique des éléments [2]. Il est possible de le produire avec un haut degré de pureté. Comme matériau de base, ce dernier reste le mieux placé pour un développement des cellules photovoltaïques à large échelle. Beaucoup d'efforts sont investis actuellement dans l'augmentation des capacités et de production de silicium de qualité électronique ou dans le développement de techniques de purification de silicium métallurgique à moindre coût. Pour atteindre ce but, nous devons en premier lieu faire une étude élargie sur ce matériau afin de déduire ses meilleures performances.

1. Aperçus sur la structure cristalline et la structure amorphe

Suivant les conditions dans lesquelles la matière condensée s'est formée, elle peut prendre deux états solides différents :

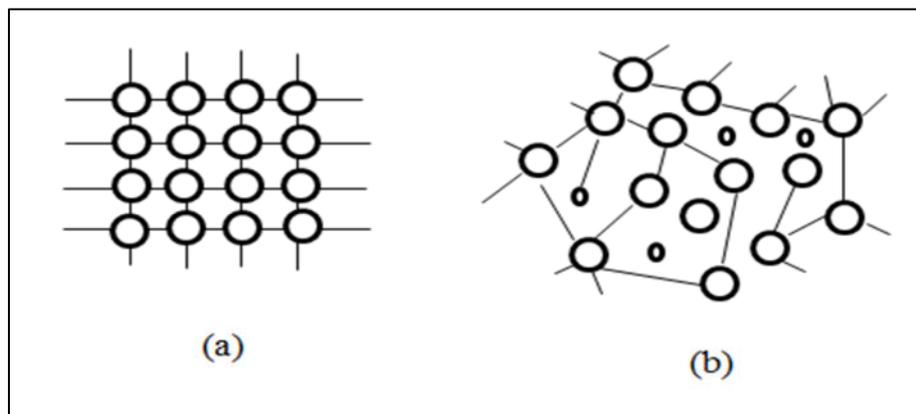


Figure 1. Représentation schématique de la structure cristalline du silicium (a) et de la structure amorphe du silicium (b). [3]

1.1 Un état dit amorphe

La disposition des atomes est aléatoire, les solides amorphes sont généralement appelés des verres et considérés comme des liquides de haute viscosité.

1.2 Un état cristallisé

Caractérisé par un arrangement régulier et périodique des atomes, les solides cristallisés peuvent former :

1.2.1 Des monocristaux

Si la périodicité est ininterrompue dans tout le volume.

1.2.2 Poly-cristaux

S'il existe une périodicité locale et que le solide est composé d'un ensemble de grains cristallins de taille à peu près uniforme, le résultat est un ensemble ordonné, ou localement ordonné, des noyaux d'atomes et d'électrons liés entre eux par des forces principalement coulombiennes.

2. Obtention d'un silicium de qualité électronique

Le silicium est l'élément le plus répandu à la surface du globe, il représente près de 28 % de la croûte terrestre. Cependant il n'existe pas à l'état massif, mais sous forme d'oxydes « la silice ou de silicates », qui sont des composés chimiquement stables. Grâce au développement de l'industrie microélectronique, les propriétés et les procédés de transformation du silicium sont assez bien connus : l'Oxyde naturel (SiO_2) présente d'excellentes propriétés isolantes et passivantes. Son seul véritable inconvénient est son gap indirect à 1,1 eV qui entraîne une absorption du rayonnement plus faible [4]. Donc le silicium sous forme oxydée (silice, sable) nécessite d'une part d'être réduit et d'autre part d'être purifié afin d'obtenir un matériau de qualité électronique ; notons que la silice contenue dans le quartz est la plus utilisée dans l'industrie photovoltaïque.

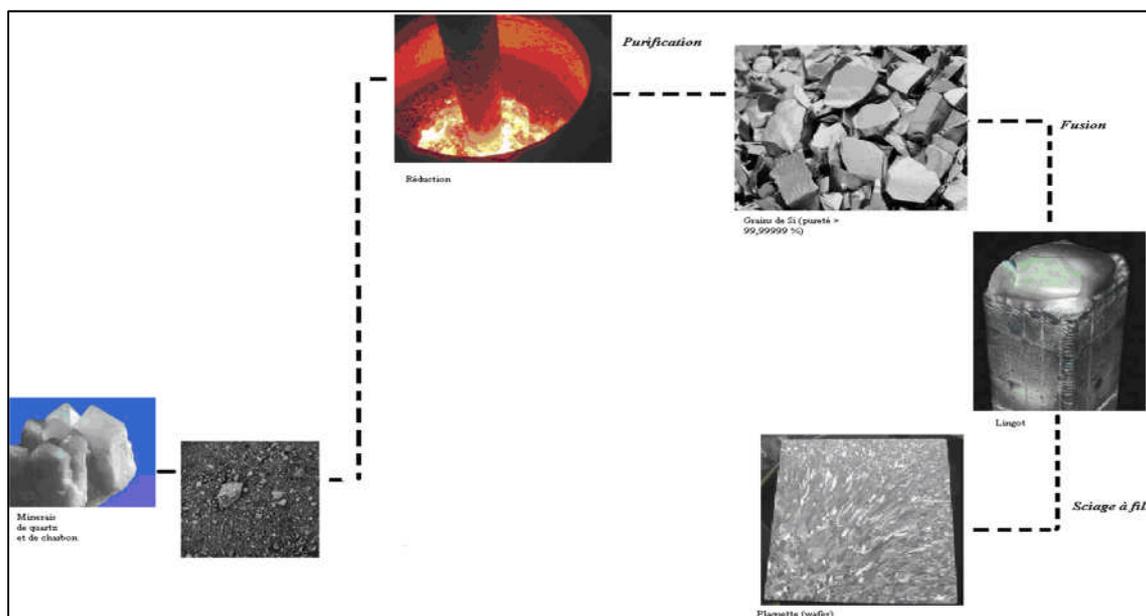


Figure 2. Production des plaquettes de silicium de qualité électronique

La production de silicium par la réduction de la silice, sa purification et l'élaboration des lingots dans lesquels seront ensuite découpées en des plaquettes, nécessitent des étapes attentives (voir la figure 2).

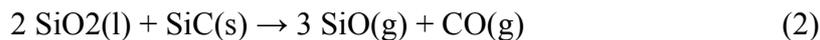
2.1 Réduction de la silice

Le silicium dit « métallurgique » est obtenu par la réduction de la silice. La procédure à suivre est la suivante : mettre la silice avec le carbone dans un four à arc à haute température. La silice fond à 1710°C et le refroidissement lent de la silice fondue donne un solide amorphe dont l'apparence est celle du verre : c'est le verre de silice qui a une forme sans ordre à longue distance. La réaction globale s'écrit :



En fait, la réaction est plus complexe et on peut schématiquement décomposer le four électrique en deux zones : une zone inférieure chaude où la température dépasse 1900 °C et une zone supérieure plus froide.

Dans la zone chaude, on a les réactions suivantes :



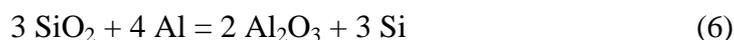
Et dans la zone froide :



On obtient ainsi un silicium de qualité métallurgique dont les principales impuretés sont dues soit au procédé lui-même SiC et SiO₂ soit, aux impuretés contenues dans les matières premières, c'est le cas des impuretés métalliques et des dopants comme le bore et le phosphore. Le taux d'impureté dans ce silicium métallurgique est généralement compris entre 0,5 et 2 %. Si a priori n'importe quelle silice et n'importe quel réducteur carboné peuvent être utilisés. Le fonctionnement fiable et énergétiquement efficace d'un four à silicium impose un choix précis des matières premières. Il est par exemple exclu d'utiliser du sable, fut-il de grande pureté, car on a alors un colmatage du four et une très mauvaise circulation de gaz dans la charge.

Remarque

Une autre filière consiste à réduire la silice par l'aluminium suivant cette réaction :

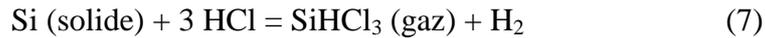


Le silicium produit pour la fabrication de cellules solaires, doit se faire par un procédé qui réduit les impuretés qui sont nuisibles pour cette application.

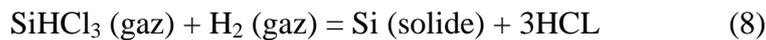
2.2 Purification du silicium

Le silicium de qualité électronique exige une grande pureté. La purification du silicium ne s'effectue pas en vue de produire spécialement des cellules solaires, mais dans l'ensemble des composants semi-conducteurs au silicium. Il existe de nombreuses techniques de purification.

On va effectuer une purification chimique, une des méthodes qui consiste à faire une distillation à partir de SiHCl_3 (trichlorosilane) liquide à température ambiante



Le rendement de la réaction est égal à 90%. On a effectué une première purification car des précipités chlorures ne se mélangent pas au trichlorosilane. Puis SiHCl_3 (qui a une température d'ébullition faible (31.8°C) est purifié par distillation fractionnée, il est plus volatil que les chlorures des principales impuretés. Ce trichlorosilane purifié est ensuite réduit pour redonner du silicium.



Après la distillation, les impuretés actives sont réduites, le silicium est alors de bonne qualité électronique, donc le silicium obtenu est pur (intrinsèque) et doit maintenant subir un double traitement à la fois d'enrichissement en matériau dopant afin d'en faire du silicium extrinsèque de type p ou n comportant une proportion d'une impureté connue, et d'obtenir de plus un monocristal convenablement orienté. En effet, le silicium précédemment obtenu était polycristallin ; il y a nécessité de le transformer en monocristallin pour améliorer sa conductivité. Cette opération est réalisée dans un four à tirage selon la procédure de Czochralski.

3. Différents types de silicium

Le silicium utilisé pour les cellules photovoltaïques doit être d'une grande pureté, quel que soit sa forme. Comme beaucoup d'autres éléments, le silicium peut exister à température ambiante sous différentes structures, dont les deux extrêmes sont respectivement l'état amorphe et l'état cristallin (monocristallin ou multicristallin). En fait, ces deux filières de silicium en étaient jusqu'à récemment complètement découplées : la filière du silicium massif (matériau cristallin) et la filière du silicium en couches minces (matériau désordonné). Alors que la première est toujours dominante au niveau industriel ; la majorité des panneaux photovoltaïques sur le marché étant constitués de silicium multicristallin ; la seconde est considérée comme plus porteuse pour l'avenir.

3.1 Le silicium cristallin

3.1.1 Production du silicium cristallin

On obtient le silicium cristallin par un refroidissement lent de silicium fondu [5]. Cette opération se fait dans une atmosphère gazeuse contrôlée pour éviter de réintroduire des impuretés. Avant la solidification, on dope le silicium en incorporant une quantité précise de phosphore (pour le dopage n) ou de bore (pour le dopage p). La solidification doit se faire progressivement. Le processus contribue aussi à la purification du silicium : les impuretés ont tendance à se rassembler dans la zone qui reste liquide. On peut donc déclasser le liquide résiduel ou la partie solidifiée en dernier lieu. En fait, lorsque la cristallisation est faite dans le cadre de l'industrie de l'électronique, la partie déclassée peut servir de matériau de départ pour l'industrie des cellules solaires. Dans ce cas, le matériau de départ est déjà dopé.

Il existe deux types de technique de cristallisation, selon que l'on veut produire du silicium mono ou poly-cristallin.

3.1.1.1 Procédé de Czochralski pour la fabrication de silicium monocristallin

Pour produire du silicium monocristallin, on utilise la même technique que dans l'industrie, des composants électroniques. 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 [6][7]. On tire lentement le germe vers le haut, avec un mouvement de rotation, tout en contrôlant minutieusement la température et la vitesse. (La vitesse de tirage est de l'ordre de 4 cm/heure).

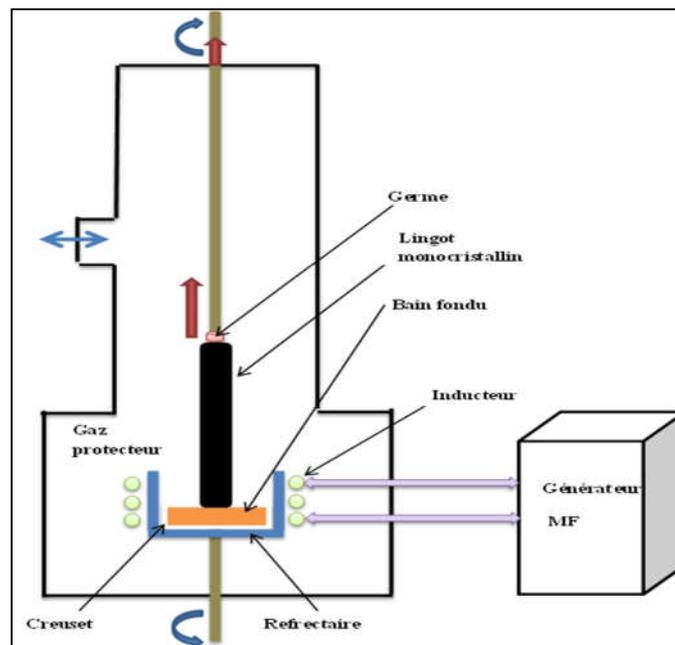


Figure 3. Méthode de Czochralski [6]

La figure 4 présente deux cristaux obtenus par la méthode Czochralski: le premier à un diamètre de 150mm, le second à un diamètre de 200mm [8]



Figure 4. Deux lingots de silicium monocristallin [8]

Cependant, les simples cristaux de silicium développés par la méthode de Czochralski contiennent des impuretés puisque le creuset qui contient la fonte se dissout. Cette technologie permet lors de la phase de refroidissement du silicium fondu de le solidifier en formant un cristal unique de dimension importante et d'une très grande pureté. Celui-ci est ensuite découpé en plaquettes converties en cellules, d'un bleu électrique et reconnaissable à leurs bords coupés pour une meilleure intégration au module. Le silicium monocristallin a l'avantage des meilleures performances en termes de rendement sous un éclairage direct, de l'ordre de 15 à 16 %. En revanche, le silicium monocristallin a un coût de production élevé, aussi, ces performances se réduisent dès lors que les conditions d'ensoleillement se dégradent [9].

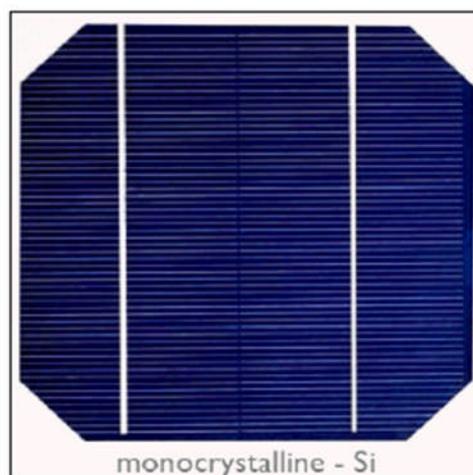


Figure 5. Silicium monocristallin

Donc la réalisation de nombreux dispositifs comme les cellules solaires commence par la production d'une matière monocristalline de grande pureté.

3.1.1.2 Procédés de fabrication du silicium polycristallin (multicristallin)

Si on se contente de silicium polycristallin, une méthode possible consiste à utiliser un four semblable à celui, ci-dessus, mais avec un creuset de forme parallélépipédique (souvent à base carrée). On refroidit le creuset par le bas, par exemple, en le faisant descendre progressivement hors de l'élément chauffant, comme indiqué à la figure ci-dessous.

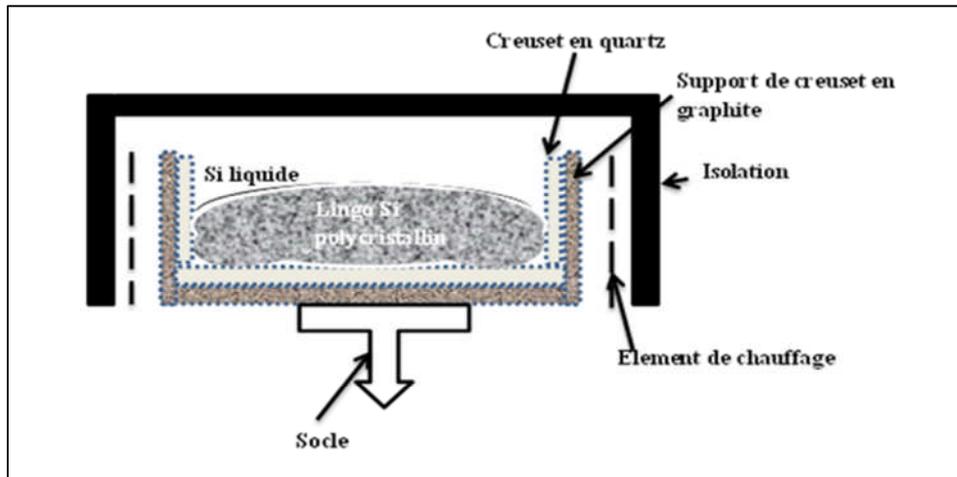


Figure 6. Fabrication de lingots de Si polycristallin [5]

Une méthode moins coûteuse consiste à couler le silicium liquide dans des conteneurs en graphite réutilisables [4]. Le refroidissement se fait sur toute la surface interne du conteneur. La régularité de la colonne des grains est moins bonne que dans le cas précédent. Donc, contrairement au précédent, le procédé technologique provoqué pendant le refroidissement consécutif à la fusion, créé la formation de plusieurs cristaux de silicium. La cellule photovoltaïque produite par cette filière se singularise par un aspect bleu électrique non uniforme, laissant apercevoir les motifs créés par les divers cristaux.

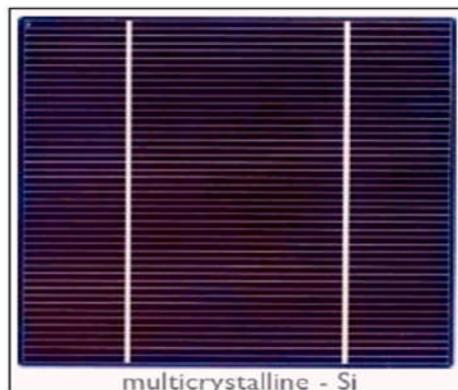


Figure 7. Silicium multicristallin

Donc le refroidissement directionnel d'une masse de silicium en fusion peut réaliser d'un seul coup un lingot de grandes dimensions. Le lingot obtenu est composé de plusieurs

gros cristaux, séparés par des joints de grain. Ce matériau, moins homogène que le silicium monocristallin, a de ce fait un rendement énergétique légèrement moins bon (13%) et moins coûteux dans le commerce ; et sa fabrication est plus facile. Ces lingots de silicium multicristallin doivent être eux aussi coupés en tranches de 200 à 500 mm, grâce cette fois-ci à une scie à fil.

3.1.2 Préparation des plaquettes de silicium cristallin

3.1.2.1 Orientation et découpage

Les blocs de silicium mono ou poly-cristallin doivent être découpés en tranches de 200 à 500 microns d'épaisseur [10]. Si le bloc a été réalisé par la méthode de Czochralski, on obtient ainsi des disques. Ceux qui sont destinés à la fabrication de cellules solaires sont souvent découpés pour obtenir une forme plus carrée (mais avec des angles arrondis, résultat d'un compromis entre le désir de ne pas avoir trop de chutes et celui de pouvoir disposer les cellules côte à côte sans perdre de place). On peut aussi fabriquer des cellules rondes.

Au contraire, les lingots polycristallins sont d'abord découpés en bloc parallélépipédiques puis en substrats parfaitement rectangulaires.

De plus, le nombre de cellules produites n'est pas inversement proportionnel à l'épaisseur des tranches parce qu'il faut tenir compte de l'épaisseur du trait de scie.

Alors on enlève les deux bouts du lingot du four de croissance ou le bout supérieur qui sert à constituer le germe monocristallin pour une autre croissance et le bout inférieur qui possède une concentration d'impureté plus importante. Le lingot doit être parfaitement rond ; c'est la raison pour laquelle on le rectifie au bon diamètre sur un tour. L'orientation cristalline du lingot est déterminée grâce à un appareil aux rayons X. A savoir que cette orientation est nécessaire pour les étapes de fabrication. Un monocristal se coupe le long d'un de ses plans réticulaires. L'orientation utilise les indices de Miller.

3.1.2.2 Découpage et polissage

La technique de découpe traditionnelle utilisait une scie annulaire diamantée (voir la figure 8)

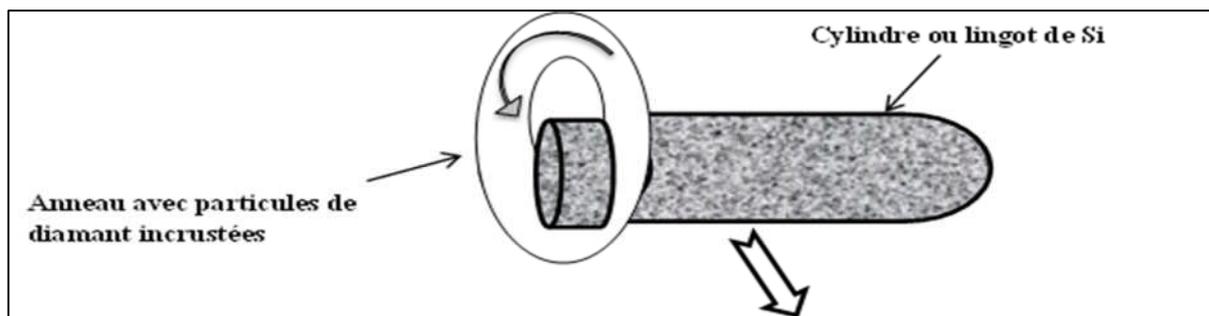


Figure 8. Utilisation d'une scie annulaire diamantée [5]

Actuellement, on utilise une "scie à fils". C'est un fil d'acier d'environ 180 microns de diamètre et 150 km de longueur. Il progresse à une vitesse de 10 cm/s et est enroulé de façon à pouvoir découper jusqu'à 400 substrats en même temps (voir figure 9).

La découpe se fait grâce à la pulvérisation d'un lubrifiant chargé de grains durs de SiC de 10 à 20 microns. La perte de matière est importante, car le "trait de scie" a une largeur d'environ 200 microns. Le gain obtenu réduisant l'épaisseur des substrats est donc limité.

Donc on peut dire que le sciage des plaquettes à partir d'un lingot nécessite une scie à fil diamantée à diamètre intérieur, afin de provoquer le minimum de casse.

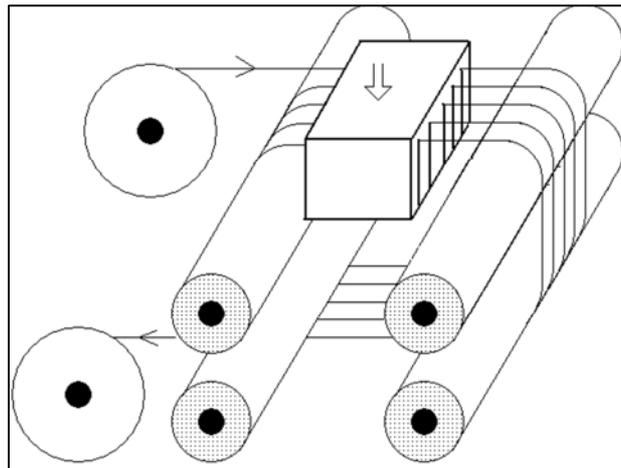


Figure 9. Principe d'une scie à fils pour le découpage des substrats de silicium

Le lingot à scier est collé par son méplat primaire sur une barre pour bien maintenir les plaquettes lors du sciage. Il existe aussi d'autres types de scies à fil diamanté. Pour finir, on enlève des échantillons du lot pour les tester et les mesurer à savoir le diamètre, la planéité et l'épaisseur. On vérifie aussi l'homogénéité de la résistance. Après le sciage, les plaquettes sont nettoyées à l'eau dèionisée ; ensuite, elles subissent un rodage mécanique à la poudre d'alumine. On les charge dans une machine à action orbitale où elles tournent entre deux surfaces lubrifiées avec de la poudre d'alumine. Ce qui diminue les irrégularités à la surface (inférieures à 3 microns).

Il existe aussi plusieurs autres solutions alternatives qui évitent le sciage de blocs, mais on se contente de citer seulement ces deux solutions intéressantes.

- *Solution alternative par tirage de rubans :*

On peut aussi tirer des rubans de silicium de la dimension voulue directement au départ de la phase liquide. On économise ainsi de la matière de l'opération de découpe. Par contre, la purification est moins poussée et la cristallisation moins bonne. Ce procédé est donc peu utilisé. Il existe plusieurs méthodes et (La figure 10) illustre l'une d'elles.

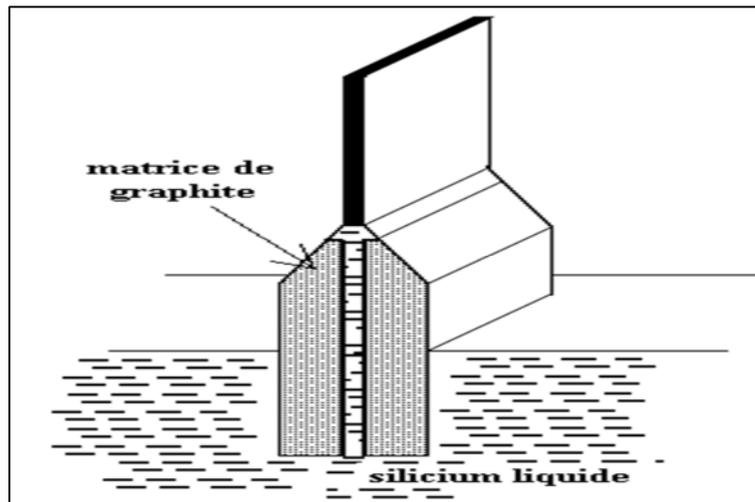


Figure 10. Tirage d'un ruban de silicium en filière [5]

- *Solutions alternatives par dépôt de couche mince :*

On peut encore réduire le nombre d'étapes de la fabrication en cristallisant directement une mince couche de silicium sur un support. Pour obtenir du silicium cristallin, il faut que ce support soit porté à température élevée ($> 800^{\circ}\text{C}$) : ce qui conduit à utiliser comme support des céramiques, des substrats de silicium bon marché, des alliages de silicium. Ce support peut être couvert d'une couche destinée à réduire la diffusion des impuretés du support et à réfléchir la partie de la lumière qui traversera la cellule sans être absorbée ; ce qui lui donnera une seconde chance. On doit obtenir une couche de silicium polycristallin d'au moins 20 microns d'épaisseur parce que le silicium cristallin est relativement transparent et que des cellules plus minces n'absorberaient pas suffisamment la lumière malgré la couche réfléchissante citée ci-dessus.

3.1.2.3 Défauts cristallins dans le Silicium

Souvent un lingot monocristallin présente plusieurs défauts ; ces défauts peuvent avoir une influence sur le rendement. Les défauts les plus importants sont les dislocations. Ce sont aussi les imperfections dans la structure locale du cristal qui sont généralement dues à la présence de certaines impuretés. Les défauts intrinsèques et les dopants induisent l'existence de niveaux localisés dans la bande interdite. Ce qui implique la naissance de la photoconductivité à cause des transitions électroniques.

3.2 Le silicium amorphe

3.2.1 Définition du silicium amorphe hydrogéné

Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) est un matériau issu de la famille des semi-conducteurs; cette forme de semi-conducteurs a été découverte vers le début des années soixante; dans un premier temps elle n'était pas utilisable car elle avait beaucoup trop de

défauts, mais vers la fin des années soixante, Chittick observa qu'en déposant le silicium amorphe par un plasma de (SiH_4) , plus de 99.9 % des défauts étaient saturés par l'hydrogène ce qui rendait ce matériau utilisable comme semi-conducteur. Dès cette découverte, il fit l'objet de nombreuses recherches.

La combinaison du silicium et d'hydrogène permet de former le silicium amorphe, matériau semi-conducteur qui a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, vitreuse. Un dépôt d'épaisseur inférieure à un micron permet d'absorber le spectre solaire car il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieur au silicium cristallin [8] donc, le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) se caractérise par sa structure désordonnée comparée à celle du silicium cristallin comme illustré sur la figure 11.

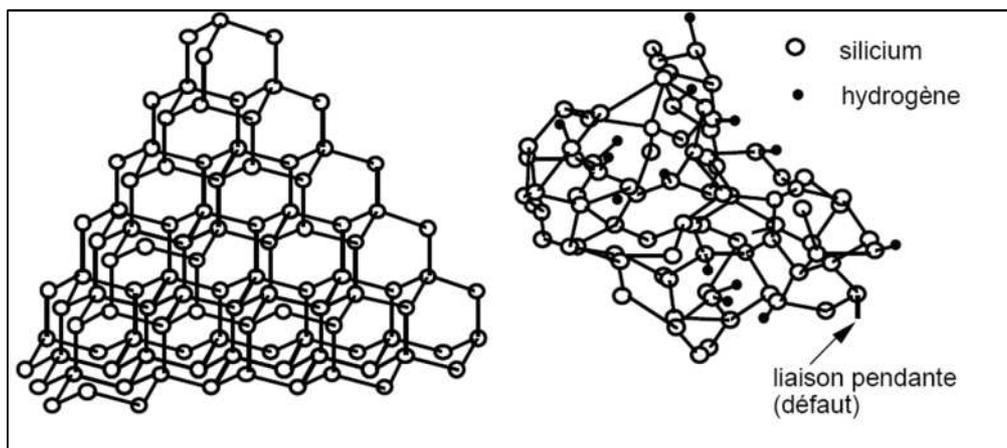


Figure 11. Représentation schématique de la structure cristalline du silicium (a) et de la structure amorphe du silicium (b) [9]

3.2.2 Propriétés électroniques du silicium amorphe

Malgré cette structure de réseau aléatoire, la physique des semi-conducteurs considérant les bandes de valence et les bandes de conduction s'applique. Cependant, certaines liaisons entre les atomes de silicium sont rompues et forment des liaisons pendantes. La notion de défauts est alors différente de celle du silicium cristallin.

Dans le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), un atome de silicium peut avoir une coordination « membres de liaisons avec ses plus proches voisins de 3 ou 5 ». Il apparaît donc des liaisons pendantes ou flottantes. Une grande partie de ses défauts, près de 99,99%, sont passivés par l'hydrogène qui permet de diminuer la densité de défauts de 10^{21} cm^{-3} à $10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ [10].

La structure de silicium amorphe a une incidence directe sur ses propriétés électroniques et optiques. La structure de bande du silicium amorphe est décrite par la densité d'états d'énergie disponible. L'hydrogène est nécessaire pour améliorer la qualité du

matériau (il limite le nombre de défauts en saturant les liaisons pendantes de silicium présentes à cause de la structure désordonnée).

Le diagramme de bande du silicium amorphe est représenté sur la figure 12. Les principales différences par rapport au silicium cristallin sont l'asymétrie des bandes de valences, des bandes conduction et les états dans la bande interdite. Ces états proviennent des défauts non saturés par l'Hydrogène. Ils peuvent avoir trois états différents:

- Aucun électron (D^+) donc, une charge positive.
- Un électron (D^0) donc, neutre.
- Deux électrons (D^-) donc, une charge négative.

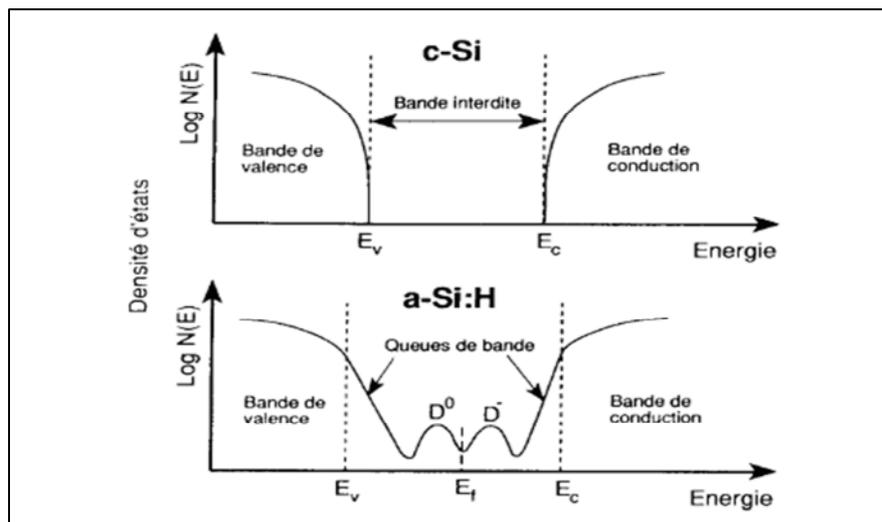


Figure 12. Diagrammes de bande du silicium amorphe hydrogéné et du silicium cristallin [9]

Il faut remarquer que ces défauts peuvent être neutres, chargés positivement ou négativement. Dans le cas où ils ne sont pas neutres, ils influenceront directement sur la répartition du champ électrique interne conformément à la loi de Poisson.

3.2.3 Particularités

Le silicium amorphe est un matériau souvent comparé au silicium cristallin car il est formé du même matériau (le silicium) et fait partie de la famille des semi-conducteurs. Par contre, il se distingue de son « homologue » cristallin par des avantages et inconvénients.

3.2.3.1 Avantages de silicium amorphe

- Possibilité de le déposer sur des grandes surfaces il n'y a plus de limitation de taille du wafer (macro-électronique).
- Possibilité de le déposer sur des surfaces non planes ou souples: intéressant pour la déposition sur cylindres ou sphères (axes de symétrie).

- Facilité de fabrication et technologie basse température (<300°C). Au point de vue de sa fabrication, le silicium amorphe est avantageux, il est précipité à une température de 250°C. On peut donc utiliser des supports bon marché et en particulier le verre qui peut constituer la face avant du module ; à condition d'avoir été préalablement couvert d'un conducteur transparent. Le fait que la température de fabrication soit plus basse diminue aussi la consommation d'énergie lors de la fabrication.
- Forte absorption de la lumière visible.
- Bande interdite plus élevée (1,8 eV contre 1,1 eV pour le silicium cristallin) permettant d'obtenir des courants inverses dans l'obscurité plus faibles.
- Un autre avantage tient au fait que le silicium amorphe est plus opaque à la lumière que le silicium cristallin. Ceci permet de réaliser les cellules avec des couches plus minces. Par conséquent on peut économiser de la matière.

3.2.3.2 Inconvénients de silicium amorphe

- Beaucoup de défauts dans la structure.
- Faible mobilité des porteurs libres.

3.2.4 Applications

Après comparaison des avantages multiples du silicium amorphe et des inconvénients cités ci-dessus, il ne faut pas conclure que ce matériau va remplacer le silicium cristallin dans un proche avenir. Par contre, il est possible de tirer parti de certains avantages du silicium amorphe afin de développer de nouvelles applications pour lesquelles le silicium cristallin ne peut être ou est difficilement utilisable ; principalement les technologies qui nécessitent des grandes surfaces. La plus connue de ces applications est la cellule photovoltaïque utilisée le plus souvent dans des alimentations qui nécessitent de petites puissances. Ce type de cellules solaires est assez répandu dans les calculatrices, les montres ou les chargeurs de batteries. De tels dispositifs sont réalisés par une structure de diode. La mise en contact de deux couches dopées provoque la création d'un champ électrique. En comparaison avec les cellules cristallines, la seule différence essentielle d'une cellule amorphe réside dans le fait que les deux zones dopées ne sont pas directement mises en contact: une couche intrinsèque est déposée entre ces deux couches. Les couches dopées amorphes sont de mauvaise qualité (beaucoup de défauts), les charges créées dans ces couches ne pourront pas être collectées (car la recombinaison domine). La couche intrinsèque est donc nécessaire afin que les paires électron-trou responsables de l'effet photovoltaïque puissent être collectées.

Pour former des hétérojonctions avec le silicium cristallin (c-Si) dont les recherches ont abouti à de très hauts rendements photovoltaïques avec ce type de cellules. Donc

l'empilement monolithique des deux couches (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbant dans des domaines spectraux se chevauchant, en améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines.

3.2.4.1 Avantage :

➤ Sensibilité élevée sur une large plage de longueur d'onde. Excellent rendement.

3.2.4.2 Inconvénient :

➤ Coût élevé dû à la superposition de deux cellules.

4. Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque

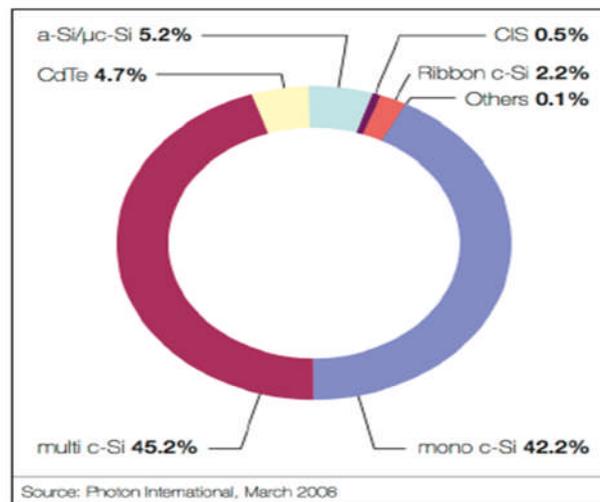


Figure 13. Répartition de la production mondiale (en watt-crête) de modules photovoltaïques suivant les différentes filières, en 2008.

- c-Si : silicium monocristallin.
- mc-Si : silicium multicristallin.
- μ c-Si : silicium microcristallin.
- a-Si : silicium amorphe.
- CIS : diséléniure de cuivre et d'indium.

Ces chiffres basés sur les informations données par de nombreux fournisseurs et experts, et les agences qui collectent les données

Le silicium comme matériau de base dans l'industrie photovoltaïque est prédominant, plus de 90% [11] (voir la figure 13). Ce semi-conducteur présente, différents avantages : facilement extrait à partir du sable, ce qui le rend très abondant sur la terre ; il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs III-V ; il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques et il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore). Son seul véritable inconvénient est son gap indirect à 1,1 eV. Ceci

entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct : pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 100 μm pour le silicium, alors que seulement 1 μm de GaAs suffit. De plus, la largeur de bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du spectre solaire (entre 1 et 1,7 eV) : le GaAs, avec une largeur de bande interdite de 1,38 eV, permet d'accéder à des rendements théoriques plus élevés [12].

Le silicium reste cependant le matériau le plus utilisé dans le photovoltaïque (figure 14). Outre les avantages précités, il bénéficie d'une implantation importante et durable dans l'industrie de la microélectronique. Celle-ci utilise du silicium monocristallin de très haute pureté, obtenu par des méthodes telles que le tirage CZ (Czochralski) [13]. Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, est très coûteux. La part de silicium monocristallin y est plus importante, puisque les modules produits selon cette technologie ont un rendement plus élevé que ceux en silicium multicristallin.

Le silicium multicristallin est quant à lui fabriqué à partir de sources de matériau moins raffinées, mais convient aux processus de l'industrie photovoltaïque : il constitue 45.2% des modules fabriqués en 2003 [11].

Nous présentons ici quelques notions élémentaires relatives à l'intérêt du choix de ce matériau qui est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel.

Une des conséquences du gap indirect est que l'absorption optique est réduite de manière significative dans le visible car l'absorption de photons implique des phonons afin de respecter la conservation de la quantité de mouvement. L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption est traduit par le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde voir (Figure 14).

4.1 Choix du matériau Silicium

L'utilisation du silicium pour la fabrication de modules photovoltaïques se justifie par l'excellente connaissance physique de ce matériau, son abondance sur la croûte terrestre, sa non toxicité et sa stabilité dans le temps, la maîtrise de sa technologie, par l'industrie microélectroniques assurant au final un bon rendement de conversion électrique.

Une largeur de bande interdite plus importante entraîne d'un côté une augmentation du V_{co} (Courant de saturation plus faible) et l'autre, une diminution du courant de court-circuit I_{cc} due à la réduction de l'absorption. Compte tenu de ces évolutions, la largeur de bande

interdite optimale se situe à 1,4 eV. Les matériaux les mieux adaptés pour les applications photovoltaïques sont le GaAs avec un gap de 1,42 eV à 300 K, l'InP avec un gap de 1,27 eV à 300 K et le silicium cristallin avec un gap de 1,12 eV à 300 K. Le silicium n'est pas donc à priori le choix idéal d'autant plus que c'est un semi-conducteur à bande interdite indirecte ce qui limite l'absorption du rayonnement lumineux.

Le silicium bénéficie aussi de son implantation dans l'industrie de la microélectronique. Cette industrie utilise du silicium cristallin de très bonne qualité (grande pureté) et chimiquement stable dans le temps. Ainsi, des techniques de croissance ont été développées pour obtenir cette pureté notamment en réduisant les défauts (dislocations) dans le matériau. La qualité du silicium cristallin est fonction de la technique utilisée pour son élaboration [15]. Nous avons principalement :

- Le silicium monocristallin (c-Si) élaboré avec la technique Float zone (Fz) qui permet d'obtenir des matériaux avec une durée de vie des porteurs allant de 500 μ s à 5 ms [16][15].
- Le silicium monocristallin élaboré avec la technique Czochralski (Cz) qui permet d'obtenir des matériaux avec une durée de vie des porteurs allant de 50 μ s à 500 μ s [17].
- Le silicium multi-cristallin (mc-Si) élaboré à partir de sources de matériaux moins raffinées. Il se caractérise par la présence de joints de grains qui limitent la durée de vie des porteurs (de 1 μ s à 100 μ s).

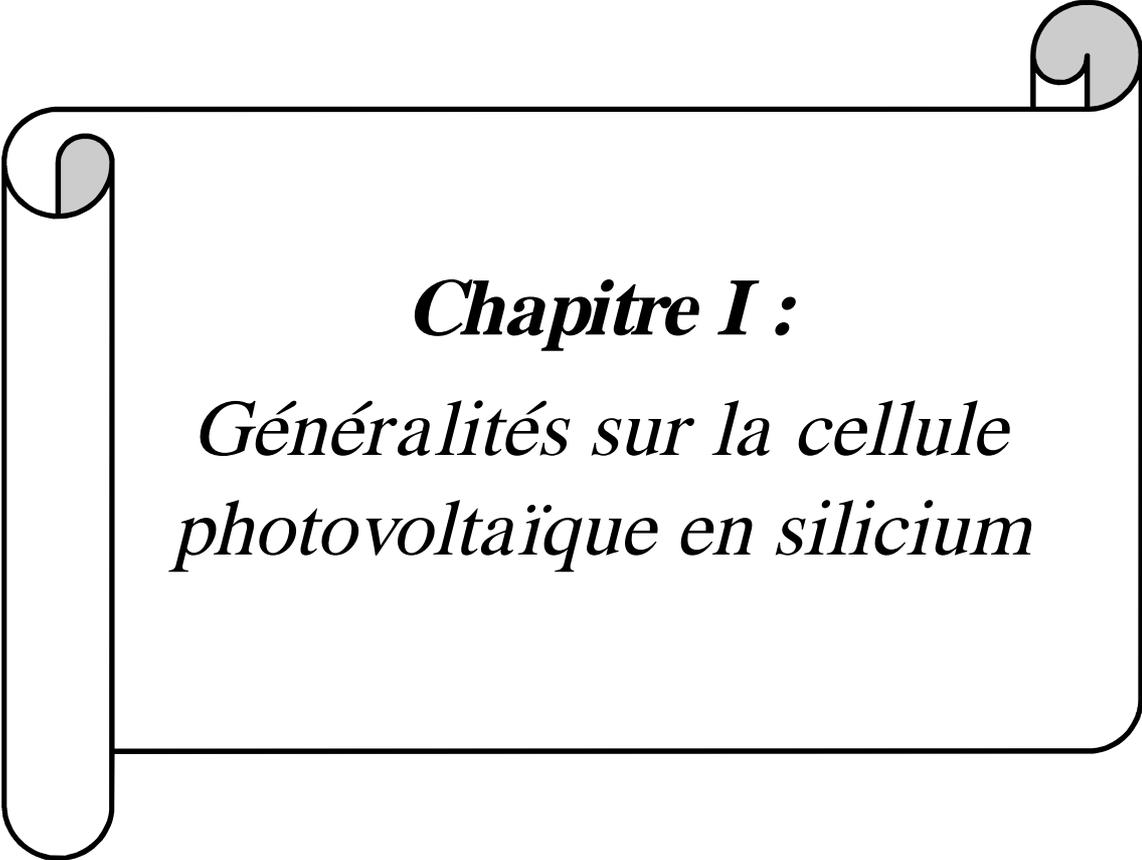
Le silicium multi-cristallin a donc l'avantage d'être moins coûteux que le silicium monocristallin. Cela explique la prédominance des cellules à base de silicium multi-cristallin dans l'industrie photovoltaïque.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu les différents types du silicium sur ces deux états amorphe et cristallin, et les étapes à suivre pour obtenir un silicium de bonne qualité électronique. C'est avec ces techniques qu'on peut avoir des monocristaux de silicium. Enfin, nous avons donné les propriétés physiques du silicium. Le silicium a de nombreuses applications dans diverses industries, spécialement pour les applications photovoltaïques.

Références bibliographiques de l'état de l'art

- [1] <http://www.goodfellow.com/csp/active/static/F/Silicium.html>
- [2] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Silicium>
- [3] La lettre du Solaire, Cythelia Sarl, Avril 2005, Vol 5, n°4
- [4] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, « **Solar Cell Efficiency Progress in photovoltaics** », vol,1G, pp 435-440,(2008)
- [5] <http://www.lei.ucl.ac.be/~matagne/SOLAIRE/SEM13/S13P11.HTM>
- [6] P.H. Haumesser, « **Elaboration Par croissance Czochralski, et Propriétés Laser de Monocristaux Dopés Par l'Ytterbium** », Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, (2000).
- [7] G.C. Joyce, D.T.J. Hurle, Q.QAE. Vaugham, « **Novel Development of the Weighing Methode For Automatic Czochralski, Cristal Growth of Semiconductors.** », Journal of Crystal Growth 132, 1 (1993).
- [8] <http://membres.lycos.fr/energiesoltpe/principe.htm>
- [9] P. Chaploz, « **Les Couches Epaissees en Silicium Amorphe Application Comme Detecteurs de Rayons X** » Thèse N° 1485 de doctorat à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, (1996).
- [10] S. Amtalblian, « **Du transfert de films minces de silicium monocristallin vers un procédé cellule à faible budget thermique.** », Thèse de doctorat à l'Institut des Nanotechnologies de LYON (INL) – INSA de LYON , (2008)
- [11] Observ'ER. «**Baromètre du Solaire Photovoltaïque**». Systèmes Solaires, N° 160, pp.69-83, (Avril 2004).
- [12] O. Nichiporuk « **Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités** », L'institut national des sciences appliquées de Lyon, (2005).
- [13] A. Goetzberger, C. Hebling « **Photovoltaic materials, past, present, future. Solar En.Mat.&Sol.Cells** », Vol. 62, pp. 1-19,(2000).
- [14] S.M. SZE, Semiconductor devices. New York : John Wiley, p.867, (1981).
- [15] D. Diouf « **cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière.** » Thèse de doctorat de l'Université paris-sud11 faculté des science d'oersay, (2010).
- [16] Keck et al, The Review of Scientific Instruments **25**, 331 (1954).
- [17] J. Czochralski, Z. Physik Chem. **92**, 219 (1918).



Chapitre I :
*Généralités sur la cellule
photovoltaïque en silicium*

Chapitre I. Généralités sur la cellule photovoltaïque en silicium

Introduction

Parmi les différentes formes d'énergies, l'énergie photovoltaïque est d'un intérêt important lié à son large domaine d'application. Dans ce premier chapitre, nous étudierons le dispositif fondamental de la conversion photovoltaïque. Nous aborderons ainsi dans une première partie quelques notions sur la source d'énergie durable : le soleil et son application dans le domaine photovoltaïque. Elle est suivie d'une deuxième partie où le principe de fonctionnement de la cellule solaire et leur caractéristique principale sera présentée. Pour cela, nous commencerons par la description de l'outil fondamental de la conversion photovoltaïque constituée par la jonction P-N puis par une analyse des différents mécanismes de transport et de recombinaison ainsi que des phénomènes d'interaction rayonnement/matière. Nous présenterons aussi les paramètres essentiels qui permettent de calculer le rendement ($\eta\%$) d'une cellule solaire à partir de la caractéristique courant-tension. Ensuite, nous expliquerons les différents constituants de base d'une cellule photovoltaïque conventionnelle et nous donnerons les facteurs qui limitent ses performances dans un troisième parti. En fin nous aborderons les cellules photovoltaïques sur couches minces de silicium ainsi qu'une introduction à la technologie des cellules solaires à contacts arrière interdigitée, qui sera détaillé dans les chapitres qui suivent.

1. Notions de base sur le rayonnement solaire et l'effet photovoltaïque

1.1 Rayonnement et spectre solaire

1.1.1 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un facteur important dans la conversion photovoltaïque. Ce rayonnement est celui d'un corps noir à la température 5800 K, ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de $0.5\mu\text{m}$ pour une puissance d'environ $60\text{MW}/\text{m}^2$ soit un total de $9.5 \cdot 10^{25}\text{W}$. En tenant compte de la surface apparente du soleil et de la distance entre celui-ci et la terre, cela conduit à un éclairage moyen dans l'année de $1.36\text{KW}/\text{m}^2$, pour les cellules destinées à fonctionner au sol [1] [2].

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0,2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2,5\mu\text{m}$). Lorsque ce rayonnement solaire traverse l'atmosphère, et à la suite de phénomènes d'absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère (le taux de poussière, d'aérosol, de vapeur d'eau) et par les conditions climatiques, l'altitude du lieu d'observation aussi des gaz comme l'ozone (O_3), le

rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre, et donne un spectre solaire non continu mais qui présente des bandes d'absorption et par conséquent crée une baisse globale de la puissance incidente [2]. Pour pouvoir comparer les performances des cellules solaires et qualifier les différents spectres solaires utilisés, la notion d'Air-masse (AM_m) a été créée. Elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au Zénith. Sa valeur dépend de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux en plus de la pression. L'intégration de l'irradiance sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance P (en $W.m^{-2}$) fournie par le rayonnement. Pour simplifier on utilise les notations suivantes :

AM_0 : Hors atmosphère (pour applications spatiales). $P \approx 1.36 kW.m^{-2}$

AM_1 : Le soleil est au zénith du lieu d'observation (distance minimum à parcourir par les photons à travers l'atmosphère).

$AM_{1.5G}$: Spectre standard, le soleil est à 48° . $P \approx 1 kW.m^{-2}$ [3]. Le «G» représente le rayonnement "Global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffusé.

Avec

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (I-1)$$

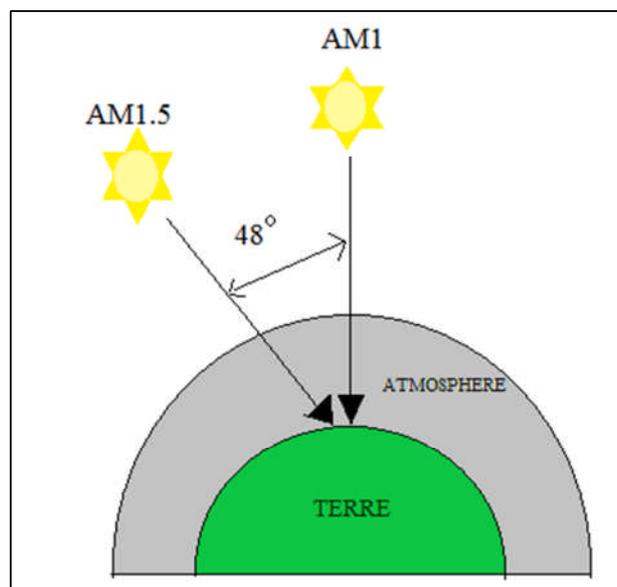


Figure I-1. Définition de la norme AM_m .

1.1.2 Spectre solaire

On représente le rayonnement par un spectre donnant l'irradiance en fonction de la longueur d'onde (voir la figure I-2).

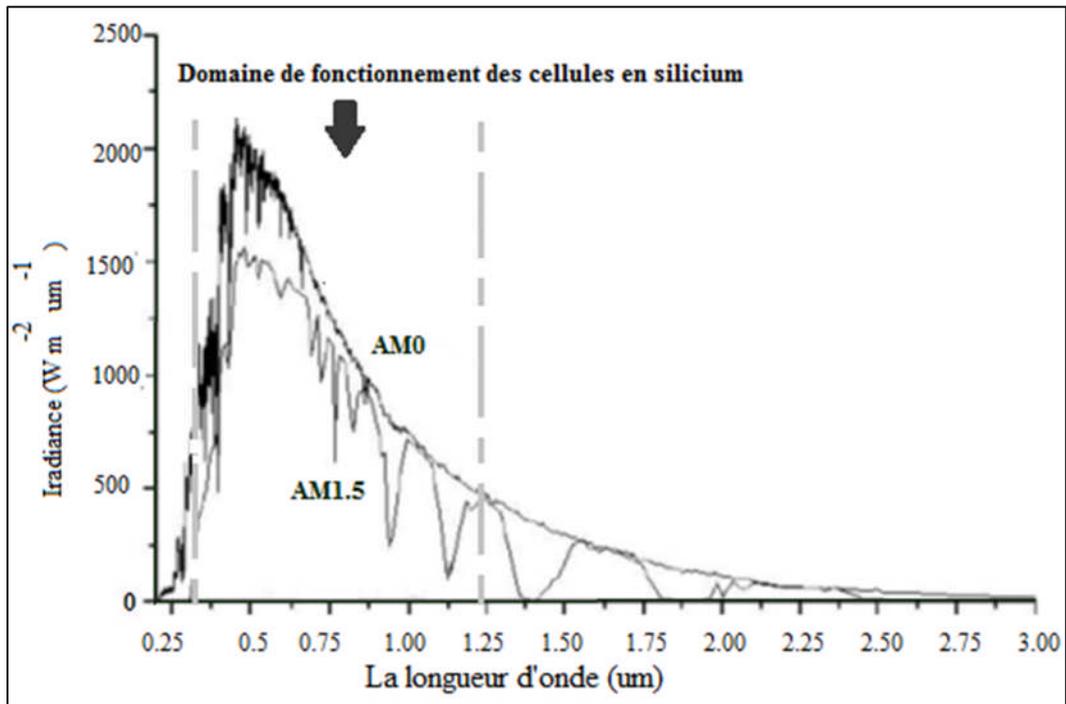


Figure I-2. Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 d'après [2]. Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence.

1.2 L'effet photovoltaïque

1.2.1 L'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque : c'est l'électricité produite à partir du rayonnement solaire, c'est une énergie de source renouvelable, comme les énergies hydraulique, géothermique et éolienne. Le développement de ces énergies renouvelables est indispensable dans le but d'offrir une alternative aux énergies fossiles (très polluantes) mais également, d'assurer une indépendance et une sécurité énergétiques.

1.2.2 Principe de l'effet photovoltaïque

Découvert par Becquerel en 1839, les bases théoriques du photovoltaïque furent posées par Albert Einstein, en 1912 pratiquement un siècle plus tard. Ceci a expliqué que l'effet photovoltaïque provoque, sur certains matériaux, l'émission d'une petite quantité d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Il sollicita que la lumière entrant dans ce type de matériaux (conducteur ou semi-conducteur) était à l'origine d'interaction photons-atomes, provoquant ainsi l'expulsion des électrons de leur orbite et créant un courant électrique. Ce mécanisme de photo génération peut être représenté à l'aide des états énergétiques des bandes de valence et de conduction, séparées par un gap d'énergies interdites (E_g).

Dans les matériaux conducteurs, les charges libérées se recombinent quasi-instantanément et peuvent difficilement être collectées. L'usage de certains matériaux semi-conducteurs permet la réduction de ces recombinaisons et l'application de l'effet photovoltaïque à la production d'électricité. Mais ce n'est qu'en 1954 que la première cellule photovoltaïque en semi-conducteur a été mise au point par des chercheurs du laboratoire Bell aux USA permettant d'obtenir un rendement de 4,5% [4].

L'effet Photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont donc capables à la fois de permettre le transfert d'énergie du photon absorbé à un électron et la collecte de cet électron de plus haute énergie par un circuit extérieur.

1.2.3 Avantages du photovoltaïque

- ✓ L'impact sur le paysage des panneaux solaires est bien moindre que celui généré par les éoliennes par exemple.
- ✓ L'installation de panneaux solaires sur les toits de hauts bâtiments permettrait de réduire à néant la pollution visuelle.
- ✓ L'installation de parcs solaires sur des terres polluées ou sur d'anciens sites miniers couplée à la disposition au pied des installations de plantes permettant d'exfiltrer les composés toxiques et aurait un impact positif, celui de dépolluer un terrain inexploitable pour le rendre disponible après la désinstallation du parc solaire.
- ✓ Les rendements des panneaux photovoltaïques relativement faibles pour le moment ne cessent d'augmenter ; ce qui traduit une grande capacité de développement.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques les plus répandus ont une durée de vie supérieure à vingt ans, ce qui leur permet d'afficher un bilan énergétique positif. Il faut en effet entre un an et demi et trois ans pour qu'un panneau solaire fournisse autant d'énergie que celle nécessaire lors de sa fabrication.

1.2.4 Principal inconvénient du photovoltaïque

- ✓ L'énergie photovoltaïque reste pour le moment, l'énergie renouvelable la plus coûteuse. Néanmoins, les avancées scientifiques permettent de diminuer le coût.

1.2.5 Historique du photovoltaïque

- **Le français Alexandre Becquerel (1839)** découvre l'effet photoélectrique. [27].
- **Ernst Werner Von Siemens (1875)**, un ingénieur allemand, publie un article sur l'effet photovoltaïque dans les semiconducteurs. [29]
- **Heinrich Rudolf Hertz (1887)**, un physicien allemand, présente les résultats de ses expériences en photoélectriques.

- **Philippe Lenard (1902)**, un physicien allemand, qui a travaillé sur l'énergie cinétique des électrons et qui a découvert, la relation entre le seuil de l'effet photoélectrique et la fréquence de la lumière incidente.
- **Albert Einstein (1905)**, un physicien allemand, présente une théorie expliquant l'effet photoélectrique.
- **Robert Andrews Millikan (1916)**, un physicien américain, qui a prouvé expérimentalement les activités d'Einstein.
- **Russel Ohl (1939)**, un ingénieur américain, découvre le principe cellule solaire en silicium Par une étude sur la jonction p-n
- **Laboratoires Bell (D.M. Chapin, C.S. Fuller et G. L. Pearson) (1954)** la réalisation de la première photopile a un rendement de conversion de 6 % pour application spatiale [28]. Malgré que l'effet photovoltaïque été découvert vers les années 1800, ce n'est que ce siècle ou le développement de cette technologie connaît une vraie importance

2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

2.1 L'interaction photon /semi-conducteur

A chaque photon, on associe une longueur d'onde λ telle que ($E_{ph} = h\nu$) où ν est la fréquence associée à la longueur d'onde. Pour passer de l'énergie du photon E_{ph} (eV) à la longueur d'onde λ (μm), on utilise la relation suivante d'où:

$$E_{ph} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I-2})$$

$$E_{ph} = \frac{1.24}{\lambda} \quad (\text{I-3})$$

Avec

h : Constante de Planck (J.s)

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

ν : Fréquence (s^{-1})

λ : Longueur d'onde (μm)

La notion de dualité onde/corpuscule est importante pour comprendre les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau. L'absorption d'un rayonnement dans un matériau s'explique par un échange d'énergie entre les atomes du matériau et les corpuscules de la lumière (rayonnement solaire).

Une cellule solaire est sensible seulement dans un domaine de longueurs d'onde particulier et seul un matériau semi-conducteur dispose de la structure de bande nécessaire à la génération de paires électrons -trous utilisables, à partir du rayonnement solaire. Cette

génération de paires électrons-trous est engendrée par absorption d'un photon qui permet à un électron de la bande de valence de passer dans la bande de conduction (voir la figure I-3). Celui-ci laisse une pseudo-charge positive dans la bande de valence (le trou) et négative dans la bande de conduction (l'électron). Cette transition est régie par les lois de la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement.

En effet, dans un semi-conducteur, la structure des bandes de conduction et de valence définissent un gap plus faible que dans le cas des isolants : de 0.3 eV à 2 ou 3 eV.

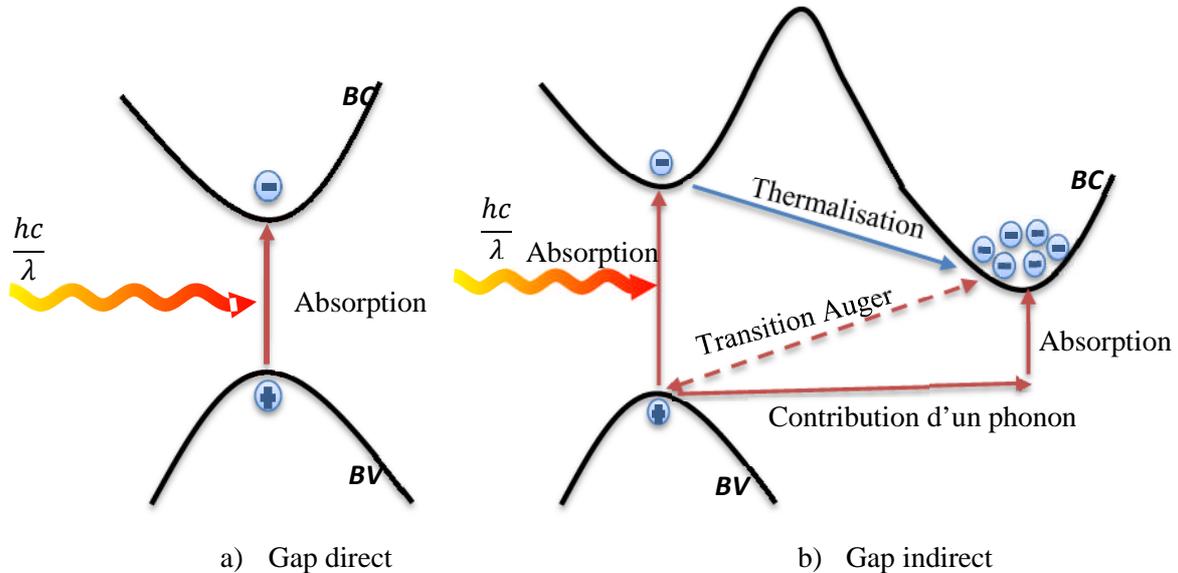


Figure I-3. Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas (a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas (b) à un gap indirect (d'après [5])

Deux différentes transitions possibles selon la nature du gap sont présentées sur la figure I-3. Il s'agit d'un gap direct, quand le minimum de la bande de conduction correspond au maximum de la bande de valence l'espace des vecteurs d'onde K. Les transitions inter-bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (voir la figure I-3 (a)). 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 du 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 (voir la figure I-3(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) contrairement à celle du premier gap direct

qui vaut 3,4 eV (soit 365 nm). L'interaction photon/électron dans un semi-conducteur se traduit par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau. Il faut donc, pour créer un courant électrique, dissocier les paires électrons-trous photo générées et les collecter dans un circuit électrique extérieur avant qu'elles ne se recombinent.

La loi de Lambert décrit le phénomène des photons incidents absorbés par le silicium en fonction de leurs longueurs d'onde :

$$I = I_0 \exp(-\alpha z) \quad (\text{I-4})$$

$$\alpha = \alpha(\lambda) = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (\text{I-5})$$

Avec

I_0 : Intensité lumineuse incidente

I : Intensité lumineuse transmise

z : profondeur (cm)

α : coefficient d'absorption dépendant de la longueur d'onde et de k coefficient d'extinction du matériau (cm^{-2})

2.2 Différentes formes de recombinaison des porteurs

2.2.1 Recombinaisons volumiques

La longueur de diffusion L_d correspond à la distance moyenne que les porteurs peuvent parcourir avant d'être recombinés dans le substrat, L_d et cela dépend de la qualité du matériau et de la mobilité μ (des électrons notamment des trous). En plus, elle décrit le phénomène de transport de charges qui donne naissance au photocourant.

$$l_d = \sqrt{\tau \cdot D_{n,p}} = \sqrt{\tau \cdot \mu_{n,p} \left(\frac{kT}{q}\right)} \quad (\text{I-6})$$

L_d : longueur de diffusion

$D_{n,p}$: Coefficient de diffusion des électrons ou des trous ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

k : constante de Boltzmann ($k=1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)

T : température en kelvin

Q : charge électronique ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

τ : durée de vie des porteurs dans le matériau (s)

$\mu_{n,p}$: mobilité des porteurs (électrons ou trous) ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Il existe trois mécanismes principaux de recombinaison volumique dans un semi-conducteur (radiative, Auger et multi-phonons [6])

2.2.1.1 Recombination Shockley-Read-Hall (SRH)

Ce mécanisme concerne la recombinaison à travers les défauts cristallographiques et les impuretés métalliques (Au,Fe,...) qui se trouvent dans le matériau ; par exemple, dans le silicium cristallin (c-Si) . Les impuretés provoquent l'apparition de niveaux d'énergie discrets dans la bande interdite [7] Les niveaux profonds d'énergie dans la bande interdite E_g sont responsables de la chute de la durée de vie des porteurs en créant des centres de recombinaison d'où l'électron libre peut être piégé dans un niveau profond. Il se recombinera ensuite plus facilement avec un trou de la bande de valence. Ces niveaux sont caractérisés par leur position énergétique E_R , leur densité N_R dans la bande interdite E_g , leur section efficace de capture des électrons et des trous $\sigma_{n,p}$ ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) et les taux d'émission des électrons et des trous $e_{n,p}$ (s^{-1}), le taux de recombinaison . Nous pouvons dire que la Recombination Shockley-Read-Hall (SRH) est en fonction de niveau d'injection [8],[9]

2.2.1.2 Recombinaison Auger

Le processus de recombinaison non radiatif, se manifeste lorsque la densité de porteurs de charges libres (électrons et trous) dépasse 10^{17} (cm^{-3}) [10]. Le porteur recombinant transmet son énergie bande à bande, à un porteur excité d'un niveau énergétique plus élevé. Notons que la participation de phonons (Mode vibration du réseau cristallin) entraîne un effet de « thermalisation » de la cellule, ce mécanisme de recombinaison, plus compliqué en réalité, est dominant à fort taux d'injection et pour de fortes densités de dopants [11].

Dans une cellule solaire, la valeur de la tension en circuit ouvert V_{co} est limitée par les mécanismes de recombinaison déjà évoqués. dans un cas idéal ou nous considérons que les surfaces de la cellule ne provoquent aucun phénomène de recombinaison, la limitation de la tension en circuit ouvert V_{co} provient du volume. Et c'est l'épaisseur de la cellule qui influe sur la valeur V_{co} , exemple : si on a une cellule d'épaisseur $100 \mu\text{m}$ [12], V_{co} est de l'ordre de 770 mV et en réduisant l'épaisseur du substrat de $20 \mu\text{m}$, V_{co} elle pourrait atteindre 800 mV [9].

2.2.1.3 Recombinaison radiative

Elle correspond à la recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence avec émission d'un photon d'énergie E (eV). C'est l'inverse de la création d'une paire (électron/trou) par un photon. Le mécanisme de recombinaison radiative domine les autres phénomènes dans un semi-conducteur à gap direct, car elles se font sans la participation de phonons. [13]

Donc la durée de vie totale est :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} + \frac{1}{\tau_{Rad}} \quad (I-7)$$

Pour un faible dopage du matériau ($\rho > 0.2 \Omega \cdot \text{cm}$), les recombinaisons sont de type SRH mais avec le passage au fort dopage, la durée de vie des porteurs est limitée par le mécanisme de recombinaison Auger (voir la figure I-4).

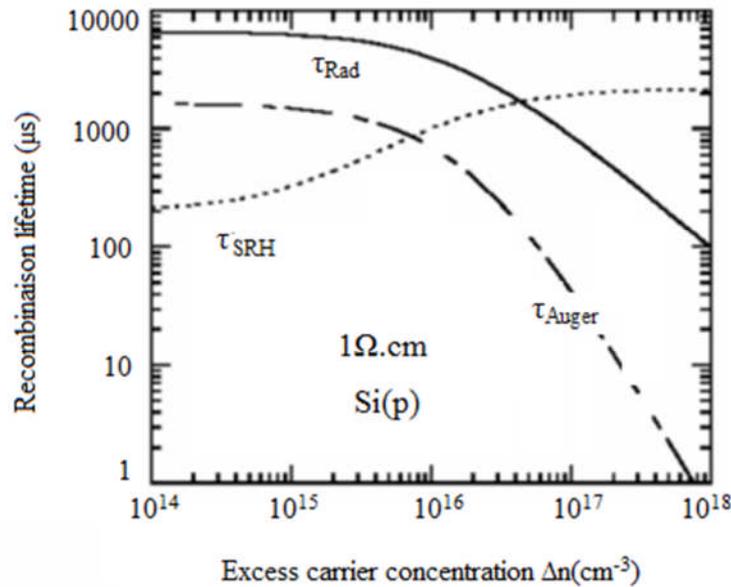


Figure I-4. Influence du niveau d'injection sur les différents mécanismes de recombinaisons (radiative, Auger et SRH) [14]

2.2.2 Recombinaisons surfaciques

La surface d'un substrat de silicium cristallin (c-Si) représente une discontinuité du réseau cristallographique. Ceci entraîne la présence de liaisons non saturées ou liaisons pendantes. Ces défauts structuraux introduisent des niveaux énergétiques dans le gap du silicium qui vont assister les phénomènes de recombinaison. Les liaisons pendantes peuvent être saturées par le dépôt d'une couche de matériau à la surface. On parle alors de passivation des défauts de surface en réduisant son influence sur les recombinaisons. La notion de densité d'état d'interface $D_{it}(E)$ exprimée en $\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ est utilisée pour caractériser les niveaux d'énergie introduits par les défauts de surface [15].

Donc la qualité d'une surface est généralement donnée par la valeur de la vitesse de recombinaison de surface (contrairement à la durée de vie pour le cas de la recombinaison volumique [15]). Dans un simple cas où l'échantillon d'épaisseur (W) possède une durée de vie constant (τ_b) et une faible vitesse de recombinaison (S) sur chaque surface, la durée de vie effective (τ_{eff}) est donnée par :

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{2S}{W} \quad (I-8)$$

Les techniques de passivation reposent en premier sur la réduction de la densité d'état d'interface $D_{it}(E)$ et en second sur la diminution, par effet de champ, de la densité de porteurs susceptible d'être recombiné à la surface. La croissance d'un oxyde thermique à haute température (1000°C) permet de réduire la densité d'état de surface à des valeurs très basses ($1 \cdot 10^9 \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$), à comparer avec les $6.8 \cdot 10^{14} \text{at.cm}^{-2}$ d'une surface orientée (100) [16]. Certains matériaux hydrogénés réalisés par CVD (a-SiN_x:H, a-Si:H, a-SiC:H) contiennent une certaine quantité d'hydrogène qui peut passiver les liaisons pendantes. Cependant, les valeurs de la densité d'état d'interface (D_{it}) obtenues avec ces matériaux sont en général supérieures à celles du SiO₂ thermique. Pour atteindre d'excellentes propriétés passivantes, les matériaux déposés à basse température, ils utilisent également le mécanisme d'effet de champ. Un type de porteurs est alors éloigné de l'interface, ce qui réduit le taux de recombinaison. Cet effet de champ peut être provoqué par les discontinuités de bande (énergie de gap différente entre les matériaux), par la présence de charges à proximité de la surface (charges positives fixes pour le nitrure de silicium) ou encore par un léger dopage thermique (jonction p/n) [17]. Dans la plupart des cas, la passivation de surface est effectuée par un matériau non conducteur. Les recombinaisons se produisent alors principalement à l'interface entre les deux matériaux.

Il est difficile d'obtenir directement une mesure de vitesse de recombinaison de surface. Le paramètre le plus accessible reste la durée de vie effective (τ_{eff}) du substrat c-Si, qui prend en compte à la fois les recombinaisons volumiques et surfaciques. Les recombinaisons en volume peuvent dominer pour un matériau multicristallin, et ainsi limiter la durée de vie effective des porteurs minoritaires. Par contre, dans le cas d'un substrat silicium monocristallin (FZ ou CZ), il est plus probable que le rôle de la surface soit prépondérant, et c'est d'autant plus que l'épaisseur du substrat est faible. Avec un substrat de très haute durée de vie, un rendement de cellule supérieur à 27% peut théoriquement être obtenu si les recombinaisons de surface sont suffisamment faibles [18].

2.4 La jonction p/n: base de cellule photovoltaïque

Le principe de base d'une cellule solaire est la formation d'une jonction réalisée par un sur-dopage du silicium. La création d'une barrière de potentiel dans le semi-conducteur permet de séparer les électrons et les trous qui sont générés par l'absorption de la lumière dans le matériau. La séparation des paires (électron/trou) et la collecte des charges libres sont facilitées par la présence d'un champ électrique au sein du matériau qui s'oppose à tout déplacement de charges. Donc la cellule photovoltaïque procède une simple structure, constituée d'une base en silicium cristallin (c-Si) de type p dopée localement (n^+) pour

former l'émetteur. La différence de concentration d'électrons entre la zone dopée n+ et celle de type p qui entraîne une tension de diffusion V_D à la jonction des deux zones de conductivité opposée. La tension de diffusion provoque un champ électrique intrinsèque à la jonction, dans une zone appelée ZCE (Zone de Charge d'espace). Sa largeur varie en moyenne entre 0.1 et 1 micron en fonction du profil et du niveau de dopage [19]. Autrement dit, les photons incidents du rayonnement sur une jonction créent des porteurs dans chacune des régions P, ZCE et N. On distingue alors, au niveau de la jonction, deux zones : dans les régions électriquement neutres P et N, les photoporteurs minoritaires diffusent ; ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires et ils peuvent ainsi être collectés par les contacts ohmiques d'où la création d'un photocourant de diffusion.

Dans la zone de charge d'espace (ZCE), les paires électrons-trous photogénérées par les photons sont dissociées par le champ électrique ; ce qui permet de séparer spatialement l'électron et le trou photo généré où l'électron va être propulsé vers la région de type N et le trou vers la région de type P. On aura ainsi un photocourant de génération. (Voir la figure I-5). Ces différentes contributions s'ajoutent pour créer un photocourant résultant I_{ph} qui contribue au courant inverse de la diode.

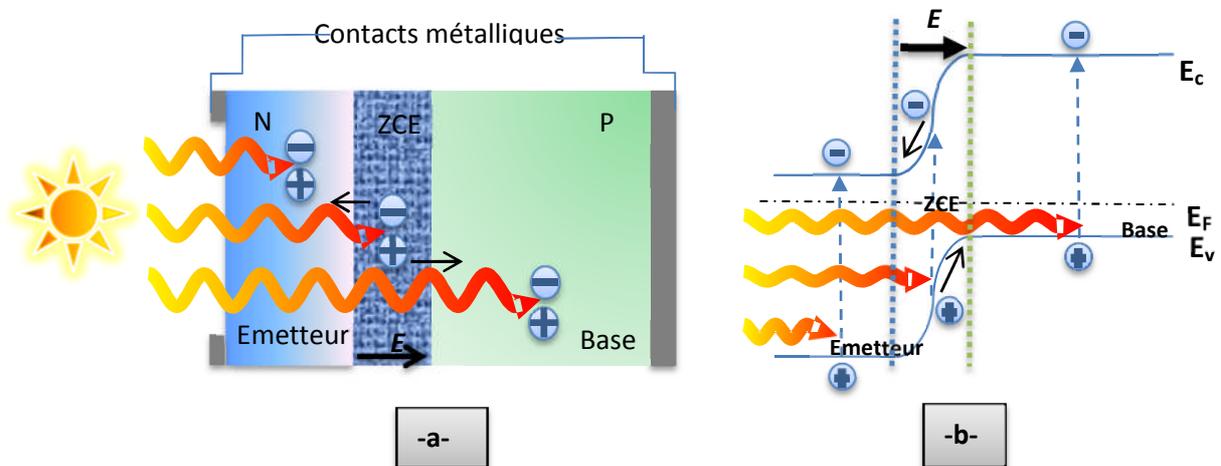


Figure I-5. Structure (a) et diagramme de bande (b) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées [20]

La longueur de diffusion des électrons photogénérés est plus grande que celle des trous. La base présente une épaisseur relativement grande ($\approx 250\text{-}300 \mu\text{m}$). Elle est donc le plus souvent de type (p) et c'est elle qui va fournir le maximum de porteurs. Afin de limiter les recombinaisons avec les porteurs majoritaires, elle est faiblement dopée (environ 10^{16} cm^{-3}).

L'émetteur, de type n, est de faible épaisseur quelque nm et fortement dopé (environ 10^{19}cm^{-3}) afin d'obtenir un champ électrique suffisant dans la ZCE.

L'épaisseur de la cellule doit être choisie de manière à ce qu'un maximum de photons soit absorbé par le silicium [20].

La valeur de la tension de diffusion V_D peut s'exprimer en fonction des densités de dopants dans l'émetteur et la base du matériau semi-conducteur par la relation (I-9).

$$qV_d = kT \ln\left(\frac{N_A * N_D}{n_i^2}\right) = \frac{E_g}{q} + \ln\left(\frac{N_A * N_D}{N_C * N_V}\right) \quad (\text{I-9})$$

Avec

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

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

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

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

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

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

Remarque

Lorsque la base et l'émetteur sont réalisés dans un seul matériau (même E_g), on parle d'une homojonction. En revanche si la base et l'émetteur son réalisés avec deux matériaux semi-conducteurs différents on parle d'une hétérojonction, cette notion sera plus détailler dans le chapitre II

3. Propriétés électriques des cellules photovoltaïques

3.1 Schéma électrique équivalent

Ce modèle est représenté par le schéma électrique suivant (la figure I-6) :

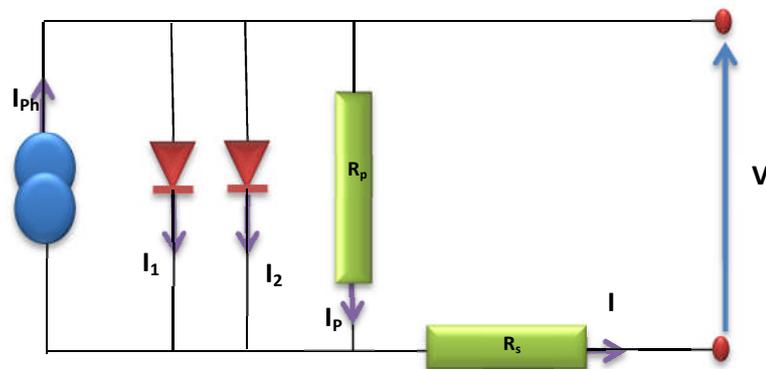


Figure I-6. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [21].

L'équation (I-10), correspond à un cas idéal du fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

Pour tenir compte des limitations de la cellule et calculer le courant réellement délivré sur la charge du circuit extérieur, on introduit un modèle comportant une résistance série et une résistance parallèle.

L'équation du courant devient :

$$I = I_1 + I_2 + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (\text{I-10})$$

$$I = I_{01} \left(\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{n_1 kT}\right) - 1 \right) + I_{02} \left(\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{n_2 kT}\right) - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (\text{I-11})$$

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire est ainsi composé d'une source de courant et de deux diodes en parallèle. La source de courant modélise le courant photogénéré I_{ph} . La première diode (facteur d'idéalité $n_1 \approx 1$) correspond au courant de diffusion dans la base. L'émetteur. I_{01} , I_{02} sont les courants de saturation. I_2 est le courant de génération/recombinaison ou d'effet tunnel dans la zone de charge d'espace et n_2 le facteur d'idéalité de la seconde diode ($n_2 \approx 2$).

Afin de modéliser les courants de fuite existant dans la structure, la résistance parallèle R_p est ajoutée. Ces courants de fuite peuvent avoir lieu par exemple sur les bords de la cellule ou à travers l'émetteur. La résistance parallèle doit être la plus élevée possible. La résistance série R_s modélise les pertes résistives dans la structure (base et émetteur), les résistances de contact aux interfaces métal/semiconducteur et celles du métal à proprement parler. Afin de limiter son influence sur le courant de la cellule, la résistance série R_s doit être minimisée en optimisant les contacts métal/semiconducteur et en diminuant la résistivité du matériau. Un compromis est à trouver entre cette dernière et la recombinaison des porteurs : un dopage trop élevé entraîne des recombinaisons trop importantes. Les valeurs de résistivité retenues sont comprises en général entre 0.5 et 5 $\Omega.cm$ pour le substrat initial [22].

3.2 Paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque

La cellule solaire n'est autre qu'une photodiode qui fonctionne sans polarisation extérieure et débite son photocourant dans une charge. La caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire est la superposition de celle de la diode sous obscurité et du courant photogénéré (voir Figure I-7(a)). L'éclairement de la structure a pour effet de déplacer la courbe $I(V)$ de la diode vers les courants inverses. Puisque la photodiode est considérée comme un générateur, la

convention est d'inverser l'axe des courants comme illustré par (la figure I-7(b)). Notons que la cellule photovoltaïque n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement. Seule la courbe I(V) est fixée. C'est la valeur de l'impédance de la charge aux bornes de la cellule qui va imposer le point de fonctionnement. Il est donc essentiel de choisir une charge telle que la puissance délivrée soit maximale.

Donc, sous éclairage, la caractéristique I(V) de la diode ne passe plus par l'origine des coordonnées ; il existe une région dans laquelle le produit V*I est négatif (Figure I-7(b)) la diode fournit de l'énergie. Si on se limite à cette région active et compte positivement le courant inverse ; la figure (I-7(a)) se ramène à la figure (I-7(b)).

L'équation (I-10 ($I = I_{obs} - I_{ph}$)) s'écrit alors :

$$I = I_{ph} - I_s (e^{qV/kT} - 1) \quad (I-12)$$

Le premier terme de l'expression (I-12) est le photocourant, le second terme est un courant direct qui résulte de la polarisation de la diode dans le sens passant par la tension V qui apparaît aux bornes de la résistance de charge.

Le courant électromoteur de la cellule est le courant de court-circuit, sa force électromotrice est la tension de circuit ouvert. L'expression (I-12) donne

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (I-13)$$

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (I-14)$$

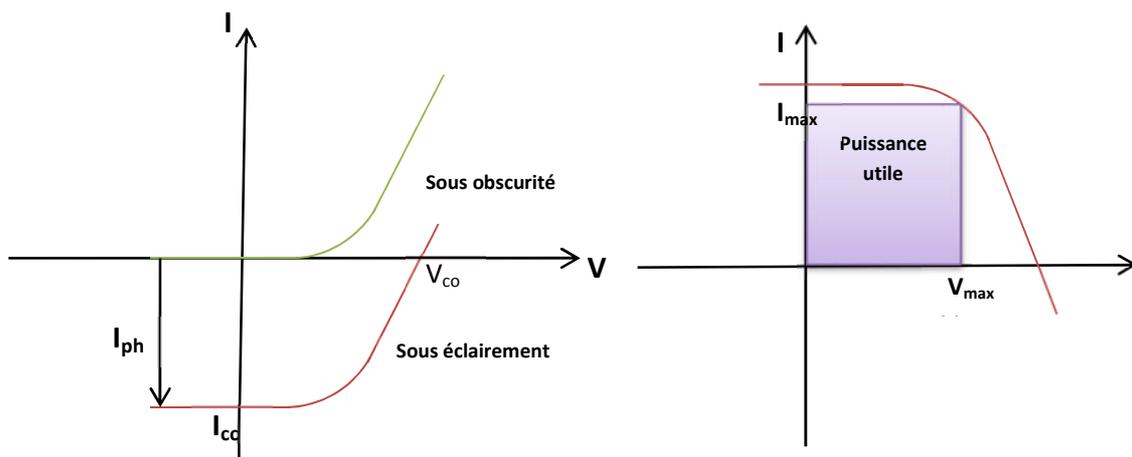


Figure I-7 (a) Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairage et sous obscurité et (b) représentation conventionnelle de la courbe I(V) [21].

Le point de fonctionnement de la cellule sur la courbe $I(V)$ est déterminé par l'impédance de la charge qui, mal adaptée n'utilisera pas toute la puissance disponible. Il est donc important de pouvoir travailler avec les valeurs V_m et I_m afin d'utiliser la puissance maximale. En plus, afin de comparer la production photovoltaïque avec les autres sources d'énergie, la littérature utilise souvent l'unité Watt crête (W_c ou W_p en anglais pour peak Watt). Elle correspond à la puissance nominale d'une cellule ou d'un module photovoltaïque dans des conditions d'ensoleillement standard (AM1,5).

3.2.1 Tension en circuit ouvert (V_{co})

La tension en circuit ouvert correspond à la tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans la couche active. Dans le cas des cellules solaires la V_{co} est linéairement dépendante du niveau de la bande de conduction du matériau semi-conducteur donneur d'électrons et du niveau d'énergie de la bande de valence du matériau semi-conducteur accepteur d'électrons.

La valeur de la V_{co} est donc liée aux niveaux d'énergie de chacun des matériaux et également à leurs interfaces.

3.2.2 Densité de courant en court-circuit (J_{cc})

Le J_{cc} est la densité de courant fournie par la cellule en condition de court-circuit (tension aux bornes de la cellule égale à 0). La densité de courant est déterminée par le produit de la densité de charges photogénérées par la mobilité du matériau où :

- n est la densité de porteurs de charges (positives et négatives).
- e est la charge élémentaire.
- μ est la mobilité ambipolaire.
- E est le champ électrique interne.
- S est la surface de la cellule.

$$J_{cc} = \frac{\eta \times e \times \mu \times E}{S} \quad (\text{I-15})$$

3.2.3 Puissance débitée P

La puissance fournie par la cellule est donnée par le produit $V \cdot I$:

$$P = VI = V(I_{ph} - I_s (e^{qV/kT} - 1)) \quad (\text{I-16})$$

Cette puissance est maximum au point P_m sont donnés par :

$$\left(1 + \frac{qV_m}{kT}\right) e^{qV_m/kT} = 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{I-17})$$

$$I_m = I_s \frac{qV_m}{kT} e^{qV_m/kT} \quad (I-18)$$

La puissance débitée est alors donnée par le produit $V_m \cdot I_m$ qui s'écrit :

$$P_m = V_m \cdot I_m = FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc} \quad (I-19)$$

Le paramètre FF est le facteur de remplissage ou facteur de forme, il mesure le caractère rectangulaire de la courbe $I(V)$. Il varie de 0.25 pour une cellule à faible rendement à 0.9 pour une cellule idéale.

3.2.4 Facteur de forme (FF)

Si V_j est la tension aux bornes de la jonction et R_s la résistance de la diode, le courant et la tension de sortie sont donnés par

$$I = I_{ph} - I_s (e^{qV_j/kT} - 1) \quad (I-20)$$

$$V = V_j - R_s I \quad (I-21)$$

La caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire est alors donnée par

$$I = I_{ph} - I_s (e^{q(V+R_s I)/kT} - 1) \quad (I-22)$$

Les allures de la caractéristique $I(V)$ pour plusieurs valeurs de R_s sont représentées sur la figure I-8. Ces caractéristiques montrent les effets de R_s sur le facteur de forme (FF>0.8 pour $R_s = 0$ et FF=0.25 pour $R_s > 1\Omega$). Le facteur de forme augmente avec V_{co} c'est-à-dire avec le gap du semi-conducteur, pour $R_s = 0$, il passe de 0.83 dans Si où $V_{co} \approx 0.6$ V (voir la figure I-8).

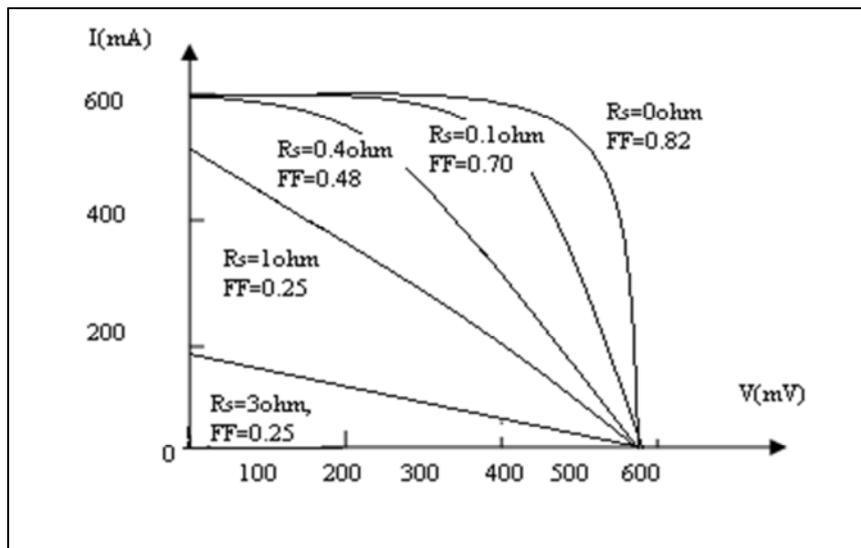


Figure I-8 Caractéristique $I(V)$ pour plusieurs valeurs de résistance série [30]

Donc le facteur de forme est défini par la formule (I-23) suivante :

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_{\max} \times I_{\max}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (I-23)$$

Où

- P_{\max} est défini comme le produit de J_{\max} par V_{\max} .
- la V_{co} correspond à la tension en circuit ouvert.
- le J_{cc} à la densité de courant en court- circuit.
- J_{\max} et V_{\max} correspondent aux valeurs du point de fonctionnement maximal de la cellule.

Le facteur de forme est lié aussi au nombre de porteurs de charges collectés aux électrodes à différentes tensions de fonctionnement. En effet dans la couche active, il y a compétition entre transport des charges et recombinaison des charges.

$$d = \mu \times t_{tr} \times E \quad (I-24)$$

D'où

$$t_{tr} = \frac{d}{\mu \times E} \quad (I-25)$$

3.2.5 Rendement de conversion d'une cellule solaire (η)

Le rendement η est un autre paramètre important pour comparer les performances des photopiles (les cellules solaires). Le rendement de la cellule solaire est donné par le rapport de la puissance maximum disponible à la puissance du rayonnement incident P_{in} .

Alors, il est obtenu par la formule (I-26)

$$\eta = \frac{p_m}{P_{in}} = \frac{V_m * I_m}{P_{in}} = \frac{FF * V_{co} * J_{cc}}{P_{in}} \quad (I-26)$$

Où

- FF : correspond au facteur de forme.
- V_{co} : est la tension en circuit ouvert.
- J_{cc} : est la densité de courant en court-circuit.
- P_{in} : est la puissance incidente.

Si on considère un exemple où : ($P_{in} \approx 1KW/m^2$; $I_{cc} \approx 30mA/cm^2$; $V_{co} \approx 0.7V$; $FF \approx 0.8$)
On obtient alors un rendement de $\eta \approx 20\%$)

L'expression (I-26) montre que les performances d'une cellule solaire résultent directement des valeurs des trois paramètres I_{cc} , V_{co} , et FF . Ces paramètres sont fonction d'une part de propriétés spécifiques du matériau tels que le gap, les coefficients d'absorption,

de réflexion, la longueur de diffusion des porteurs ou la vitesse de recombinaison en surface, et d'autre part de paramètres technologiques telles que la profondeur de la jonction, la largeur de la zone de charge d'espace ou la présence de résistances parasites ; exemple : la nature et la valeur du gap jouent un rôle majeur. Un matériau à gap direct a un coefficient d'absorption bien supérieur à un matériau à gap indirect comme le Si. Il résulte que dans le premier, la vitesse de recombinaison en surface et la profondeur de jonction jouent un rôle plus important que dans la seconde. En contrepartie, les recombinaisons sur le contact arrière jouent un rôle plus important dans le second que dans le premier.

La valeur du gap conditionne la tension de circuit ouvert V_{co} à travers la hauteur de barrière de la jonction et le courant de court-circuit I_{cc} à travers le taux de recouvrement du spectre solaire et de la réponse spectrale de la diode. V_{co} il est d'autant plus grand et I_{cc} d'autant plus petit que le gap est grand. Enfin le facteur de forme FF est fonction de la tension en circuit ouvert V_{co} et des résistances série R_s de la diode.

Remarque

La lumière incidente est standardisée à 100 mW.cm^{-2} sous AM 1,5 qui correspond au spectre solaire en tenant compte de l'atmosphère terrestre et d'un angle d'incidence de $48,2^\circ$.

4. Facteurs limitant le rendement

La conversion énergétique de la lumière par la cellule photovoltaïque n'est pas totale. Les pertes de rendement dépendent des matériaux utilisés et des techniques d'élaboration mise en œuvre. La figure I-9 décrit ces pertes.

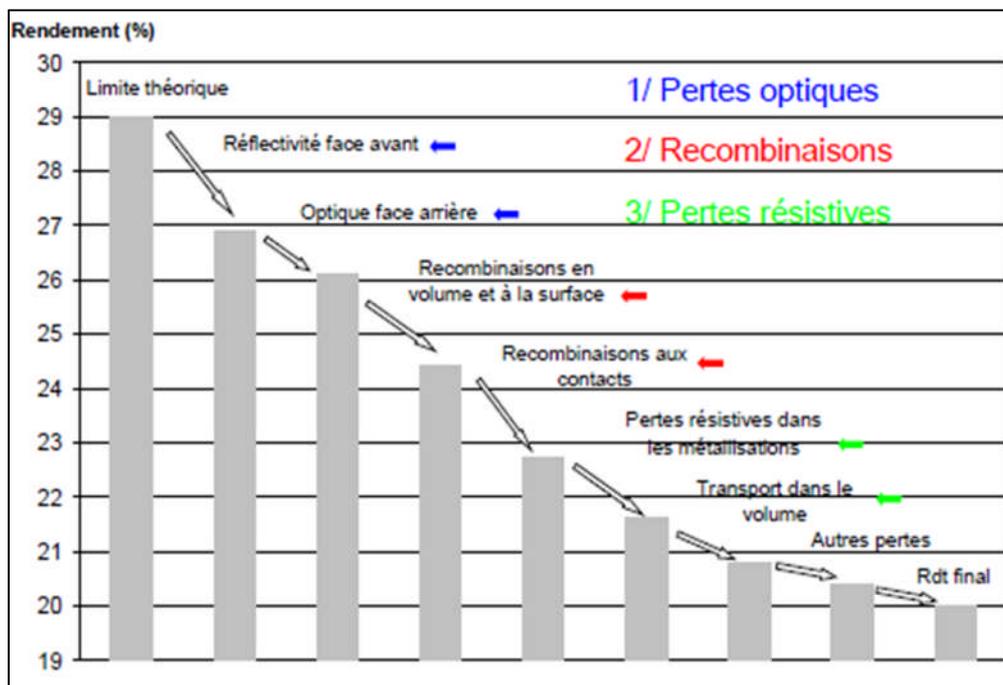


Figure I-9. Différentes facteurs limitant le rendement [26]

On peut classer ces pertes comme suit :

4.1 Pertes énergétiques par non absorption du rayonnement

- Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ($\lambda > \lambda_g$) ne peuvent générer des paires électron/trou et sont donc perdus.
- Pour les photons d'énergie très inférieurs au gap.
- Par réflexion, une partie de l'énergie incidente est réfléchiée par la surface (non métallique) de la cellule. Le coefficient de réflexion R peut être optimisé par la mise en œuvre de traitements de surface adéquats et de couche antireflet.
- Par transmission.

4.2 Pertes aux puissances électriques dûes au procédé de fabrication de la cellule

- Par recombinaison des porteurs en surface et dans le volume.
- Par le taux d'ombrage de la surface d'exposition. Les contacts métalliques (de surface $S_{\text{métal}}$) présents sur la face avant, afin de collecter les porteurs, entraînent des pertes de puissance puisqu'ils couvrent une partie de la surface S de la cellule. Le taux d'ombrage est un compromis entre les pertes dues à la couverture partielle de l'émetteur par les contacts et les pertes de facteur de forme provoquées par la résistance série liée à la largeur de la métallisation
- Par la valeur des résistances séries et parallèles et du facteur de forme.

5. Rendement quantique et réponse spectrale

5.1 Rendement quantique

Le facteur de forme et le rendement renseignent sur les performances globales de la structure. Pour détailler ces caractéristiques en fonction de la longueur d'onde utilisée, le rendement quantique est introduit. Le rendement quantique externe est le rapport du nombre de porteurs collectés sur le nombre de photons incidents d'une énergie donnée. Si chaque photon d'une longueur d'onde précise génère un porteur de charge effectivement collecté, le rendement quantique vaut l'unité. Vu que le coefficient d'absorption du silicium varie avec la longueur d'onde du rayonnement.

Les photons de faible longueur d'onde sont absorbés près de la surface (vers la zone d'émetteur) alors que ceux de forte longueur d'onde sont plus en profondeur du dispositif (au niveau de la base). On peut donc accéder au comportement et à l'efficacité de chaque région constitutive de la cellule. Ainsi, ce paramètre est diminué par plusieurs facteurs : les phénomènes de recombinaison en surface et en volume y jouent une part importante. La

réflexion sur la face avant et la faible longueur de diffusion des porteurs ont pour conséquence de diminuer le rendement quantique sur toute la gamme de longueurs d'onde (Figure I-10).

Le paramètre présenté ici tient compte des pertes optiques comme la réflexion ou la transmission à travers la cellule : c'est le rendement quantique externe (EQE pour external quantum efficiency). Il peut être corrigé des pertes optiques pour donner le rendement quantique interne (IQE) qui tient compte des caractéristiques propres de la cellule (longueur de diffusion, recombinaisons en surface et en volume) :

$$IQE = \frac{EQE}{(1 - R)} \quad (I-27)$$

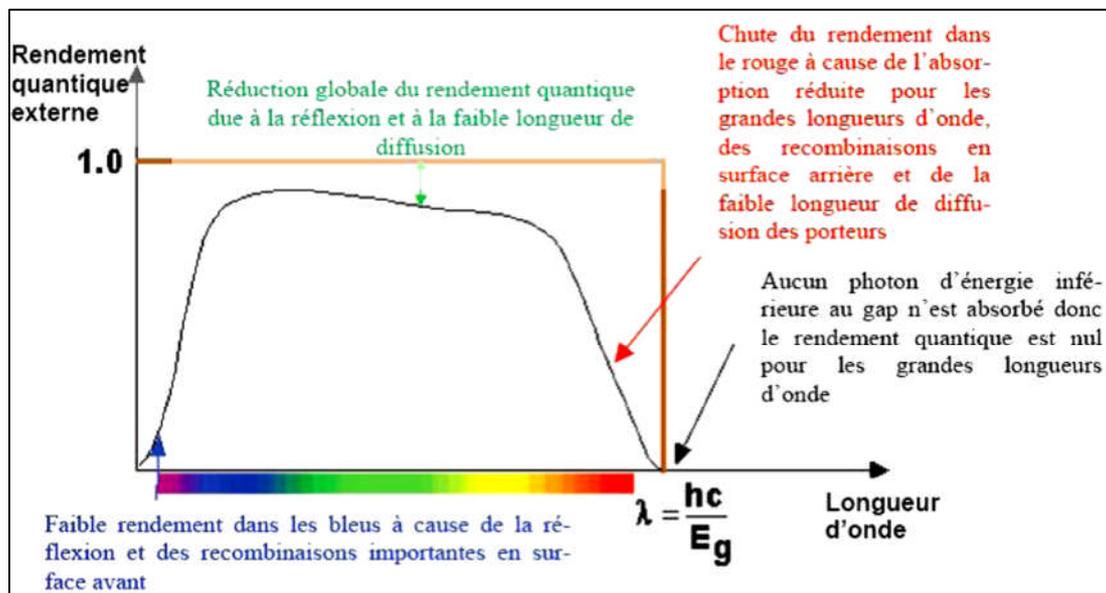


Figure I-10 Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque [22].

5.2 La réponse spectrale

La réponse spectrale (*SR* pour spectral response) est de manière analogue le rapport de l'intensité $I(\lambda)$ générée par la cellule sur la puissance incidente $P_{inc}(\lambda)$ pour chaque longueur d'onde:

$$SR = \frac{I(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} = \frac{I(\lambda)}{\Phi(\lambda).s} \quad (I-28)$$

Où $\Phi(\lambda)$ est le flux lumineux incident ($W.m^{-2}$). Ou s est la surface de la cellule (m^2). *SR* c'est en général cette grandeur qui est mesurée et qui permet de calculer le rendement quantique en prenant en compte l'énergie des photons :

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} EQE \quad (I-29)$$

6. Technologies pour la réduction des pertes de rayonnements (les constituants de base d'une cellule photovoltaïque)

Les pertes de rayonnements ou pertes optiques correspondent aux photons réfléchis sur la face avant et à ceux transmis à travers la cellule sans être absorbés, sans pouvoir générer des paires électron/trou. Ce qui affecte fortement le courant de court-circuit I_{cc} , notamment le rendement de la cellule photovoltaïque. En plus de la minimisation du recouvrement de la surface avant par les contacts métalliques qui doit être un compromis avec l'obtention d'une bonne résistance série. La réflectivité de la face avant peut être réduite grâce à la texturation et à l'utilisation d'une couche antireflet (CAR). Enfin, le chemin du rayonnement dans la cellule peut être optimisé par la combinaison de la texturation et de l'utilisation d'un réflecteur sur la face arrière ce qui augmente la probabilité d'absorption des photons.

6.1 Texturation

L'opération de texturation développe en surface un relief micrométrique (typiquement 5-10 μ m), permettant des réflexions multiples (voir la figure I-11). La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique. Par exemple, un rayon arrivant en incidence normale par rapport au plan de la cellule est réfléchi sur la face d'une « pyramide » adjacente diminuant ainsi le coefficient de réflexion de R à R^2 . De plus, le rayon transmis dans la cellule l'est avec un angle de réfraction différent de 0° augmentant son parcours dans le matériau par rapport au cas d'une surface plane. La probabilité d'absorption des photons en est donc améliorée.

Enfin, la texturation de la face arrière entraîne un piégeage plus important de la lumière pour la cellule.

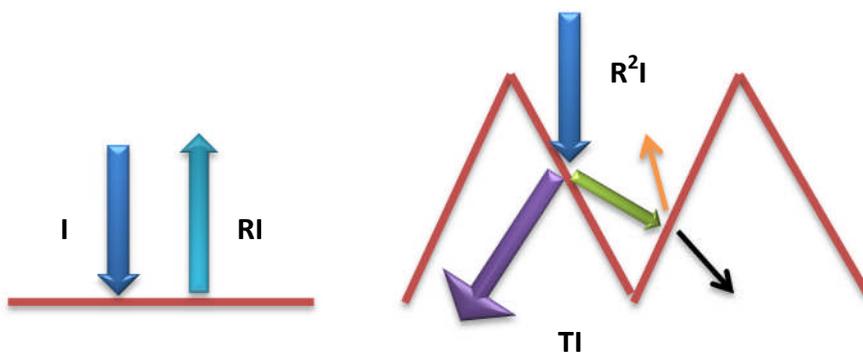


Figure I-11. Schéma comparatif des phénomènes de réflexion sur surfaces plane et texturée.

- I : Intensité lumineuse incidente.
- R : Le coefficient de réflexion.
- T : Le coefficient de transmission.

On peut citer différentes méthodes de texturisation, par exemple les attaques chimiques. Elles sont très utilisées dans l'industrie photovoltaïque basée sur le silicium. La texturisation basique par des solutions telles que la soude ; (NaOH) va entraîner la formation de pyramides à la surface du silicium. Cependant, elle est fortement anisotrope, la gravure des plans (100) étant cinquante fois plus rapide que celle des plans (111). Son coût relativement faible fait que cette solution est encore utilisée par bon nombre d'industriels. Une technique plus adaptée est la texturisation acide qui présente l'avantage d'attaquer la surface de façon isotropique. Un exemple est une solution dénommée AFN en référence à ses constituants : acide acétique (CH_3COOH), fluorhydrique (HF) et nitrique (HNO_3). Le premier permet d'augmenter la mouillabilité de surface et le deuxième décape l'oxyde formé par le dernier.

Les vitesses d'attaque varient selon les proportions des différents acides et sont accélérées par la présence de défauts en surface (dislocations). Cependant, un contrôle rigoureux de la réaction (exothermique) est nécessaire engendrant une opération plus lente et moins reproductible que la texturisation basique.

D'autres techniques, comme la texturation mécanique (laminage à froid sous un peigne dentelé) ou la gravure plasma (RIE pour Reactive Ion Etching), la gravure par laser, peuvent également être utilisées.

6.2 Couche antireflet (CAR)

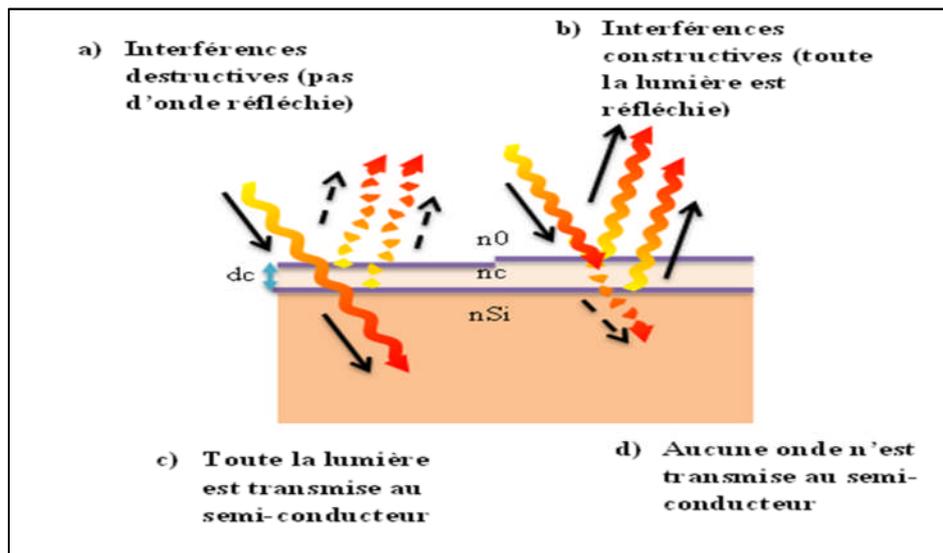


Figure I-12. L'introduction d'une couche mince entraîne la division d'amplitude de l'onde incidente, conduisant à des phénomènes d'interférences entre les rayons réfléchis [23].

L'utilisation d'une couche antireflet (CAR) s'impose afin de diminuer davantage la réflectivité. Il s'agit ici d'exploiter les phénomènes d'interférences par division d'amplitude résultant de l'introduction d'une couche mince de matériau diélectrique entre le milieu extérieur (d'indice n_0) et le substrat (silicium d'indice n_{Si}). Comme illustré par (la figure I-11) le choix de l'indice de réfraction n_C et de l'épaisseur d_C de la couche mince peut conduire aux cas limites des interférences destructives ou constructives à la réflexion.

La couche antireflet peut donc être vue comme une lame quart d'onde qui va permettre d'éliminer la réflexion pour une longueur d'onde donnée. Pour les applications photovoltaïques, l'indice de réfraction et l'épaisseur de la couche antireflet sont choisis de manière à minimiser la réflexion à la longueur d'onde de 600 nm. Celle-ci est, en effet, proche du maximum d'émission du soleil et autorise une pénétration acceptable des photons au sein du silicium.

6.3 Réflecteur arrière (BSR : Back Surface Reflector)

Le meilleur rendement possible nécessite une absorption maximale de rayonnement pénétrant dans la cellule solaire. La quantité de lumière absorbée est fonction de la longueur du chemin optique et du coefficient d'absorption. Ainsi, plus l'épaisseur de la cellule est faible plus il est nécessaire d'accroître le chemin optique dans le matériau. La texturisation de la face arrière (effectuée en même temps que la face avant) va dans cette direction. Cependant, l'utilisation d'une couche en aluminium sur toute la surface arrière élimine la texturation et les propriétés optiques de ce métal ne sont pas satisfaisantes pour faire office de réflecteur arrière [24]. De plus, la diminution souhaitable de l'épaisseur de la cellule pour des raisons de coût et de rendement, engendre des contraintes mécaniques trop importantes au niveau de cette couche métallique. L'utilisation d'un BSF en aluminium localisé diminuerait ces contraintes. Néanmoins, il serait nécessaire d'ajouter une couche supplémentaire entre les contacts afin de passiver la surface arrière. Le nitrure de silicium pourrait, en conjugaison avec ses propriétés passantes, jouer le rôle de réflecteur arrière. Un indice de réfraction bien choisi permettrait d'augmenter la probabilité de réflexion interne totale, maintenant un long chemin optique même pour des cellules très minces.

7. La cellule photovoltaïque standard en silicium cristallin

7.1 Architecture de la cellule photovoltaïque standard

Les premières applications des cellules solaires c-Si des années 50 réalisées, n'étaient pas terrestre, mais spatiale. Elles ont été réalisées sur des substrats de type n (dopés Phosphore). Les substrats de type p se révélant plus résistants aux radiations, les cellules PV

ont ensuite été développées sur du c-Si dopé Bore [25]. Ces premières cellules étaient seulement constituées d'une jonction diffusée (émetteur) et d'un contact ohmique. Par rapport à ces simples photodiodes, l'architecture des cellules photovoltaïques PV a ensuite rapidement évolué, et abouti à une architecture dite « standard » schématisée sur la figure I-13 d'où cette cellule photovoltaïque est constituée d'un empilement de plusieurs couches. Nous trouvons au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négatives (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). D'autre part, on trouve une couche conductrice ; autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle +) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle -) en dessous de la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule et une couche texturée qui augmente la pénétration de rayonnement. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protection sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, et cela constitue alors des panneaux solaires, afin d'obtenir une puissance suffisante.

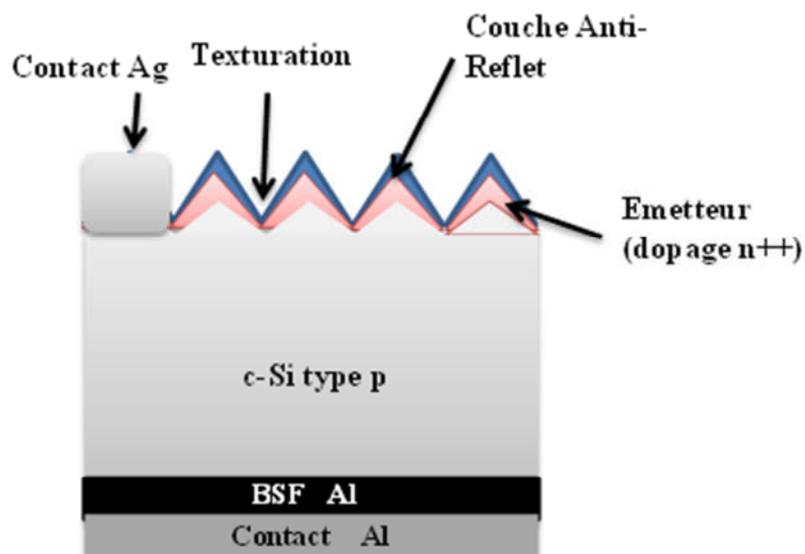


Figure I-13. Structure standard d'une cellule PV

7.2 Les différents types de silicium utilisé



Figure I-14. Structure standard : Photographie de la face avant (wafer pseudo-carré 150 cm²)[25]

Le silicium utilisé en photovoltaïque peut se rencontrer sous trois formes :

- silicium poly cristallin : il s'agit des matériaux photovoltaïques les plus utilisés. Il représente plus de 50% du marché mondial. Ils offrent un bon rendement (12%) pour des coûts de fabrication maîtrisés
- silicium mono cristallin : son rendement est légèrement supérieur au silicium poly cristallin (15%), en revanche sa fabrication est plus délicate donc plus coûteuse.
- silicium amorphe : son rendement est bien inférieur à ceux des siliciums cristallins (6%) et son coût est proportionnellement inférieur.

A la différence des dispositifs réalisés pour la microélectronique, la totalité du substrat de silicium cristallin est utilisé. Ces substrats (wafers) sont découpés à la scie à fil dans des lingots cristallisés selon différents procédés (CZ, FZ, Block-cast). Une épaisseur de 80 μm suffit théoriquement pour que la quasi-totalité des photons soit absorbée. Cependant les techniques actuelles de découpe de wafers ne permettent pas d'atteindre des épaisseurs inférieures à 150 μm . De plus, la réduction des épaisseurs fragilise les plaques et augmente le taux de casse tout au long du procédé de fabrication (cellules et modules). Les substrats multicristallins les plus utilisés au niveau industriel ont une forme carrée approximativement 15 cm de côté, alors que pour le monocristallin c'est la forme pseudo-carrée de 12.5 cm de côté qui est la plus répandue [25]. Trois grandes avancées technologiques, montrées sur la Figure I-13, ont permis l'augmentation du rendement des cellules PV. Il s'agit de la texturation de surface, de l'usage d'une couche anti-reflet ainsi que celle d'un champ de surface arrière (Back Surface Field BSF).

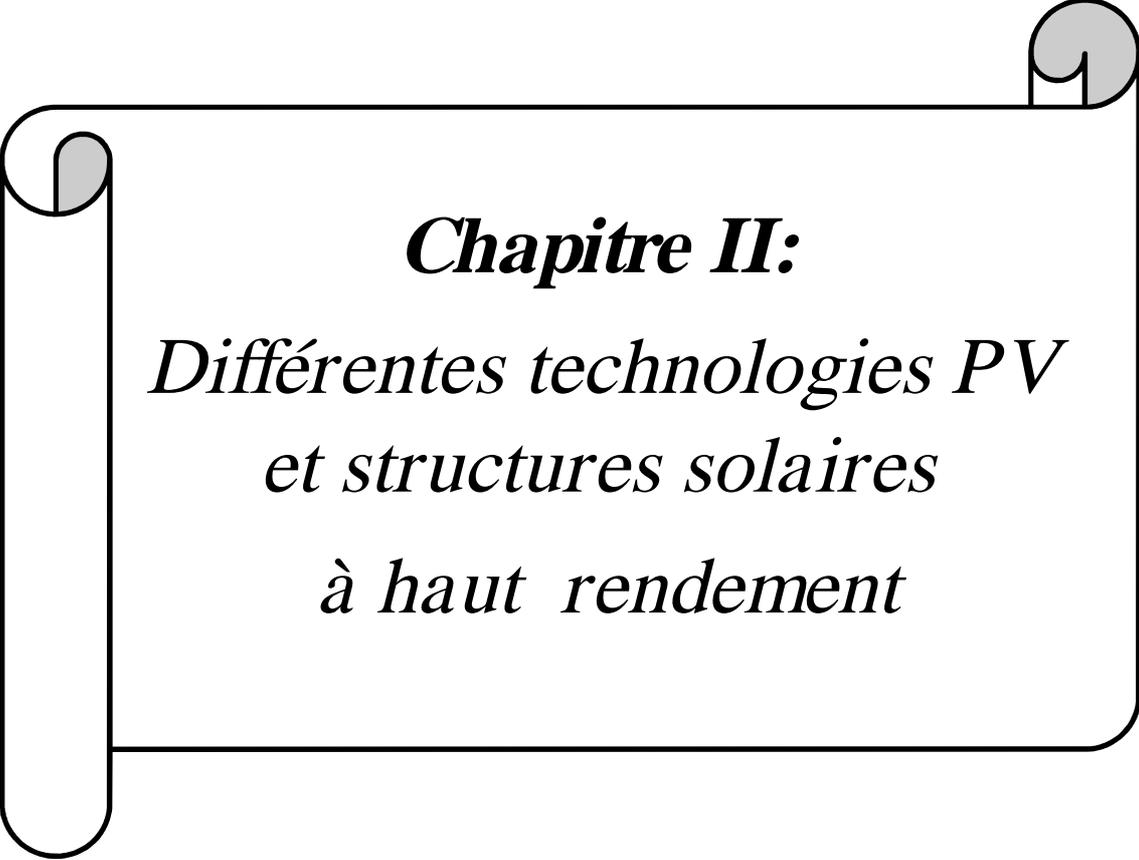
Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension de la suite de notre travail. Nous avons rappelé quelques notions préliminaires sur le rayonnement solaire et son application dans le domaine photovoltaïque. Ensuite nous avons expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques standard et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût.

Références Bibliographiques du chapitre I

- [1] A. Rothwarf and .K.W. Boer Solid-state chemistry vol. 10 part 2 pp 71-102 (1975).
- [2] C. Honsberg, Bowden. Photovoltaïques : Devices, Systems and Applications [CDROM]. Sydney (Aus): Univ. Of New South Wales (1998).
- [3] T. Desrues Docteur en Science des Matériaux « **Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière** » Ecole Doctorale Matériaux de Lyon, Année (2009).
- [4] D.M. Chapin, C.S. Fuller, G.L. Pearson « **A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power** ». J. Appl. Phys., vol. 25, pp. 676-677 (1954).
- [5] E. Fourmond « **Développement de techniques de dépôt plasma et photo assistées pour la réalisation de couches antireflets passivantes en SiNx:H sur silicium multicristallin pour applications photovoltaïques** », Thèse, INSA de Lyon, 165 p (2002).
- [6] J.S. Blakemore, « **semiconductors statistics International Series Of Monographs On Semiconductors** » Vol.3, Pergamon Press, Oxford (1962).
- [7] W. Shockley, WT. Read « **Statistics of the Recombinations of Holes and Electron**. Physical Review, volume 87, numéro 5, pages 835–842, (1952).
- [8] R.N. Hall: « **electron-hole recombination in germanium** », phys rev 87.387 (1952).
- [9] M.A. Green, solar cells : the university of new south wales, Kensington,NSW (1998).
- [10] R. Swanson « **A vision For Crystalline Silicon Solar Cells** » proceedings of 19th European PV Solar Energie Conference, p.1078, Paris, (June2004).
- [11] S. Dubois « **Influence des interactions impureté-défaut et impureté-impureté sur le rendement de conversion des cellules photovoltaïques au silicium cristallin** ». Thèse de Doctorat, Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, (2007).
- [12] T. Tiedje, Y. Yablonovitch, G.D. Cody, BG. Brooks « **Limiting Efficiency of Silicon Solar Cells** » . IEEE Transactions on Electron Devices, volume 31, numéro 5, pages 711-716, (1984).
- [13] K.A. Munzer, K.H. Eisenrith, W.W. Kruhler, R.E. Schlosser, M.G. Winstel, F.H. Karg, proceedings of the 3rd WCPEC, Osaka, Japan , HP-C4-40, (2003).
- [14] J.D. Hylton, A.R. Bugers, W.C. Sinke « **Absorption in thin textured silicon wafers** » proceedings of 14th European PV Solar Energy Conference , p.139.Barcelona ,(June 1997).
- [15] P. Basore; Proceedings of the 23rd IEEE Photovoltaïque conference, New York, P147,(1993) .
- [16] J. Damon-Lacoste « **Vers une ingénierie de bande des cellules photovoltaïques à hétérojonctions a-Si:H/c-Si. Rôle prépondérant de l'hydrogène** ». Thèse de Doctorat, École Polytechnique, 2007
- [17] A.G. Aberle « **Overview on SiN Surface Passivation of crystalline silicon solar cells.** » Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 65, pages 239-248, 2001
- [18] R.M. Swanson « **Approaching the 29 % limit efficiency of silicon solar cells.** » Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Lake Buena Vista, USA, pages 889-894, 2005
- [19] D.M. Chapin, C.S. Fuller, G.L. Pearson. « **A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power** ». Journal of Applied Physics, volume 25, pages 676-677, (1954)

- [20] S. Amtablian, « **Du Transfert de Films Minces de Silicium Monocristallin Vers un Procédé Cellule à Faible Budget Thermique.** », Thèse de doctorat de l'Institut national des sciences Applications de Lyon, Page 21,(2008).
- [21] J. François « **Elaboration de SiNx :H par PECVD Optimisation des Propriétés Optiques Passivantes et Structurales pour Applications Photovoltaïques** », Thèse de doctorat de l'Institut national des sciences Applications de Lyon, Page 9 et 10, (2007).
- [22] S. Martuzzi, S.O. Palais, M. Pasquinelli and F. Ferrazza « **N, type multicrystalline silicon wafers and rejunction solar cells**». The European physical Journal- Applied Physics, vol32,pp187-192, (2005).
- [23] C. Honsberg and S. Bowden photovoltaics: Devices, Systemes and Applications [CDROM] Sydney, Australia: University of New South Wales
- [24] J. Mandelkorn, J.H. Lamneck. «**Simplified fabrication of back surface electric field silicon cells and novel characteristics of such cells** ». Record of the 9th Photovoltaic Specialists Conference, Silver Spring, USA, pages 66-73, (1972).
- [25] M.A.Green «**The Path to 25% Silicon Solar Cell Efficiency: History of Silicon Cell Evolution.** »Progress in Photovoltaics: Research and Applications, volume 17, numéro 3, pages 183-189, (2009).
- [26] R.M. Swanson, Proc. 31 st IEEE PVSC 889-894, (2005).
- [27] B. Edmond, « **Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires** », C.R. Acad. Sci. **9**, 561 (1839).
- [28] D.M. Chapin, C.S. Fuller, and G. L. Pearson, J. Appl. Phys. **25**, 676 (1954).
- [29] D. Diouf, « **cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière** » Thèse de doctorat de l'Université paris-sud11 faculté des science d'oersay, (2010).
- [30] J. Szlufcik S. Sivoththaman, J.F. Nijs et al. «**Low-Cost Industrial Technologies of Crystalline Silicon Solar Cells** » Proc.of the IEEE, vol. 85, no. 5, pp. 711-730, (1997).



Chapitre II:

*Différentes technologies PV
et structures solaires
à haut rendement*

Chapitre II. Différentes technologies PV et cellules solaires à haut rendement

Introduction

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent comme matériaux de base pour leurs fabrications des semi-conducteurs (amorphes ou cristallins, alliages ou pas) afin de capter le maximum de photons solaires qui seront transformés en des paires électrons-trous. Si on utilise un seul type de matériau semi-conducteur on aura une simple jonction ; mais si les deux semi-conducteurs sont différents, on aura une hétérojonction, qui représente en ce moment la base d'une technologie prometteuse dont le but est d'obtenir les meilleurs rendements de conversion électrique. Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous aborderons les différentes technologies photovoltaïques tout en définissant les diverses structures solaires. Ensuite nous entamerons une étude théorique sur l'hétérojonction entre le silicium amorphe et le silicium cristallin. Leurs caractéristiques principales et leurs limites y sont énoncées. Ensuite nous étudierons les méthodes de caractérisation. Nous aborderons aussi quelques généralités concernant notre objectif de cette thèse, l'étude de la structure interdigitée et qui sera bien détaillée dans le chapitre III et IV.

1. Les différentes technologies photovoltaïques

Dans le domaine des photovoltaïques, il existe de nombreuses filières qui peuvent être regroupées en trois groupes : la filière de silicium et la filière des couches minces en plus d'autres nouveaux concepts de cellules solaires.

1.1 Evolution du marché photovoltaïque selon les technologies

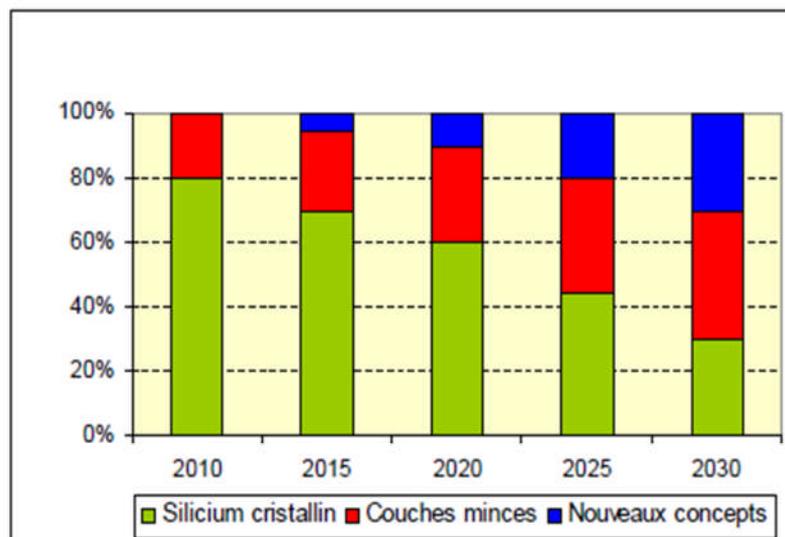


Figure II-1. Evolution du marché photovoltaïque selon les technologies [2]

L'évolution des différentes technologies est représentée sur la figure II-1. L'estimation de développements des différentes technologies jusqu'à 2030 montre que la technologie de silicium cristallin reste dominante malgré sa dégradation au cours des années tandis que la technologie des couches minces est toujours en progression notable comme pour le cas des nouveaux concepts [1].

1.2 Le coût des cellules photovoltaïques.

L'objectif actuel pour les cellules solaires photovoltaïques est d'accéder à la « parité réseau », c'est-à-dire au point à partir duquel l'électricité délivrée par un module photovoltaïque a un prix au kilowattheure (kWh) comparable à celui fourni par le réseau.

Vers les années 70, le prix d'un module photovoltaïque en silicium était de 30 \$/Wc [3], et depuis il a diminué à 1,3 \$/Wc [4] actuellement. A partir de ces chiffres, on voit que d'énormes progrès ont été réalisés pour réduire le coût des cellules photovoltaïques. Malgré tous ces efforts, l'énergie photovoltaïque reste excessivement coûteuse pour pouvoir être compétitive par rapport aux énergies fossiles et nucléaires. Pour réduire le coût des cellules photovoltaïques, différents projets ont été réalisés afin d'élargir le domaine de recherches photovoltaïques. Le développement des structures solaires au cours des dernière années est notable de sorte que la taille des cellules en silicium cristallin est passée de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ à $12,5 \times 12,5 \text{ cm}^2$ puis à $15 \times 15 \text{ cm}^2$ en production. Afin que le prix diminue, plusieurs travaux ont également été menés pour implanter les recuits rapides thermiques à toutes les étapes où des cuissons sont nécessaires lors de l'élaboration des cellules PV (émetteur, BSF, croissance de l'oxyde de passivation, recuit des contacts et des interfaces) [5]. En effet, les temps de cuissons, la contamination et les coûts sont nettement réduits. Néanmoins, les recuits thermiques rapides sont essentiellement utilisés pour la cuisson des contacts et la formation du BSF. La figure II-2 représente la répartition du prix du module photovoltaïque constitué de cellules PV en silicium multicristallin [6].

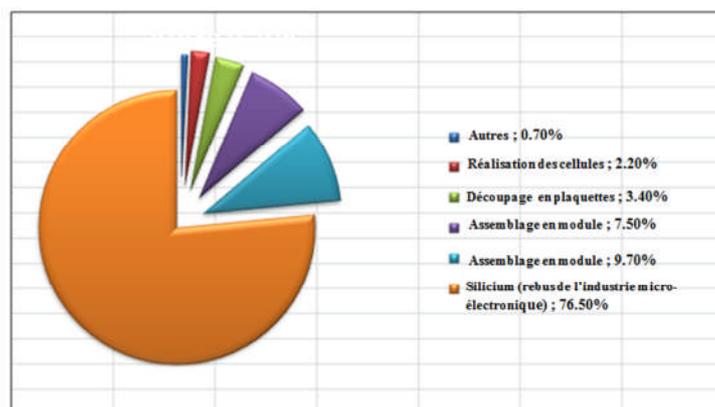


Figure II-2. Répartition du prix du module photovoltaïque à base de silicium multicristallin [7].

Finalement, nous pouvons dire que le prix de la matière première, de la mise en forme des lingots et de la découpe des lingots constitue la part la plus importante du prix des cellules photovoltaïques. Il est donc clair que la réduction du coût du module nécessite de réduire le coût de l'élaboration du substrat. La méthode la plus accessible dans l'industrie est la réduction de l'épaisseur des plaques de silicium tout en améliorant la passivation des surfaces et le confinement optique [7]. Seulement il est difficile de descendre en dessous de 150 μm d'épaisseur sur des plaques de grande surface car il y a un risque de casse lors de la réalisation de la cellule.

1.3 Classification simplifiée des filières photovoltaïques

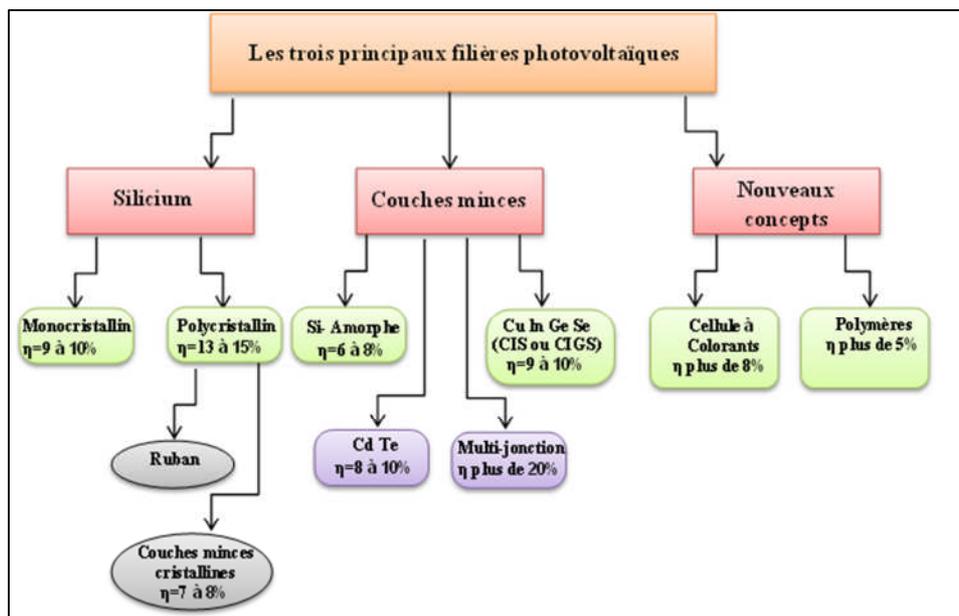


Figure II-3. Présentation simplifiée des trois principales filières photovoltaïques [1]

Sur la figure II-3 nous avons présenté une classification simplifiée de différentes technologies. Reste à noter que les rendements indiqués sont des rendements commerciaux des modules en ce qui concerne les nouveaux concepts ; il s'agit seulement d'une estimation.

1.4 Etude des principales filières photovoltaïques

1.4.1 La filière du silicium

Cette filière représente la technologie de première génération. Elle regroupe toutes les cellules à base de silicium monocristallin ou polycristallin. Elle est composée de cellules en silicium à homojonctions et à hétérojonctions. Elle domine le marché de la production des modules photovoltaïques par 67 % en 2008 [8], l'utilisation des substrats de silicium cristallin assez épais d'environ 250 μm . Ces cellules solaires augmentent le coût de fabrication d'où la prédisposition vers l'utilisation de substrats moins épais pour baisser les coûts de fabrication.

Le meilleur rendement obtenu en laboratoire est de 25 % par le professeur Martin Green de l'UNSW (University of New South Wales), par exemple.

1.4.1.1 Structure photovoltaïque à haut rendement (PERL)

Autrement dit, la cellule standard optimisée ou structure PERL, l'architecture standard des cellules photovoltaïques est créée à partir d'un compromis entre l'acquisition d'un rendement élevé par l'utilisation d'un procédé de fabrication moins cher. Depuis l'apparition de la première cellule photovoltaïque (structure standard) plusieurs recherches ont été achevées dans le but d'optimiser cette structure, en particulier les recherches menées par l'équipe de l'UNSW (University of New South Wales) [9], qui avaient pour but d'optimiser le rendement des cellules solaires en silicium cristallin (c-Si). Leurs travaux de recherches reposent particulièrement sur l'amélioration du rendement par l'optimisation de la texturation afin d'avoir un meilleur confinement optique ainsi qu'une diminution des recombinaisons en volume et en surface, le tout, sans provoquer de pertes résistives. Depuis plusieurs structures sont continuellement apparues : PESC (Passivated Emitter Solar Cell), PERT (Passivated Emitter Rear Totally diffused) et enfin PERL (Passivated Emitter Rear Locally diffused [10]. Cette dernière possède le record de rendement sous AM1.5, pour une cellule en silicium cristallin, avec un rendement de 24.7 % [11] ; cette structure est schématisée sur la figure II-4.

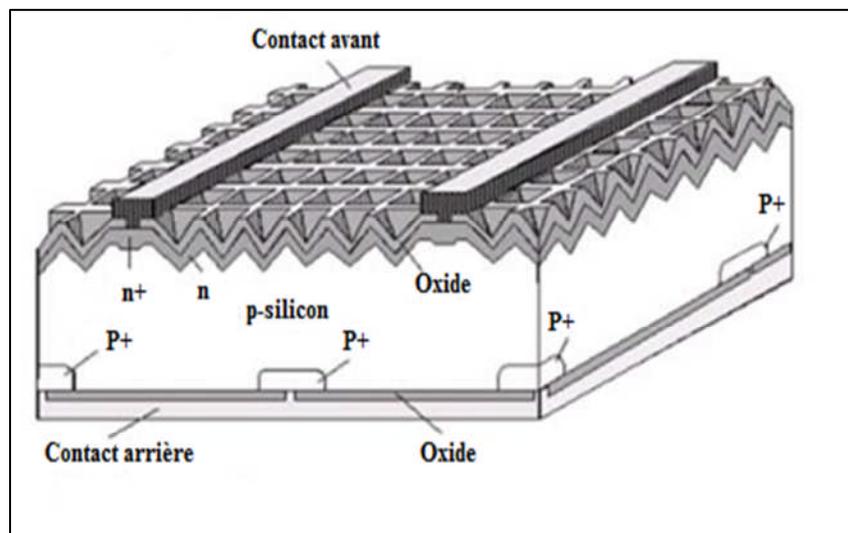


Figure II-4. Structure d'une cellule photovoltaïque en Si monocristallin à haut rendement (24.7%) PERL [10]

Ces structures de 4 cm², représentées sur la figure II-4, sont fabriquées à l'aide de procédés issus de la microélectronique (photolithographie, oxyde thermique) sur un substrat de silicium cristallin (c-Si) FZ (Float Zone) de type p (1 Ω.cm et 450 μm d'épaisseur). La

face avant (face éclairée) de la cellule solaire est texturée en «pyramides inversées». Ce type de texturation permet une réduction importante du coefficient de réflexion et par conséquent assure un meilleur confinement optique dans la cellule. Une jonction p-n est réalisée sur toute la surface avant pour assurer la séparation des porteurs de charge. L'émetteur ainsi réalisé est peu dopé afin de limiter les recombinaisons. Le contact ohmique sur l'émetteur est déposé sous forme de grille. La géométrie de cette grille doit assurer une faible résistance série. Pour obtenir un contact ohmique, la région sous le contact avant est fortement dopée n+ (émetteur sélectif, [12]). Une fine couche d'oxyde thermique est formée sur l'émetteur pour réduire la recombinaison sur la face avant de la cellule. Sur l'oxyde, une double couche anti-réfléchissante est déposée pour réduire les pertes par réflexion.

De même que la face avant, la face arrière de la cellule est passivée par de l'oxyde thermique. Pour assurer un bon contact arrière, la région du contact est dopée p+. Néanmoins, le contact entre le métal et le silicium n'est pas continu afin de limiter la recombinaison sur le contact et dans la région fortement dopée p+. Par contre, la métallisation de la face arrière est continue : elle couvre les zones de contact et l'oxyde de passivation servant ainsi de réflecteur arrière [13]. Pour les cellules PV en silicium d'épaisseur 80 μm , la valeur du rendement est de 28.8%, dans les conditions d'illumination AM 1.5G et en l'absence de réflexion de la face avant, de recombinaison en surface et en volume [14].

La technologie des émetteurs sélectifs repose sur la réalisation d'un fort dopage seulement sous les contacts et d'un dopage plus faible par ailleurs. Ceci permet de diminuer les recombinaisons dans l'émetteur, mais également à sa surface. Il est en effet plus facile de passiver une zone faiblement dopée qu'une zone fortement dopée. Concernant le BSF, la procédure est la même sauf qu'il n'est pas nécessaire de réaliser un dopage léger hors des contacts. Un oxyde thermique assure la passivation de la surface arrière [15].

1.4.1.2 Structure de cellules photovoltaïques industrielles en silicium

Le rendement des cellules solaires connues dans l'industrie reste toujours moins par rapport à celles achevées dans les laboratoires. A titre d'exemple la cellule PERL avec un rendement 24.7% détenu en laboratoire mais les cellules PV industrialisées, le rendement est entre 15 et 17% pour les cellules conventionnelles en silicium monocristallin et 14 % [15] pour les cellules en silicium polycristallin. Deux facteurs expliquent cette différence dans le rendement entre les cellules PV industrielles et celles élaborées dans les laboratoires de recherches. En effet, certains matériaux et techniques (silicium FZ, lithographie, double couche antireflet, émetteur sélectif,...etc.) utilisés pour la cellule photovoltaïque succès, ne peuvent pas être adaptés pour l'industrie car ils sont trop chers. La plupart des cellules

photovoltaïques en silicium massif industrialisées ont une structure représentée sur la figure II-5. Or la structure de la cellule solaire industrielle est simplifiée afin de réduire son coût. Par exemple, la texturation de la face avant est réalisée sous forme de «pyramides aléatoires» ou texturation acide et on dépose ensuite une simple couche anti réfléchissante en SiN. De même, le champ électrique face arrière est obtenu par recuit d'une couche en Aluminium déposée par sérigraphie.

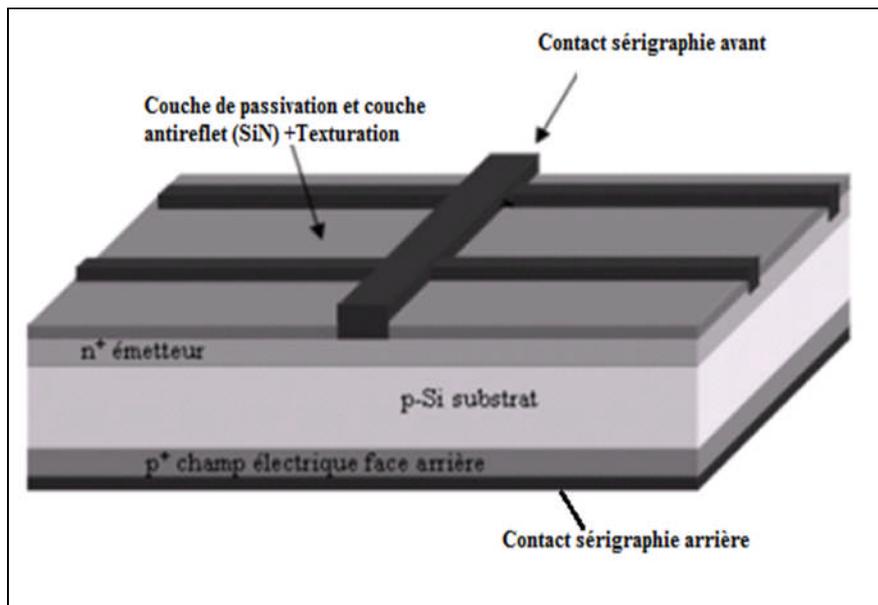


Figure II-5. Structure d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium cristallin [16]

De nombreuses recherches ont été effectuées ces dernières années afin d'améliorer la passivation des matériaux et des surfaces en face avant et arrière, pour diminuer la résistance série et par conséquent le coût de la cellule photovoltaïque. En ce qui concerne la passivation par le nitrure de silicium, elle a donné des résultats remarquables en l'utilisant comme couche antireflet. Il est particulièrement bien compatible au silicium poly cristallin. Aussi le BSF est utilisé pour passiver la face arrière de la cellule. L'intérêt d'utiliser le nitrure de silicium et le BSF simultanément dans un procédé est lié à la cuisson commune des contacts avant et arrière. Leur combinaison permet une meilleure passivation du matériau lorsqu'ils sont appliqués séparément [17]. Afin de diminuer la résistance série et d'augmenter le courant de court-circuit, une approche très intéressante est celle de l'émetteur sélectif. Les différents procédés permettent d'obtenir une telle structure : la structure avec contacts enterrés déjà mis dans l'industrie [18].

1.4.2 La filière des couches minces (la technologie de deuxième génération)

Les contrariétés physiques du silicium cristallin ont encouragé l'orientation de la recherche vers la découverte d'autres matériaux. Elle a notamment privilégié les couches minces, c'est-à-dire le dépôt sur un substrat de matériaux semi-conducteurs. Le véritable défi technologique est l'opération de dépôt en plus de plusieurs méthodes énoncées actuellement : comme la sérigraphie, l'évaporation sous vide, la pulvérisation cathodique, l'électro dépôt. Ce n'est que dans l'avenir quand va connaître quelle technique est la meilleure pour le développement des cellules PV. Cependant, les applications réalisables suscitent un fort intérêt dans la vie quotidienne. Trois filières semblent s'imposer. La première utilise le silicium amorphe ou polycristallin. La seconde utilise le tellure de cadmium. La troisième utilise des combinaisons à partir de l'indium.

❖ **Avantages des couches minces :**

- Fabrication économique (budget thermique réduit)
- La productivité de Watt crête est moins que pour celles des matériaux cristallins, car la technologie est moins sensible aux températures élevées.

❖ **Inconvénients**

- Connu avec des rendements plus faibles
- L'utilisation des matériaux rares (cas du Cadmium Tellure, Indium, Sélénium) et qui ont un impact néfaste sur l'être humain et l'environnement.

1.4.2.1 Cellules tandem (multijonctions)

Les cellules sont soit à simple jonction (p-n) soit à des multiples jonctions. Les épaisseurs sont de l'ordre du micromètre (μm) ce qui rend cette filière rentable au point de vue prix, mais par conséquent les rendements diminuent. Les meilleurs rendements obtenus avec des triples jonctions sont de 15 %. Le spectre solaire est très large ou les cellules solaires à une seule jonction ne permettent pas d'exploiter ce dernier convenablement, ainsi plusieurs matériaux solaires ayant une faible absorption dans le bleu et dans l'infrarouge ; il faut empiler plusieurs cellules dans l'ordre décroissant du gap. La tension de circuit ouvert V_{oc} des tandems solaires atteint des valeurs très optimisées, par exemple le tandem à trois jonctions de InGaP/GaAs/Ge a une tension de 2,1V, il peut exploiter de 300 à 1900 nm. La figure II-6 (b) est une représentation schématique d'une structure à trois cellules montées en série suivant la configuration monolithique [19] et la figure II-6 (a) qui est une représentation du principe.

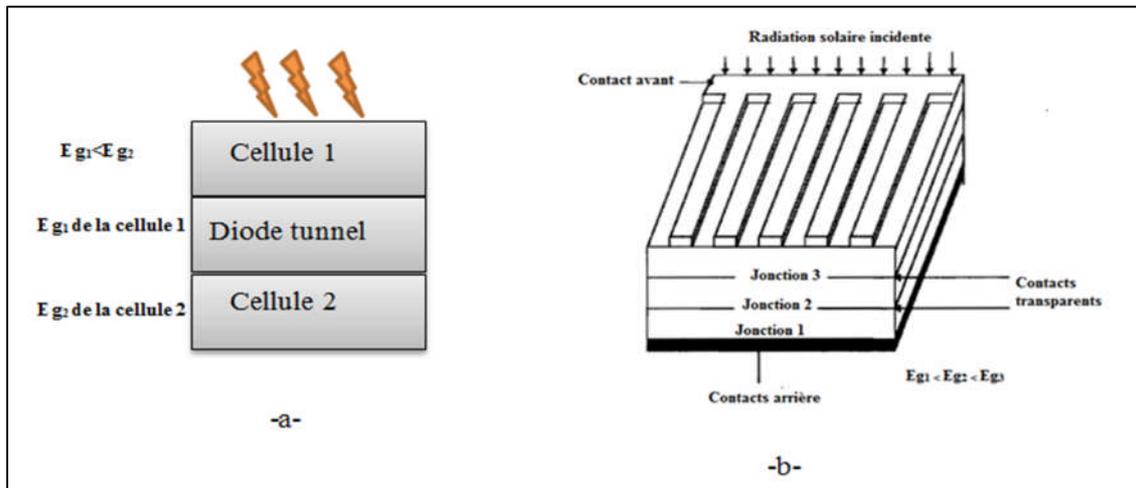


Figure II-6. (a) principe de fonctionnement (cellule tandem à deux jonctions) [17]
 (b) Représentation schématique d'une structure à trois cellules montées en série suivant la configuration monolithique [19].

Citons quelques tandems qui offrent des rendements élevés, AlGaAs/GaAs, GaAs/Ge, AlGaAs/Si et InP/InGaAs [17].

- Cellules multi-jonctions en semi-conducteurs III-V (GaAs, AlGaAs, InGaAsP).

Avec cette filière, on a pu obtenir de très bons rendements mais les coûts de fabrication de ce type de cellule reste très élevé (bâti sous ultravide, croissance très lente). Les cellules sont estimées à des applications spatiales. Un rendement de 32 % a été obtenu avec une triple jonction GaInP/GaAs/Ge.

1.4.2.2 Cellule solaire sur un substrat CdTe

Les cellules solaires construites à partir de tellure de cadmium ont une bonne caractéristique mais elles restent bridées par le problème de rareté du cadmium. Le rendement de conversion électrique dans ce genre de cellules solaires est de 8 à 10%. La figure II-7 montre une Cellule solaire en CdTe.

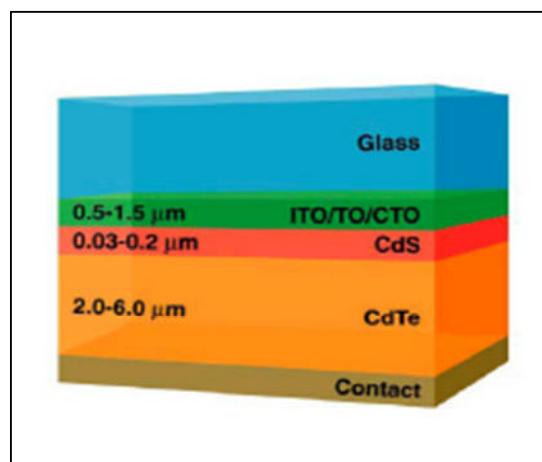


Figure II-7. Cellule solaire en CdTe [20]

1.4.2.3 Cellules en couches minces de la famille des chalcopyrites

Autrement dit de la famille des Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS) ou Cu(In,Ga)(Se,S)_2 (CIGSS). Des rendements de l'ordre de 20,1 % ont été obtenus avec des cellules CIGS. Uniquement la rareté de l'indium et du gallium peuvent créer un obstacle pour cette filière.

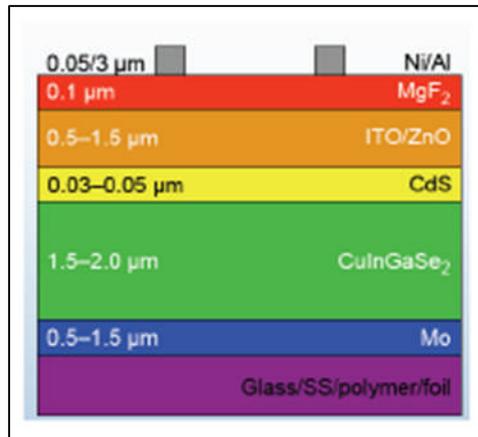


Figure II-8. Cellule solaire en chalcopyrites [20]

1.4.2.4 Cellule photovoltaïque en silicium amorphe

Le silicium amorphe est une cellule élaborée par pulvérisation cathodique de silicium ou de dissociation du silane. Actuellement l'une des filières les plus économique, mais leurs rendement reste faible (5 à 7%) [21]. Cette filière en cours de développement cherche encore à réduire ses coûts par l'utilisation des procédés de fabrication d'un prix bas. Les modules à base de silicium en couches minces présentent l'avantage d'une production stable, à une absorption lumineuse faible ou à une la température élevée. La fabrication des cellules photovoltaïques en silicium amorphe se fait par dépôts sous vide, à partir de plusieurs gaz, une des techniques les plus utilisées étant la PECVD. Connue d'une couleur grise très foncée. Très utilisées dans des calculatrices et les montres dites « solaires ». La cellule solaire est schématisée sur la figure II-9.

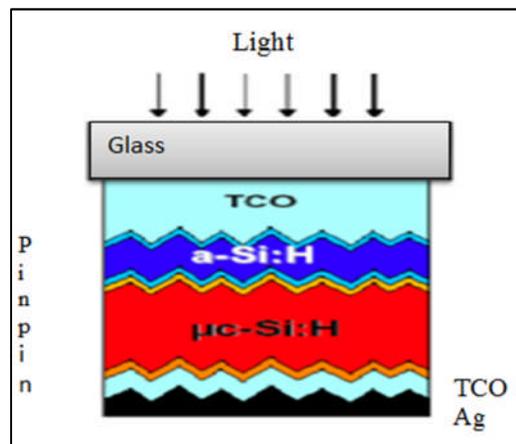


Figure II-9. Cellule solaire en silicium amorphe [22]

Nous pouvons citer aussi quelques avantages et inconvénients de ce type de cellule PV

➤ **Avantage :**

- Le fonctionnement de ce type de cellules nécessite un éclairage.
- La technique utilisée pour la fabrication est d'un prix convenable
- L'intégration des cellule en silicium amorphe dans les module se fais sur des supports souples ou rigides.

➤ **Inconvénients :**

- Le rendement est toujours faible de 5 % à 7 %
- La surfaces utilisée est plus importantes que celles utilisée pour le silicium cristallin (ratio Wc/m^2 plus faible, environ $60 Wc/m^2$)
- Procède des performances qui diminuent avec le temps. Dans un premiers temps d'exposition à la lumière naturelle (3-6 mois).

1.4.3 Nouveaux concepts

1.4.3.1 Cellules organiques

Les cellules organiques sont réalisées avec des procédées de fabrication moins cher. Récemment ont connu un intérêt important, même si l'oxydation reste l'un des problèmes qui bloc cette technologie. Les recherches sur ce types de cellules n'aboutisse qu'à des rendements qui ne dépassant pas les 5 %. Les cellules à colorants (*Grätzel*) sont aussi à bas coûts avec des rendements d'un maximum de 11 % ; mais l'affaiblissement rapide de ces cellules est problématique.

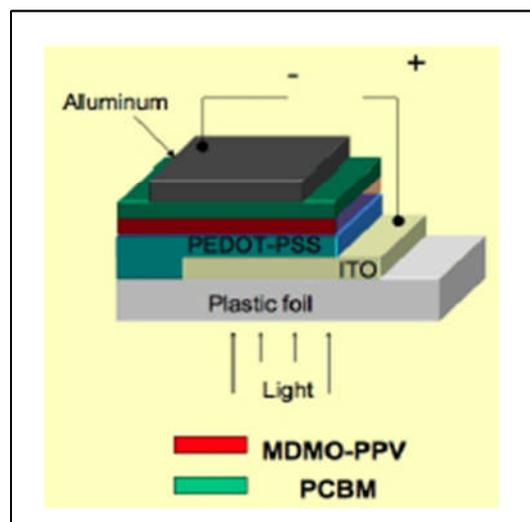


Figure II-10. Cellule solaire organique [22]

1.4.3.2 Cellules à colorant

Les rendements obtenus et les coûts de production des cellules photovoltaïques à colorant se diffèrent des cellules photovoltaïques en silicium utilisées à usage domestique, malgré que le principe de fonctionnement reste le même. Cette structure offre des coûts de production intéressants mais redemande l'emploi sous la forme de colorant. Ce dernier va avoir un but très précis: celui de produire des électrons d'énergie au moins égale à celle de la bande de conduction du récepteur d'électron qui est un matériau semi-conducteur (oxyde de titane) [23]. Il est nécessaire qu'un photon existe un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction pour que l'effet photovoltaïque soit possible. Sur l'anode (plaque de verre conducteur) on fixe un semi-conducteur. Cependant, l'oxyde de titane capte les photons dans le domaine des UV, c'est pourquoi on fixe un colorant sur la surface de TiO_2 pour aider à la capture des photons. En effet, le colorant capte les photons dans le domaine du visible, de plus ; l'énergie des électrons produite par le colorant est légèrement supérieure à celle de la bande de conduction du TiO_2 . Cela va permettre la transmission de l'électron du colorant au TiO_2 puis au conducteur. Le colorant est adsorbé sur l'oxyde de titane. Pour permettre un rendement optimal, il faut que la couche de TiO_2 forme une structure fractale pour avoir la plus grande surface possible. Lorsqu'un photon arrive sur le colorant, il va libérer un électron sur la bande de conduction de TiO_2 . Cet électron ainsi libéré va créer une différence de potentiel dans le semi-conducteur et va se trouvé attirer de l'autre côté du semi-conducteur, sur l'anode. Ainsi, l'électron va passer de l'anode à la cathode. Pour que le colorant retrouve son électron perdu, il va fournir un électron d'énergie égale à la bande de valence du colorant mais d'énergie inférieure à la bande de conduction de TiO_2 . L'obtention des électrodes en verre conducteur permet d'avoir une cellule totalement transparente qui est utilisable des deux côtés. Ce genre de cellule PV est représenté sur la figure II-11.

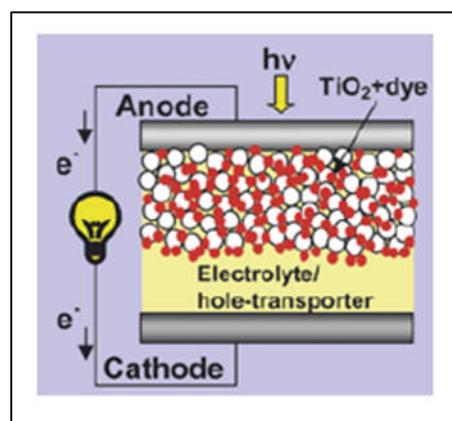


Figure II-11. Cellule solaire à colorant [22]

2. Autres types de cellules solaires

2.1 Cellule solaire de type Schottky

Le principe d'une cellule de type Schottky, c'est le dépôt d'un métal bien choisi en couche mince sur le silicium. Le diagramme énergétique de ce type de cellules solaires sous rayonnement solaire est présenté sur la figure II-12 ci-dessous [24].

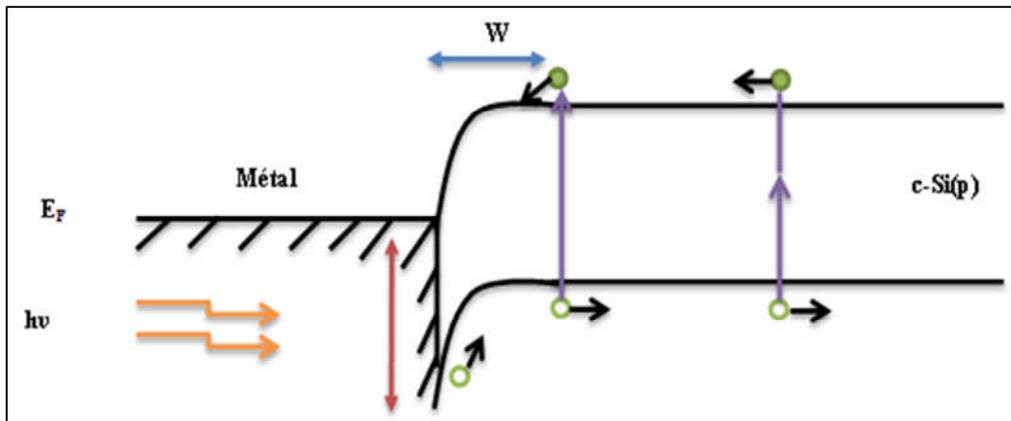


Figure II-12. Cellule solaire de type Schottky

➤ Le rayonnement solaire peut être absorbé dans le métal et crée des trous au-dessus de la barrière dans le semi-conducteur. Les rayonnements de courtes longueurs d'onde sont absorbés dans la région de déplétion dans le semi-conducteur et ceux de grandes longueurs d'onde sont absorbés dans la région neutre, créant des paires électron-trou comme dans la jonction (p-n). La couche métallique doit être très mince pour permettre à la lumière de pénétrer dans le semi-conducteur. La jonction Schottky présente de nombreux avantages

- La jonction Schottky s'adapte bien avec le silicium polycristallin et aux cellules solaires en couches minces
- Procédé de fabrication à basses températures.
- La radiation crée un champ électrique élevé près de la surface ce qui augmente la résistance.
- La réponse spectrale est améliorée.

2.2 Cellules à BSF

L'interface entre l'empilement des couches dans une cellule solaire joue un rôle très important dans la détermination des propriétés optoélectroniques des cellules solaires. Comme par exemple l'interface entre le contact et la face arrière, où le contact ohmique ayant une grande vitesse de recombinaison. Afin de collecter les paires électron-trou créées par le rayonnement lumineux du spectre solaire, la nécessité de présence d'un champ arrière « BSF » « Back Surface Field » est très approprié. Sur la figure II-13 nous avons présenté le principe

et l'intérêt du BSF. Ce champ améliore les caractéristiques électriques de la cellule solaire et la tension en circuit ouvert V_{co} par diminution du courant d'obscurité I_{obs} . Alors, les porteurs devenus minoritaires après leurs injections dans la zone arrière s'éloignant de la zone de déplétion, le champ électrique arrière « BSF » les repousse vers la jonction. Dans une cellule solaire à « BSF » au silicium, la longueur de diffusion et la durée de vie des porteurs minoritaires en excès dans les régions de base sont augmentées [25].

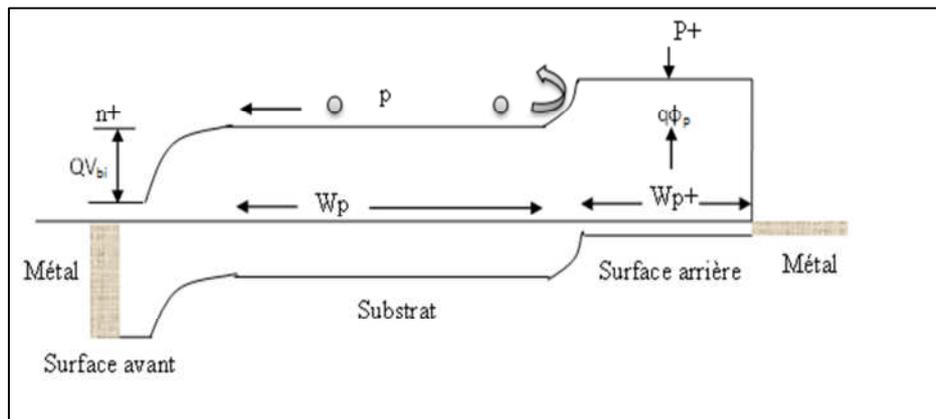


Figure II-13. Diagramme énergétique d'une cellule solaire à couche BSF [25]

2.3 Cellule solaire de type structure MIS arrière Métal

Les cellules solaires de type structure MIS arrière métal est une structure construite à partir d'un film isolant très mince ($\approx 20\text{\AA}$) et qui se forme entre le métal et le substrat semi-conducteur. L'isolant est obtenu soit par oxydation superficielle du silicium (chimiquement par le (HNO_3) ou thermiquement, soit par dépôt d'une couche en SiO_2 à une atmosphère examinée. Car l'oxyde peut se former à une température basse, dans le futur proche la recherche tend vers la réalisation des structures fabriquées sur des substrats polycristallins ou amorphes fournissant une solution avantageuse pour des applications terrestres. Un rendement de 18% est obtenu par cette structure dans la condition AM1 [24].

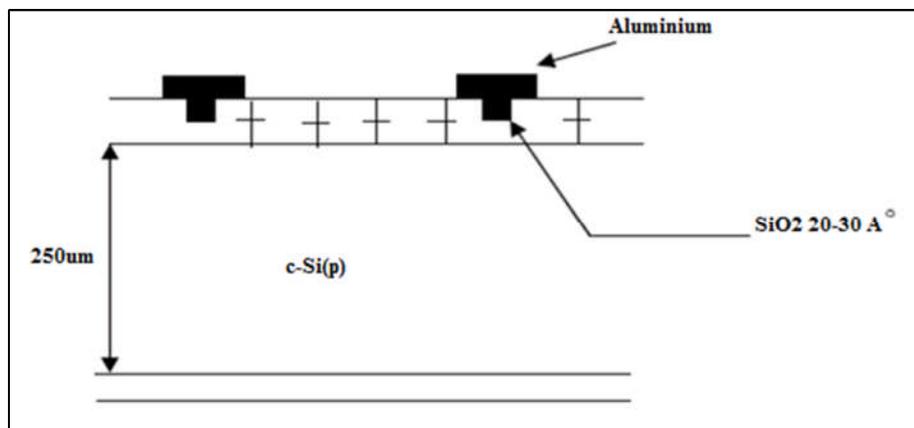


Figure II-14. Cellule solaire de type MIS

3. Les cellules photovoltaïques industrielles en silicium cristallin à haut rendement

3.1 L'association des deux filières amorphes –cristallines

Au cours des dernières années, un pont a été jeté entre les deux filières silicium, citées ci-dessus, afin de réunir leurs qualités et de minimiser leurs handicaps. En effet, l'amorphe absorbe correctement la couleur bleue et forme une multijonction efficace avec les performances du cristallin sur le rouge. On pourrait ainsi approcher les 20 % [26] de rendement pour un coût néanmoins bien plus élevé que celui d'une cellule classique. L'association de silicium amorphe et de silicium micro morphe dans des couches minces, dites tandem, poursuit la même logique, comme les cellules triple jonction à très haut rendement. En effet, des recherches se développent sur les cellules à hétérojonctions de silicium, qui combinent le silicium cristallin et des couches ultra-minces de silicium désordonné, (amorphe) déposées.

Notre travail est orienté vers la filière de silicium et plus particulièrement les cellules à hétérojonctions à base de silicium cristallin. Nous présenterons dans la suite les cellules conventionnelles à hétérojonctions, les cellules à contacts arrière interdigités à homojonctions (IBC-classique) et les cellules à contacts arrière interdigités à hétérojonctions (IBC-SiHJ).

3.2 Etude théorique des cellules conventionnelles de silicium à hétérojonctions

3.2.1 L'intérêt de l'hétérojonction

Dans cette partie du travail, on s'intéresse à l'étude des cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium amorphe/silicium cristallin. Ces cellules sont constituées d'un substrat en silicium cristallin (c-Si) de type p ou n, et d'un émetteur de silicium amorphe formé par le dépôt de couches ultra-minces (quelques nanomètres), il est réalisé à basse température.

Actuellement l'hétérojonction à base de silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H) / silicium cristallin (c-Si) connaît un grand intérêt pour les applications photovoltaïques au niveau de la recherche et de développement industriel : par exemple, l'entreprise japonaise SANYO qui arrive aujourd'hui à produire des modules dérivés de cellules HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer), dont les avantages sont multiples [27]

- Un fort potentiel d'augmentation de rendement.
- Une fabrication à faible budget thermique ($T \leq 250^\circ\text{C}$).
- Meilleure tenue en température et une application adaptée au substrat mince.

Pour bien détailler ce phénomène, on commencera ce chapitre par une étude théorique consacrée aux hétérojonctions en général, et nous présenterons en particulier la physique de l'hétérojonction silicium amorphe/ silicium cristallin et ses bénéfices pour la cellule solaire (IBC) plus tard dans les chapitre qui suivent.

3.2.2 Principe de l'hétérojonction

3.2.2.1 Généralités

Un échange de charges s'établit au moment où deux matériaux métal/semi-conducteur, semi-conducteur /semi-conducteur, isolant / semi-conducteur entrent en contact, de façon à faire tendre le système vers l'équilibre thermodynamique. Dans le cas d'une hétérojonction, la zone fortement dopée constituant l'émetteur dans une homojonction, sera donc remplacée par un matériau de grande largeur de bande interdite. On dit alors que la vitesse de recombinaison de surface d'avant est remplacée par une vitesse de recombinaison d'interface (S_{it}) à condition que le matériau de grande largeur de bande interdite soit passif (faible absorption, et une recombinaison quasi-nulle). La structure de bande finale présentée dans la figure II-15 dépend de plusieurs paramètres des deux matériaux en contact : la valeur des largeurs des bandes interdites E_{g1} et E_{g2} , des affinités électroniques χ_1 et χ_2 et des niveaux de dopage δ_n et δ_p

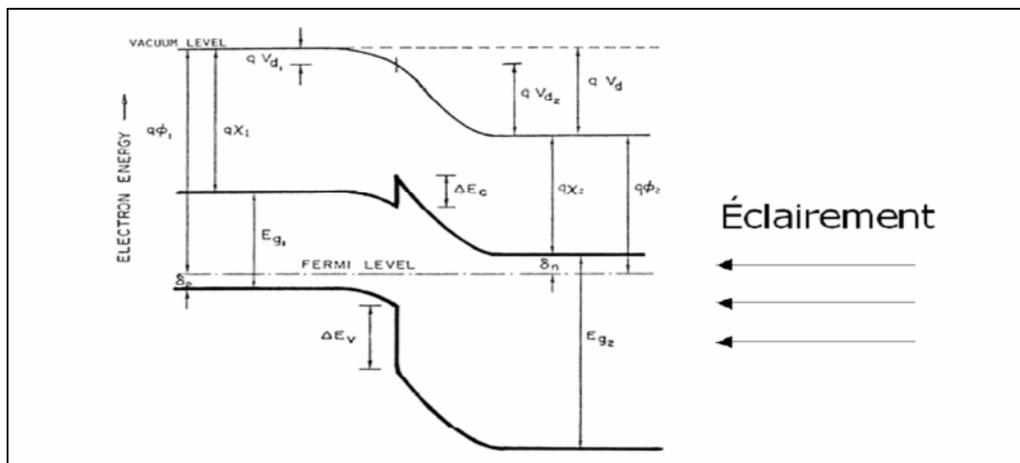


Figure II-15. Exemple d'une hétérojonction entre deux matériaux (E_{g1} , E_{g2})

(χ_1 , χ_2) [27]

Les propriétés de transport des porteurs sont généralement dominées par des phénomènes de piégeage au niveau de l'interface entre la région « n » et la région « p ». Le transport dans la zone de déplétion est lié aux niveaux d'énergie présents à l'interface (combinaison des recombinaisons et du courant tunnel). Parmi les modèles qui ont traité l'hétérojonction c'est le modèle d'Anderson.

3.2.2.2 Etude du modèle d'Anderson

Le principe du modèle repose sur la prise en compte des propriétés électroniques des matériaux utilisés : permittivité électrique ϵ , affinité électronique χ et largeur de bande interdite E_g . Les différences entre les valeurs de E_{g1} et E_{g2} et les affinités électroniques χ_1 , χ_2 engendrent une discontinuité au niveau du raccordement des bandes de conduction et de valence ΔE_c et ΔE_v .

Le modèle d'Anderson ne prend pas en considération les états d'interface et s'appuie sur l'hypothèse que le transport du courant se fait par injection dans les régions quasi- neutres n et p ou bien par recombinaison / génération dans la zone de charge d'espace (ZCE).

En se basant sur l'hypothèse ; les quasi-niveaux de Fermi ne varient pas à travers la zone de déplétion comme pour une homojonction : on obtient les relations suivantes [28].

$$\Delta E_c = (\chi_1 - \chi_2) q \quad (\text{II-1})$$

$$\Delta E_v = (\chi_1 - \chi_2) q + E_{g2} - E_{g1} \quad (\text{II-2})$$

$$qV_d = qV_{d1} + qV_{d2} = E_{g1} - \delta_n - \delta_p + \Delta E_c \quad (\text{II-3})$$

Avec

- qV_{d1} , qV_{d2} : tension de diffusion de chaque région.
- δ_n , δ_p : différence d'énergie entre le niveau de Fermi et la bande de conduction ($\delta_n = E_c - E_f$) et la bande de valence ($\delta_p = E_f - E_v$).

La valeur de la tension de diffusion est liée à la tension en circuit ouvert. Le courant de court-circuit dépendra essentiellement du taux de recombinaison des différentes régions et de l'absorption lumineuse liée aux largeurs et types de bande interdite (gap directe ou indirecte).

Le modèle d'Anderson peut être modifié par la présence d'une grande densité d'état d'interface active qui engendre deux phénomènes :

Les états chargés modifient le profil des bandes, en diminuant ou en augmentant le niveau des bandes de conduction à l'interface par rapport au niveau de Fermi. (Q_{it}) est la densité de ces charges.

Les états d'interface génèrent une grande densité de centres de recombinaisons qui justifient les fortes valeurs de courant de saturation. L'influence de ces états d'interface sur les recombinaisons peut être quantifiée par une vitesse de recombinaison effective à l'interface S_{it} [28].

Un exemple d'influence des états d'interface chargés électriquement et des dipôles sur le profil des bandes (voir la figure II-16). Différents changements introduits dans le modèle de base (recombinaison directe à travers les états d'interface, contrôle du transport de charge

par la vitesse de recombinaison d'interface, effet tunnel) permettent de mieux ajuster la théorie avec l'expérience [29].

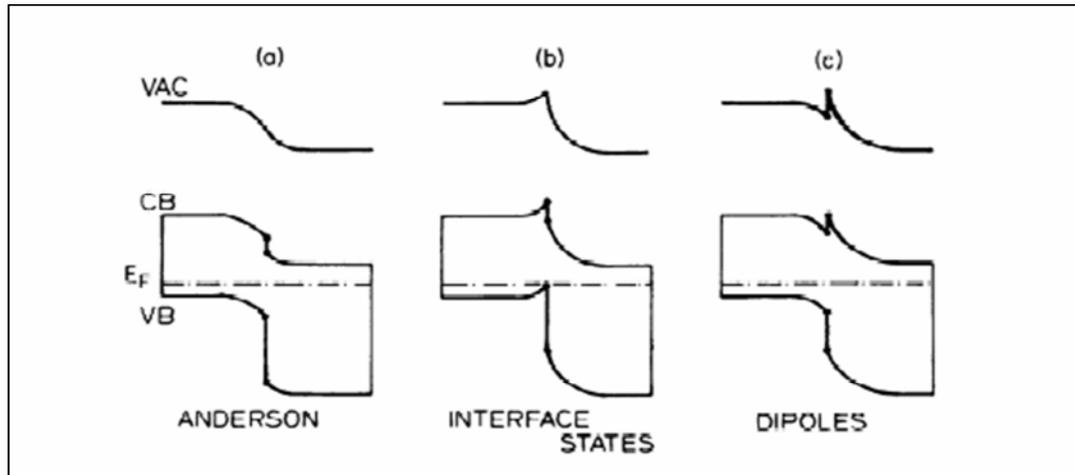


Figure II-16. Diagramme de bandes d'une hétérojonction p/n selon 3 modèles : (a) l'influence des états d'interface et dipôles (Anderson), (b) en incluant les états d'interface et (c) en incluant les dipôles [30]

3.2.2.3 Affinité électronique et discontinuité des bandes

Le modèle d'Anderson considère que la discontinuité des bandes dépend de l'affinité électronique et du gap des deux matériaux (voir les relations II-1, II-2). La présence d'une discontinuité apparaît clairement au niveau expérimental ainsi que sa dépendance directe vis à vis des affinités électroniques. Elles restent incertaines à cause des effets d'interface qui sont difficiles à déterminer.

Par définition, l'affinité électronique représente la quantité d'énergie nécessaire pour qu'un électron passe de la bande de conduction au niveau du vide [27]. La valeur de χ est souvent déduite des mesures du travail de sortie Φ tel que

$$\Phi = \delta + \chi \quad (\text{II-4})$$

Les interactions entre les différents matériaux sont uniques et les états de surface d'interface ainsi que la variation de E_g à la surface vont considérablement influencer sur la valeur de l'affinité électronique.

3.2.3 Etude de l'hétérojonction silicium amorphe/ silicium cristallin face avant

Cette partie est destinée à comprendre en détail le fonctionnement de l'hétérojonction silicium amorphe / silicium cristallin en face avant : TCO / a-Si : H / c-Si, à partir du modèle d'Anderson.

3.2.3.1 Analyse de bande de diagramme de l'hétérojonction silicium amorphe (n)/silicium cristallin (p)

Cette hétérojonction consiste à mettre en contact le silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H) avec le silicium cristallin (c-Si). L'énergie de gap du silicium amorphe (a-Si : H) varie de ($1.5\text{eV} \leq E_g \leq 1.9\text{eV}$) : en effet, elle est plus élevée que celle du silicium cristallin (c-Si) (1.12eV). La différence de gap entre le silicium cristallin et le silicium amorphe est à l'origine de l'hétérojonction, elle se traduit par des discontinuités des niveaux d'énergie à l'interface des matériaux. L'injection des porteurs est alors déterminée par l'action de deux champs électriques : l'un est dû à la différence de dopage dit « champ interne » et l'autre aux discontinuités. Le champ interne s'étend sur quelques centaines d'Angstroms pour des semi-conducteurs très dopés et de quelques microns pour des semi-conducteurs moins dopés. La figure II-17 représente le diagramme de bande de l'hétérojonction a-Si :H(n^+) / c-Si(P), la couche de silicium amorphe dopé n^+ forme l'émetteur de la cellule photovoltaïque, le gap de silicium amorphe est de l'ordre de 1.8 eV pour un gap optique 1,65 eV. Mais les discontinuités de bande d'une telle hétérojonction sont difficiles à calculer. En effet, elles dépendent du matériau a-Si :H qui lui-même varie fortement des conditions de dépôt.

Les discontinuités de bande dépendent notamment du contenu en hydrogène du silicium amorphe d'hydrogéné : la bande de valence du a-Si :H s'abaisse de 40 mV en moyenne [31].

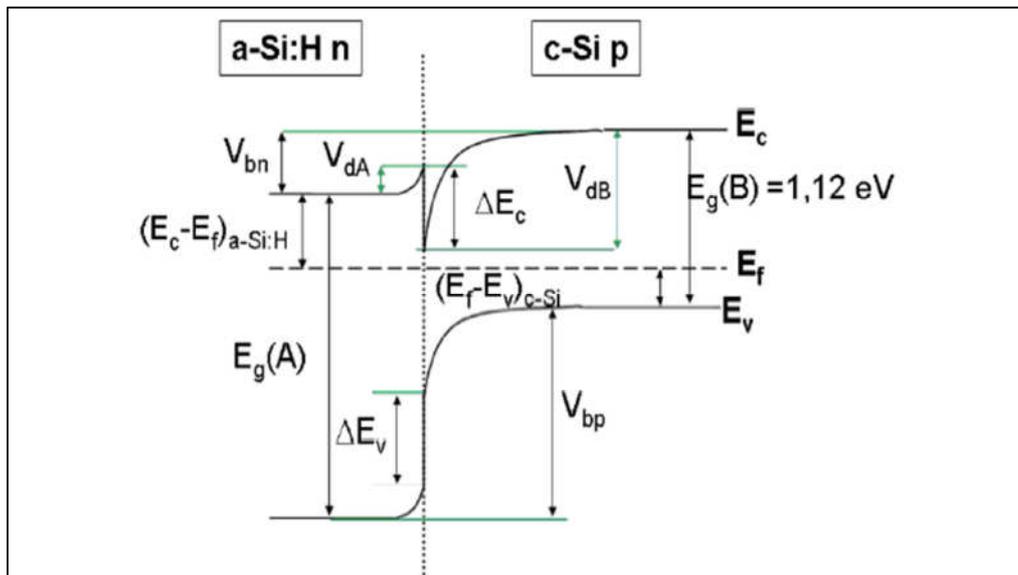


Figure II-17. Diagramme de bandes de l'hétérojonction a-Si :H(n^+) / c-Si(p) [31].

La discontinuité de la bande de valence s'ajoute à l'effet de champ dû à la courbure de bande est renforcé ainsi le confinement des trous dans le matériau cristallin de type p. Par

contre, la discontinuité de la bande de conduction crée une zone d'accumulation des électrons propices aux recombinaisons. L'hétérojonction sera d'autant meilleure que la discontinuité est délicate et varie d'un silicium amorphe à l'autre, suivant les paramètres de dépôt.

Remarque

- Le silicium amorphe est un réseau aléatoire d'atomes de silicium et il est fort probable que la structure de bande de l'hétérojonction varie très localement.
- A la différence des cellules à homojonctions classiques, les zones dopées et la passivation de surface sont réalisées par un unique dépôt de silicium amorphe hydrogéné. Celui-ci possède en effet de bonnes qualités de passivation de surface et l'on peut changer ses propriétés électriques par l'insertion d'impuretés dopantes.
- La conductivité du silicium amorphe (a-Si:H) est très inférieure à celle du silicium cristallin (c-Si), il faut donc ajouter une couche conductrice sur sa surface afin de pouvoir collecter le courant.

➤ Discontinuité des bandes

Pour bien vérifier les phénomènes physiques, on a établi un diagramme de bande (la figure II-18 présentée ci-dessous) basé sur les données (de tableau II-1) [32].

Tableau II-1 Paramètres généralement fixes pour le silicium amorphe et le silicium cristallin

Hétérojonction	$E_{g1}(ev)$	$E_{g2}(ev)$	$\chi_1(ev)$	$\chi_2(ev)$	$\delta_n(ev)$	$\delta_p(ev)$	$\Delta E_{e,v}(ev)$	$V_d(V)$
a-Si:H(n)/c-Si(p)	1.8	1.12	4.00	4.05	0.2- 0.25	0.25	0.05	0.67-0.72
a-Si:H(p)/c-Si(n)	1.8	1.12	3.90	4.05	0.25	0.35- 0.45	0.53	1.05-1.15

La forte discontinuité implique une importante tension de diffusion V_d et une courbure de bande plus marquée que dans le cas de substrat de type p. Alors le champ électrique à l'interface sera plus intense ce qui permettra de mieux supprimer les recombinaisons à l'interface. La discontinuité au niveau des bandes de valences (ΔE_v) n'est pas proche de zéro pour l'hétérojonction sur substrat de type n [32].

Pour l'hétérojonction silicium amorphe/ silicium cristallin, la discontinuité des bandes dépend essentiellement des affinités électroniques de deux matériaux et de la largeur de bande interdite, elle induit une présence d'état d'interface dans chacun des semiconducteurs. Ces états sont chargés et créent des dipôles dont le potentiel réduit la discontinuité des

bandes. Cette discontinuité peut devenir très importante et crée le facteur prédominant dans l'établissement du diagramme énergétique [33].

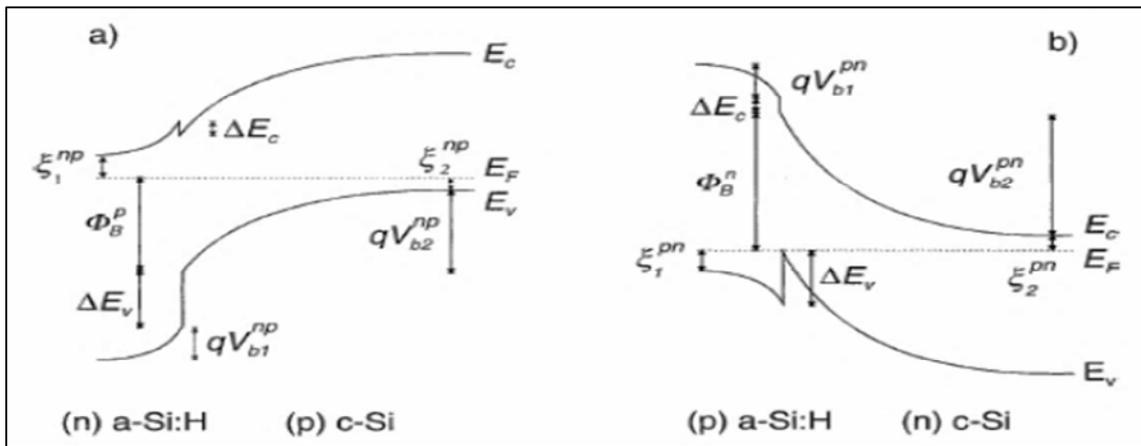


Figure II-18. Diagramme de bande a-Si : H(n)/c-Si(p) et a-Si : H(p)/c-Si(n) [32]

3.3.3 Structures solaires à hétérojonctions

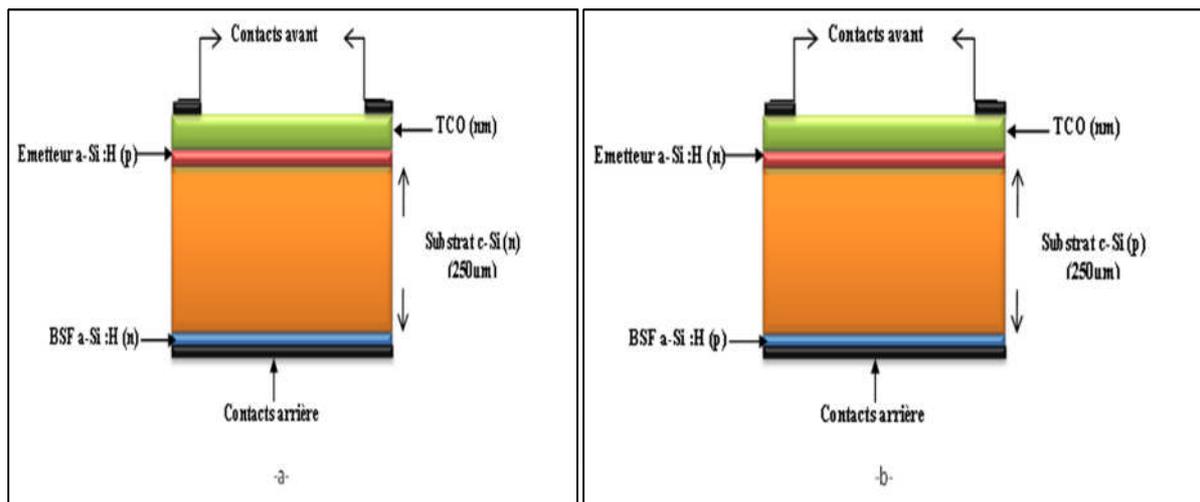


Figure II-19. Structures d'une cellule photovoltaïque silicium à hétérojonctions -a-substrat type (n) ; -b- substrat type (p).

La structure conventionnelle d'une cellule de silicium à hétérojonctions est construite à partir de deux contacts qui sont placés sur les deux faces de la structure (face avant et arrière), déposées sur les deux faces des couches de silicium amorphe hydrogéné où va se créer des hétérojonctions entre le silicium amorphe et le silicium cristallin. Le tout est placé sur un substrat de silicium cristallin respectivement de type p ou n. La couche de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) déposée sur la face avant (face éclairée) a un dopage différent du substrat cristalline (c-Si). Elle est appelée émetteur tandis que la couche de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) déposée sur la face arrière est du même type de dopage que le substrat et

appelée BSF (Back Surface Field). Sur l'émetteur, on dépose un oxyde transparent conducteur. Les contacts métalliques sont enfin placés sur les deux faces de la cellule. La structure à hétérojonction est schématisée sur la figure II-19

3.3.4 Les composants de base d'une cellule de silicium à hétérojonctions

L'objectif est de réaliser une étude théorique sur chaque région de l'hétérojonction amorphe / cristallin sur substrat de type (p) (voir la figure II-19). Parmi ces régions, on peut distinguer la couche d'ITO à l'avant de la cellule, l'émetteur amorphe a-Si :H (n) , l'interface amorphe / cristallin, le substrat et la face arrière.

3.3.4.1 Les oxydes transparents conducteurs (TCO)

Le silicium amorphe hydrogéné a des propriétés différentes de celle de silicium cristallin. Sa structure désordonnée gêne le transfert de charge ce qui se traduit par une faible conductivité. Pour améliorer la prise de contact électrique, on utilise alors des oxydes transparents conducteurs (TOC en anglais, pour transparent conductive oxyde). Utilisés en face avant des cellules photovoltaïques, ces matériaux doivent être transparents aux rayonnements incidents principalement pour les longueurs d'ondes comprises entre 400 nm et 1100 nm [34].

Une mince épaisseur de TCO augmente la résistivité de l'oxyde et une épaisseur plus importante accroît la présence de charges libres qui entraîne une augmentation dans l'absorption optique. Le meilleur moyen d'optimiser simultanément les deux propriétés, résistivité et transparence, est d'augmenter la mobilité des porteurs plutôt que leur nombre.

Les TCO peuvent être déposés par pulvérisation d'une cible d'oxyde dans un plasma composé d'argon et d'oxygène. La surface déposée est lisse et une gravure chimique est nécessaire pour obtenir une meilleure texturation de surface. Il existe une grande variété d'oxydes transparents conducteurs : oxydes de zinc, oxydes d'étain, oxydes d'indium qui peuvent être dopés d'un grand nombre d'éléments atomiques (selon les cas : Al, In, Ga, F, Sn).

Les propriétés de la couche ITO sont très importantes pour les performances finales de l'hétérojonction et doivent donc être étudiées et optimisées [35].

L'ITO est un semi-conducteur à large bande interdite ($E_g > 3$ eV). Dans le cas de l'hétérojonction silicium amorphe / cristallin, cette couche doit être dopée ($\rho = 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$) afin d'assurer un bon contact avec l'émetteur amorphe.

L'oxyde d'indium dopé à l'étain soit $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ plus connu sous son sigle anglais d'ITO (pour Indium Tin Oxide) reste le plus utilisé ; toutefois, l'indium est un élément assez rare

dans la croûte terrestre et son prix pourrait devenir trop coûteux si la demande augmentait drastiquement.

A- le rôle de la couche ITO

Dans le cas des cellules solaire silicium amorphe (émetteur de type n)/ silicium cristallin (substrat de type p), la grande valeur de la bande de l'ITO permet de former une barrière de potentiel au niveau de la bande de valence qui a pour effet de repousser les trous photogénérés dans le silicium amorphe dopé n et ensuite vers le volume ; dans ce cas l'ITO agit donc comme un champ de recombinaison en face avant FSF [36].

B- Etude du contact de l'ITO avec le silicium amorphe a-Si :H(n) et a-Si :H (p)

➤ Cas 1

Le silicium amorphe a-Si :H(n) possède une valeur d'affinité électronique comprise entre 3.9 et 4 eV), cela signifie que le contact avec l'ITO se trouve en régime de déplétion. On considère la barrière de potentiel pour un tel contact (ITO / a-Si : H) comprise entre 0.2eV et 0.4 eV , la formation de ce contact est cependant susceptible de conduire l'émetteur a-Si :H (n) en déplétion, engendrant une chute de la tension en circuit ouvert V_{co} de la cellule , afin d'écranter le champ électrique induit par le potentiel électrique du contact avant, la zone de déplétion à l'intérieur de l'émetteur a-Si :H est de 10 nm environ. Si l'épaisseur de l'émetteur est inférieure à 10nm, des porteurs additionnels provenant de l'absorbeur (substrat) ainsi que des défauts chargés dans l'émetteur seront utilisés pour écranter le champ [37].Ceci affecte considérablement la courbure de bande et mène à une diminution du facteur de forme et de la tension en circuit ouvert V_{co} . Il existe une épaisseur optimale de l'émetteur amorphe dépendante des propriétés électroniques de ce dernier et de la hauteur de barrière formée.

Pour une barrière de potentiel inférieure à 0.2 eV, l'influence de l'ITO sur les performances de la cellule est négligeable. Il faut que l'émetteur soit le plus mince possible. Pour une barrière comprise entre 0.3 et 0.4 eV l'épaisseur optimale se situe entre 5 et 7 nm (sans couche tampon) et 10 et 15 avec couche tampon. La figure II-20 présente le diagramme qui peut se former lors du contact de L'ITO avec le silicium amorphe a-Si : H (n) et a-Si : H (p).

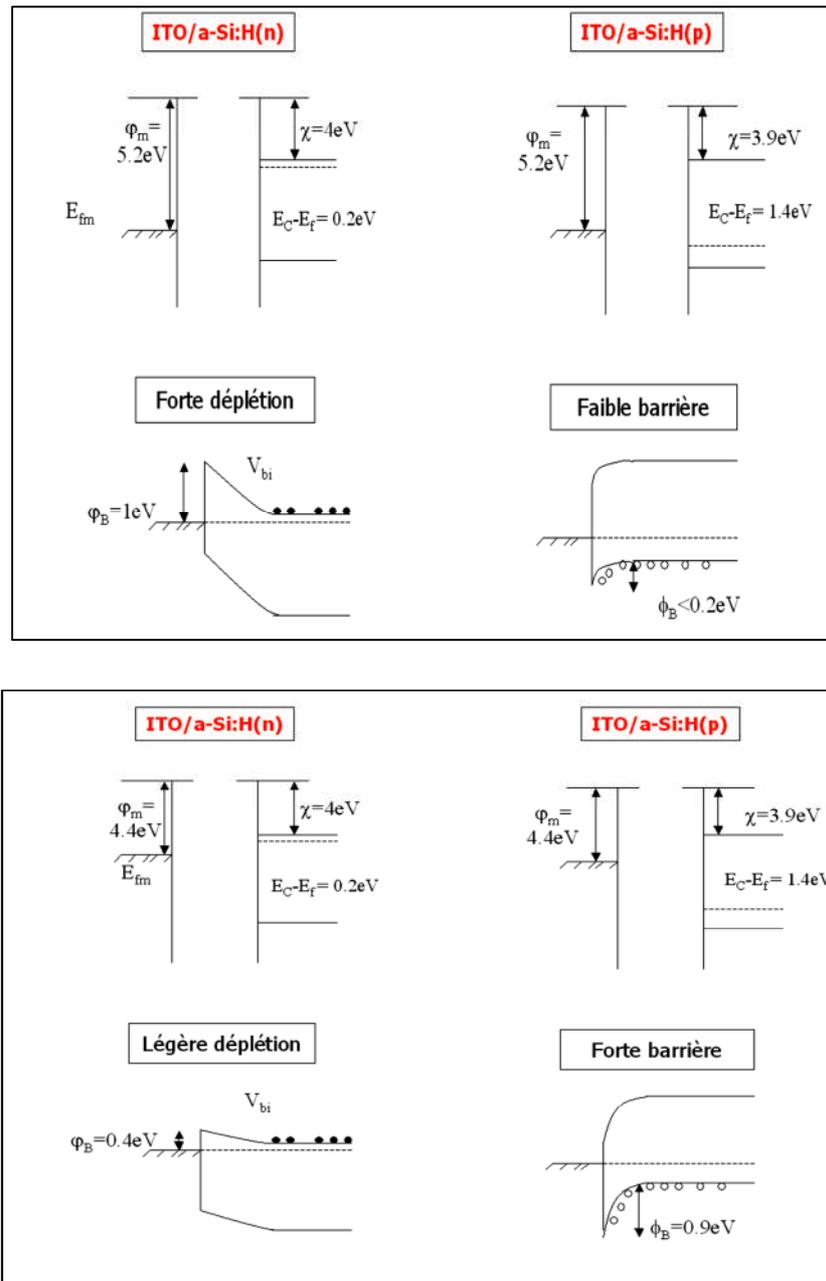


Figure II-20. Contact entre l'ITO et le silicium amorphe dopé n et p à l'équilibre thermodynamique pour un travail de sortie de l'ITO fixé à $\phi_m = 4.4\text{eV}$ et $\phi_m = 5.2\text{eV}$ [37].

➤ Cas 2

Le cas du contact ITO / a-Si :H (p) paraît beaucoup plus difficile. Il permet de se situer dans un régime d'accumulation et donc de contact ohmique. Néanmoins, les porteurs majoritaires étant dans ce cas de figure les trous. Une très forte barrière de potentiel ($> 1\text{eV}$) s'oppose à leurs passages (voir la figure II-21).

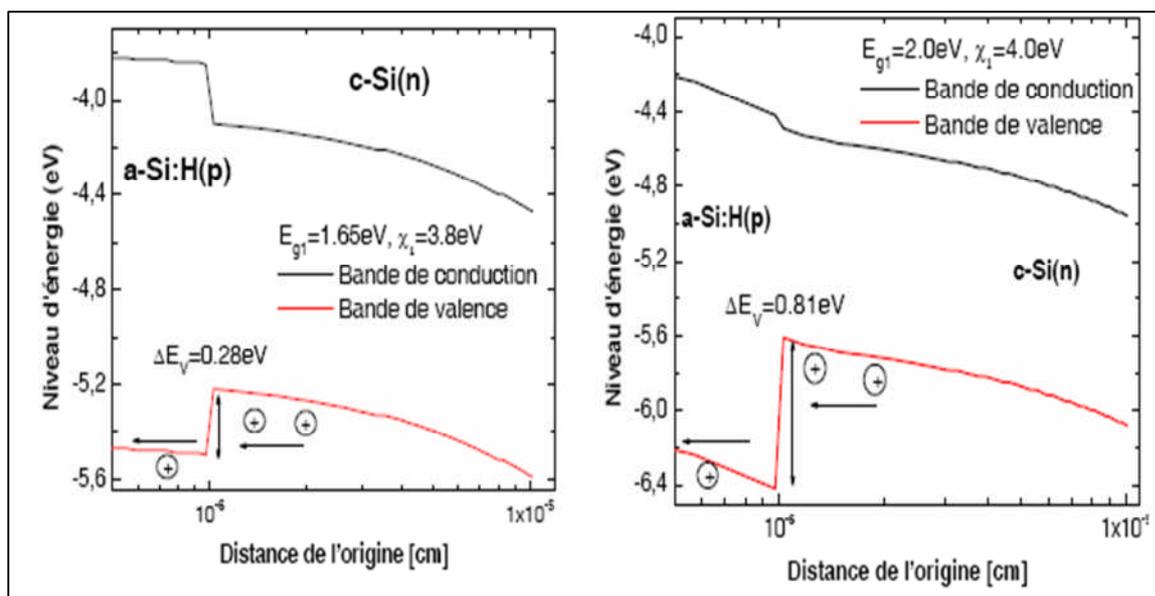


Figure II-21. Evolution du diagramme de bande de l'hétérojonction a-Si(p)/c-Si(n) en fonction de largeur de bande interdite et l'affinité électronique de a-Si(p)[27].

Ce phénomène représente donc un problème pour l'hétérojonction sur substrat c-Si (n) mais également pour les traitements arrière de l'hétérojonction sur substrat c - Si (p). Plusieurs solutions sont donc envisageables pour permettre le contact sur chaque type de silicium amorphe comme le dépôt d'un ITO adapté à chaque type de couche amorphe (travail de sortie ajusté) ou l'introduction d'une fine couche métallique (type chrome) entre l'ITO et la couche a-Si :H (p) servant de couche d'inversion.

3.3.4.2 L'émetteur

L'émetteur est construit à partir d'une fine couche de silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H) de dopage p ou n cela dépend du dopage du substrat (opposé). Toutefois, c'est une couche qui a une résistance carrée importante d'où la nécessité de la couvrir d'un excellent conducteur (métal ou oxyde transparent conducteur) pour assurer la collecte des porteurs. Les recherches ont montré qu'il est préférable que la couche de silicium amorphe hydrogéné constituant l'émetteur soit la plus fine possible (quelques nm) pour qu'on puisse avoir une faible longueur de diffusion et une forte absorption de la lumière. Même pour le cas où on a deux couches amorphes (émetteur + intrinsèque); plus elles seront minces plus les photons seront transmis au substrat cristallin. C'est ainsi que l'épaisseur influera considérablement sur le courant de court-circuit I_{cc} : comme le montre les résultats représentés sur (la figure II-22).

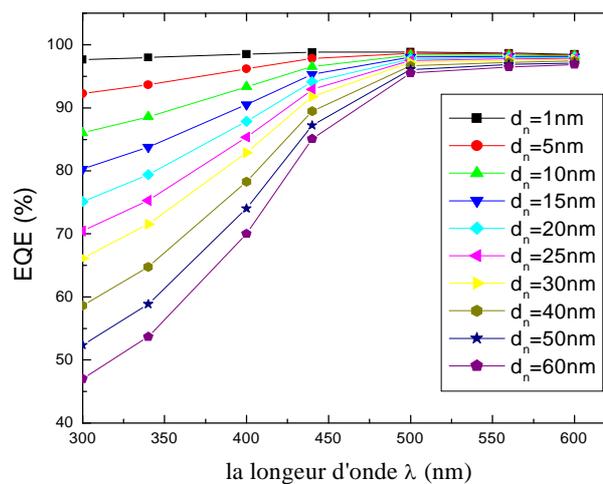


Figure II-22. Influence de l'épaisseur de l'émetteur amorphe $a\text{-Si:H}(n)$ sur les recombinaison déduite des simulations sous AFORS-HET[54].

3.3.4.3 Le BSF

Le BSF est une couche qui crée un champ électrique arrière et qui assure également une bonne passivation de la face arrière de la cellule photovoltaïque. Le BSF est une couche fortement dopé ($p+$ ou $n+$) avec le même type de dopage que le substrat. Avec une hétérojonction $a\text{-Si:H}(p)/c\text{-Si}(p)$ ou $a\text{-Si:H}(n)/c\text{-Si}(n)$, une barrière de potentiel est induite par la différence de niveau de dopage entre le substrat et le BSF. Cette barrière de potentiel sur la face arrière de la structure permet de confiner les porteurs minoritaires dans le substrat et ainsi éviter qu'ils ne se recombinent sur la face arrière de la cellule photovoltaïque. La structure BSF permet de réduire les recombinaisons sur la face arrière et d'assurer une meilleure collecte des porteurs majoritaires.

3.3.4.4 Les contacts

Les contacts métalliques sont placés sur les deux faces de la cellule pour les structures standard représentées sur la figure II-19. Ces contacts permettent de collecter le courant photogénéré. Les contacts métalliques de type ohmique constituent un cas idéal car le maximum de courant sera collecté avec ce type de contact. Outre un choix de métal donnant des contacts ohmiques, il est aussi important d'avoir des résistances de contact le plus faible possible. La métallisation de la face avant résulte d'un compromis entre taux d'ombrage et résistances série. En effet, la diminution du taux d'ombrage se traduit par un courant élevé puisque plus de photons pénètrent dans la cellule et cela suppose d'un autre côté d'avoir des doigts de métallisation moins larges et donc une augmentation des résistances série.

Pour réaliser les contacts métalliques, nous avons principalement les techniques suivantes:[44]

- L'évaporation : excellente résistivité et résistance de contact mais plus chère et avec un faible rendement d'utilisation du métal
- L'électrolyse : faible coût, bonne résistivité mais nécessite de nombreuses étapes
- La sérigraphie : faible coût, simple, adaptée à de gros volumes mais technologie développée à haute température.

La sérigraphie constitue la solution la plus compatible avec les standards industriels est de plus en plus utilisée. Elle permet en une seule étape de réaliser les doigts et les bus des métallisations pour un coût raisonnable et selon un procédé facilement automatisable.

3.4 Optimisation de l'hétérojonction silicium amorphe / silicium cristallin (naissance de la structure HIT)

3.4.1 L'intérêt d'introduire une couche intrinsèque dans une hétérojonction

Arriver à introduire une couche intrinsèque de silicium amorphe (a-Si:H(i)) a été un véritable succès dans l'industrie des cellules photovoltaïques. Sanyo explique que cette couche empêche la présence d'atomes dopants (bore) à la surface du cristal, responsables des recombinaisons d'interfaces, mais cette couche supposée très efficace pour la passivation d'interface des hétérojonctions sur des substrats type n n'a pas la même efficacité de passivation sur les substrats de type p [37]. Cela s'explique par le fait que les atomes dopants (dans ce cas on parle d'atome de phosphore) ne présentent pas de problème vis-à-vis des recombinaisons à l'interface [38].

3.4.2 Développement et avantages de la technologie silicium à hétérojonctions

Les performances des dispositifs, sont limitées des fois par la mauvaise qualité de l'interface amorphe / cristallin qui influe sur des valeurs de tension en circuit ouvert et de facteur de forme, mais ce phénomène fut diminué par l'insertion d'une couche intermédiaire de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (a-Si:H) qui permet de réduire les recombinaisons à l'interface amorphe / cristallin et le courant de saturation. C'est ce qui a permis le développement de la structure HIT [39]

3.4.3 Description d'une structure à hétérojonction répandue dans les cellules photovoltaïques « la structure HIT »

L'utilisation de silicium amorphe avec un substrat cristallin pour former une hétérojonction a été envisagée pour la première fois par l'équipe de Walter Fuhs en 1972 [28][41]. Tandis que la structure HIT « Hétérojonction With Intrinsic Thin Layers -

hétérojonction à couche mince intrinsèque. » n'a été connue qu'après plusieurs autres années de recherche. L'entreprise japonaise SANYO a commencé ces premiers travaux sur les cellules silicium à hétérojonctions a-Si:H/c-Si vers la fin des années 1980 et la première publication a été faite en 1991 [40]. Elle a mis en œuvre une production de module photovoltaïque en 1997 [27], et depuis, des chercheurs suivent cette voie pour optimiser cette structure SANYO qui domine actuellement le marché de la production. Les cellules HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin film) dont l'originalité est d'utiliser une couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (non dopé) entre le silicium amorphe hydrogéné dopé et le silicium cristallin sont déposées par PECVD [40] (Voir la Figure II-22). Cette couche de silicium amorphe intrinsèque joue un rôle primordial dans les valeurs élevées de V_{co} obtenues avec la technologie HIT. Ces cellules PV sont aussi construites par Sanyo.

Une couche d'oxyde conducteur transparent (TCO) est déposée par pulvérisation cathodique. Elle est nécessaire pour assurer un contact entre la couche amorphe et le métal, elle sert aussi de couche antireflet. Les contacts sont ensuite déposés par sérigraphie. (La figure III-23 représente cette structure).

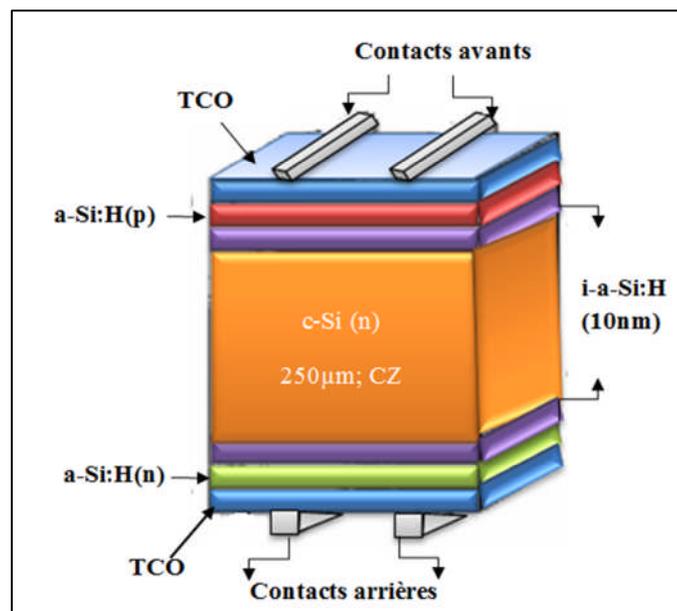


Figure II-23 Structure HIT produit par SANYO consistant en un dépôt de fines couches de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque est dopé de part et d'autre d'un substrat de silicium monocristallin de type n [35]

Les performances des dispositifs, sont limitées des fois par la mauvaise qualité de l'interface silicium amorphe / cristallin qui influe sur des valeurs de tension en circuit ouvert et de facteur de forme, mais ce phénomène fut diminué par l'insertion d'une couche

intermédiaire de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (a-Si:H) qui permet de réduire les recombinaisons à l'interface amorphe / cristallin et le courant de saturation c'est ce qui a permis le développement de la structure HIT [39].

3.3.2.1 Les avantages de la structure HIT :

- Dans ce type de structure, l'émetteur amorphe est quasiment passif (faible absorption, car les couches sont fines 5-10 nm) et la grande largeur de la bande interdite du silicium amorphe (≈ 1.8 eV) fait que la structure de bande est adaptée ; ce qui implique une augmentation dans le rendement de conversion.
- Les procédés de fabrication sont réalisés à basse température, inférieure à 200°C donc les cellules HIT présentent une meilleure tenue en température [42].
- Procédé avec un budget thermique réduit.
- Les cellules HIT ont moins d'impact sur l'environnement.
- Un procédé de fabrication simple. On remarque moins d'étapes et moins de temps que les procédés standards.
- La structure HIT est une solution aux problèmes de manque de matières premières car la structure est symétrique.

3.4.4 Les cellules solaires à double hétérojonction :

Les performances des cellules photovoltaïques à hétérojonction a-Si:H/c-Si on connut ces dernière années une amélioration notable. L'adaptation du dopage de l'émetteur, de son épaisseur et de ses propriétés structurales et physique est nécessaire. Actuellement, le record de conversion d'énergie est détenu par l'entreprise Sanyo à l'aide d'une cellule à double hétérojonction (DHJ) (représenté sur la figure II-22) pour un rendement de 22,3% [43]. On notera que ces cellules sont réalisées sur des substrats CZ monocristallin de type n.

La qualité de l'hétérojonction dépend fortement de l'état de surface du silicium monocristallin préalablement au dépôt. La valeur de la densité d'états d'interface entre le silicium amorphe et le silicium cristallin est prépondérante.

3.4.4.1 Architecture : double hétérojonction :

Cette architecture est basée sur la structure classique biface, les cellules HIT (Hétérojonction with Intrinsic Thin layer) comportent une ou deux hétérojonctions silicium amorphe/silicium cristallin. L'hétérojonction face avant constitue l'émetteur et la seconde constitue l'arrière, elle joue le rôle de champ de répulsion ou BSF. Entre le substrat cristallin et l'émetteur dopé, une fine couche amorphe intrinsèque permet d'améliorer la passivation de

l'interface. La figure II-24 montre de manière schématique une cellule HIT à double hétérojonction.

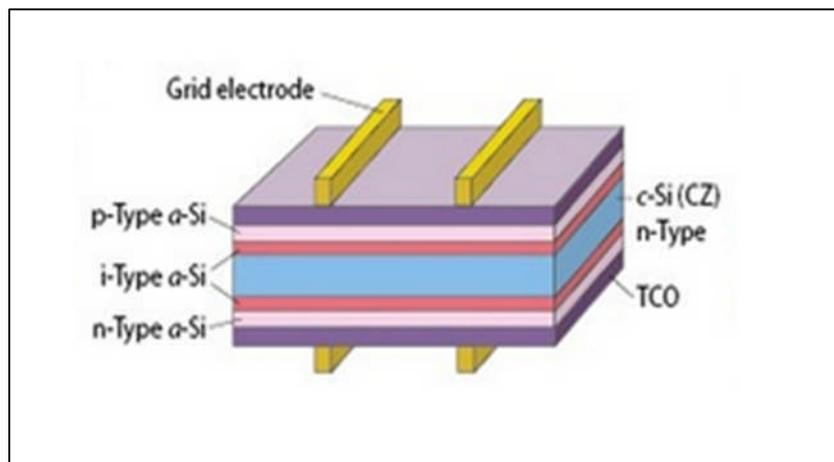


Figure II-24. Structure de la cellule à double hétérojonction de Sanyo [43]

Le substrat monocristallin peut différemment être de type p ou n. l'hétérojonction se fait par dépôt d'une couche de quelques nanomètres de silicium amorphe hydrogéné, dopé ou non. Les propriétés du silicium amorphe hydrogéné sont intéressantes pour l'application photovoltaïque pour différentes raisons (rappel):

- Un gap plus élevé que le silicium cristallin autour de 1,8 eV mieux adapté aux radiations solaires.
- Un procédé d'élaboration à basse température (T inférieur à 250°C) qui permet de réduire le budget thermique de fabrication et d'intégrer des substrats en verre dans le procédé.
- Une meilleure stabilité en temps menant à un rendement annuel plus important.
- Une tension de circuit ouvert plus importante due à la présence de l'hétérojonction.
- Un rôle de passivation de la surface.

3.5 Cellules solaires de silicium à hétérojonctions résultats et perspectives

3.5.1 Choix de type de substrat

A l'échelle internationale, les recherches montrent que les meilleurs résultats sont obtenus sur des substrats type n (les résultats des laboratoires Sanyo) contrairement à ceux obtenus sur des substrats de type p. à savoir d'où vient la différence entre les deux types est devenu une priorité [32].

Les cellules solaires à hétérojonctions à couche intrinsèque (HIT) décrochent un haut rendement de conversion électrique avec 23% grâce à la société SANYO. Le tableau II-2

donne quelque résultat qui montre clairement l'évolution croissante de ce genre de cellules solaires qui est due à l'optimisation continue du procédé de fabrication de SANYO [44] :

- Amélioration de la qualité des couches de silicium amorphe (a-Si:H) et de leurs conditions de dépôt (en réduisant les défauts de surface).
- Réduction de l'absorption dans les couches de silicium amorphe (a-Si:H) et dans le TCO.
- Optimisation de la grille de métallisation sur la face avant (réduction des résistances série et de la surface de la grille).

Tableau II-2. Résultats des performances des cellules HIT de SANYO de l'année 2004, 2009 [44] et le Groupe SANYO Panasonic 10 avril 2014

Vco(mV)	Icc (A)	FF(%)	η (%)	Surface (cm ²)	Année	Références
712	3.837	78.8	21.5	100.3	2004	[45]
729	3.968	80	23	100.4	2009	[46]
740	6.01	82.7	25.6	143.7	2014	[52]

Les résultats donnés par SANYO : les chercheurs ont utilisé un substrat de silicium cristallin de type n. Cette technologie est également utilisée dans d'autres laboratoires. Leurs résultats sont représentés sur le tableau II-3 mais sur des substrats de type p. Sur le tableau II-4 les résultats sont obtenus sur des substrats de type p.

Tableau II-3. Résumé des meilleurs résultats obtenus sur les cellules à hétérojonctions avec un substrat de silicium cristallin de type p [44].

Substrat (c-Si(p))	Laboratoire	Vco (mV)	Jcc (mA/cm ²)	FF(%)	η (%)	Références
<111> CZ ; 0,5 Ω .cm	AIST (Japon)	628	33.2	77	16.1	[47]
Texturé CZ ; 1 Ω .cm	IEC (USA)	694	36.4	74.4	18.8	[48]
Texturé	NREL (USA)	678	35.9	78.6	19.1	[49]

Tableau II-4. *Résumé des meilleurs résultats obtenus sur les cellules à hétérojonctions avec un substrat de silicium cristallin de type n [44].*

Substrat (c-Si(n))	Laboratoire	V _{co} (mV)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF(%)	η(%)	Références
Texturé FZ ; 2-4 Ω.cm	NREL (USA)	664	35.3	74.5	17.2	[49]
Texturé FZ ; 1-7 Ω.cm	INES (France)	673	34.7	78	18.2	[50]
Texturé FZ ; 1-2 Ω.cm	NREL (Allemagne)	639	39.3	78.9	19.8	[51]

4. Cellules photovoltaïques avec des contacts arrière interdigités

Les cellules à contacts en face arrière (« Rear Contact Cells » RCC) représentent un terrain de recherche idéale pour atteindre des hauts rendements. Sur ces structures, l'émetteur et le BSF sont localisées sur la face arrière. Ceci permet d'éviter l'ombrage des métallisations en face avant. Cette géométrie est également intéressante pour sa mise en module, facilitée par l'interconnexion coplanaire des cellules. Les RCC à hauts rendements développées jusqu'à maintenant, ont une technologie de contacts arrière interdigités (Interdigitated Back Contact IBC). D'autres structures, telles que les EWT (Emitter Wrap Through), MWT (Metallization Wrap Through), et MWA (Metallization Wrap Around), conservent un émetteur en face avant, tout en ayant les bus de collecte en face arrière. Ceci permet l'utilisation de substrats de moins bonne qualité par rapport aux cellules IBC. Cet état de l'art est focalisé sur les cellules IBC.

C'est en fait l'objectif de cette thèse qui sera largement détaillée dans le chapitre III et IV.

5. Des techniques de caractérisation d'une cellule photovoltaïque

Des systèmes de caractérisation sont décrits au cours de cette partie. Pour chacune de ces techniques, nous aborderons quelques notions théoriques.

- Caractérisations électro-optiques (I-V sous éclairement, réponse spectrale, réflectivité, mesure de durée de vie) ;
- Caractérisations électriques (I-V sous obscurité, TLM) ;

5.1 La caractérisation I-V sous éclaircissement

5.1.1 Le principe

La caractéristique I-V sous éclaircissement, nous permet de déterminer des paramètres importants dans la cellule solaire comme la densité de courant de court-circuit (J_{cc}), le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension en circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF). Grâce à ces paramètres nous pouvons déduire le rendement de conversion électrique (η) de la cellule par la relation suivante:

$$\eta = \frac{J_{cc} \cdot V_{co} \cdot FF}{P_i} \quad (\text{II-5})$$

Où P_i est la puissance lumineuse incidente sur la cellule et FF est le facteur de forme ou facteur de remplissage et se détermine par :

$$FF = \frac{J_{max} \cdot V_{max}}{J_{cc} \cdot V_{co}} \quad (\text{II-6})$$

V_{max} et J_{max} sont respectivement la tension et la densité de courant au point de puissance maximum comme la montre la figure II-25.

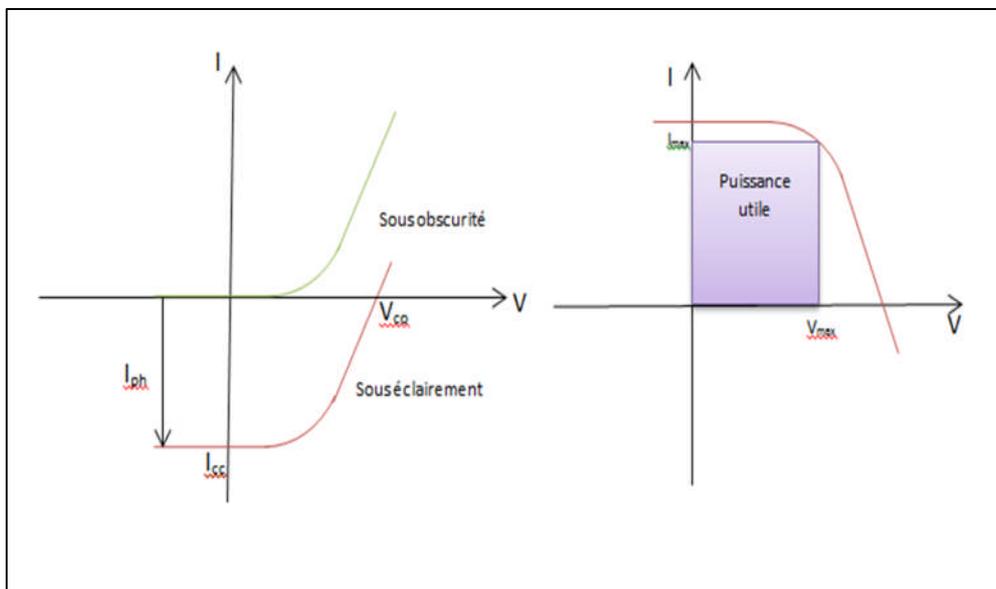


Figure II-25. (a) Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclaircissement et sous obscurité et (b) représentation conventionnelle de la courbe I(V) [53].

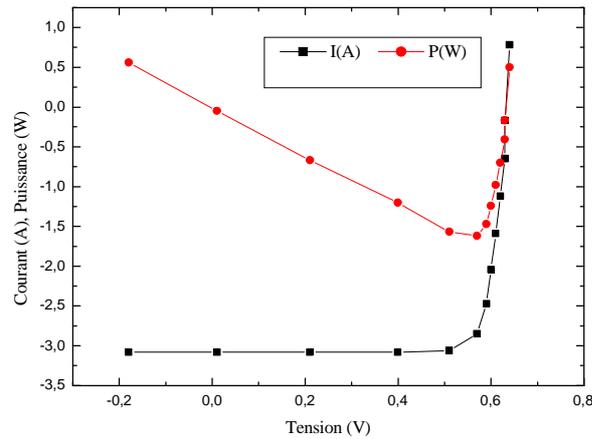


Figure II-26. Caractéristiques sous éclairement d'une cellule test (à jonction arrière) sous AM1.5D.

La courbe noire correspond à la réponse I-V et la courbe rouge à l'évolution de la puissance fournie [54].

Sur le tableau II-5 nous avons représenté les paramètres caractérisant la cellule solaire à jonction arrière (la cellule teste).

Tableau II-5. Résumé des meilleurs résultats obtenus sur les cellules à hétérojonctions avec un substrat de silicium cristallin de type n [54].

V _{co} (mV)	J _{cc} (mA.cm ²)	FF (%)	η (%)	V _m (mV)	J _m (mA.cm ²)	P _{max}
635	30.8	82.83	16.19	590	25.5	1.62

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque sous éclairement est approximative au niveau électrique par le schéma équivalent de la figure II-27. Ce modèle à deux diodes et a pour équation [1] :

L'équation du courant devient :

$$I = I_1 + I_2 + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph} \tag{II-7}$$

$$I = I_{01} \left(\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{n_1 kT} \right) - 1 \right) + I_{02} \left(\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{n_2 kT} \right) - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph} \tag{II-8}$$

Cette équation contient 6 variables : le courant de photogénération (I_{ph}), courant de saturation de la première diode (I₁), courant de fuite à la jonction (I₂), la résistance série (R_s),

la résistance parallèle (R_p) et le facteur d'idéalité de la seconde diode (n_2). Le facteur d'idéalité de la première diode n_1 correspondant aux recombinaisons dans le matériau sera toujours fixé à 1.

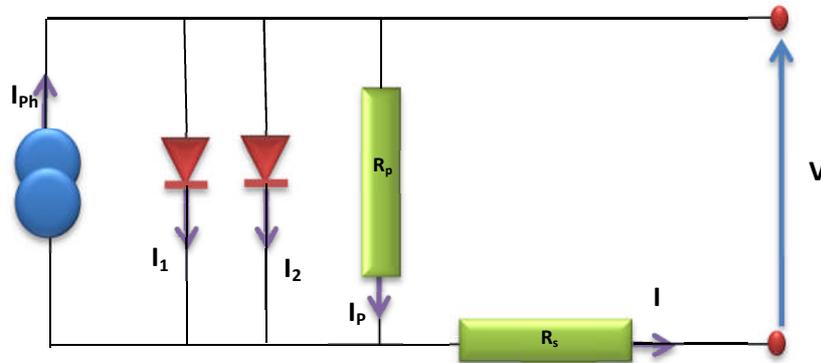


Figure II-27. Modèle à deux diodes d'une cellule sous éclairement

5.1.2 procéder de mesure

Cette mesure est réalisée par un simulateur optique utilisé dans les laboratoires et représenté sur la figure II-28.

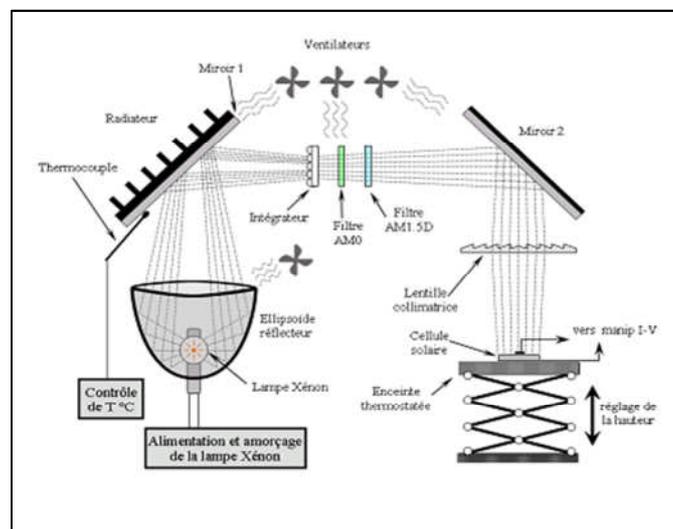


Figure II-28. Schéma du simulateur [54]

La lumière est produite par une la lampe d'arc xénon située dans un miroir elliptique qui produit la lumière. Un premier miroir est présent afin que le faisceau lumineux généré peut être dévié et puisse passer à travers un intégrateur pour homogénéiser spatialement sa puissance. Son spectre est ensuite modifié grâce à un ensemble de filtres (AM0 et AM1.5D) permettant d'ajuster le spectre de la lampe xénon au spectre solaire. Ensuite le faisceau est

réfléchi sur un deuxième miroir et focalisé grâce à une lentille de Fresnel. Les cellules sont disposées perpendiculairement au faisceau sur un support thermostaté à 25°C.

Les pointes de mesure placées sur cette plateforme sont mobiles afin de prendre les contacts. Le conduit d'aspiration est de plaquer la cellule (Figure II-29).

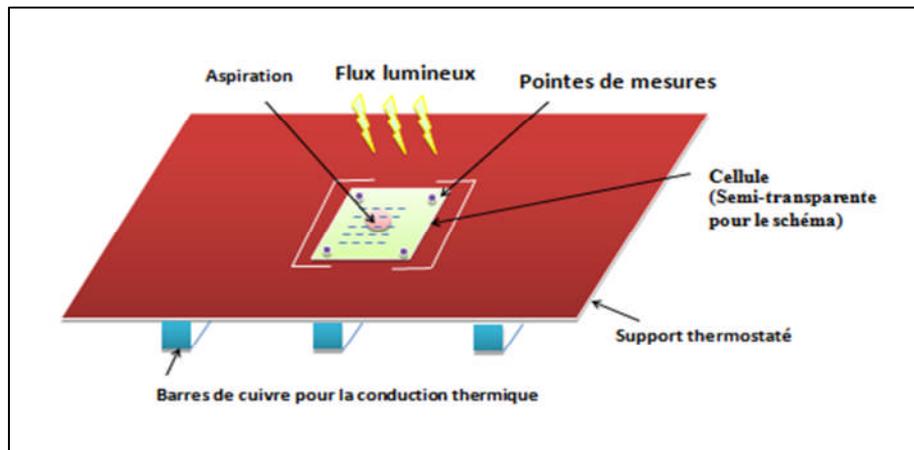


Figure II-29. Plateforme de mesure des cellules à jonction arrière [56].

Cette structure est légèrement surélevée par des barreaux de cuivre afin de disposer les pointes, de prendre la mesure. L'ensemble de cette plateforme est déposée sur le support thermostaté.

5.2 La mesure Suns-Voc

Cette méthode (Suns-Voc) [57] nous permet aussi d'obtenir la caractéristique I-V d'une cellule solaire par la mesure de la tension en circuit ouvert V_{co} de la cellule en fonction d'une variation d'intensité. Cette caractérisation enregistre simultanément la variation de l'intensité produite par la lampe flash au niveau de la cellule de référence et la variation de la tension aux bornes de la cellule à mesurer (Figure II-30).

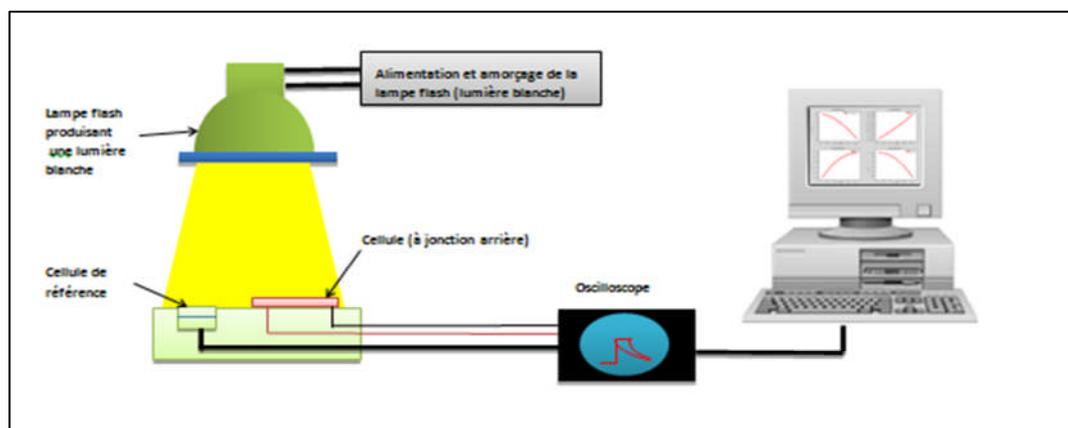


Figure II-30. Schéma de principe de la mesure Suns-Voc[56]

Le schéma électrique équivalent qui démontre le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque lors de la mesure Suns -Voc est représenté sur la figure II-29. Ce modèle aussi à deux diodes et a pour équation:

$$I = I_{01} \left(\exp\left(\frac{q(V)}{n_1 kT}\right) - 1 \right) + I_{02} \left(\exp\left(\frac{q(V)}{n_2 kT}\right) - 1 \right) + \frac{V}{R_p} - I_{ph} \quad (II-9)$$

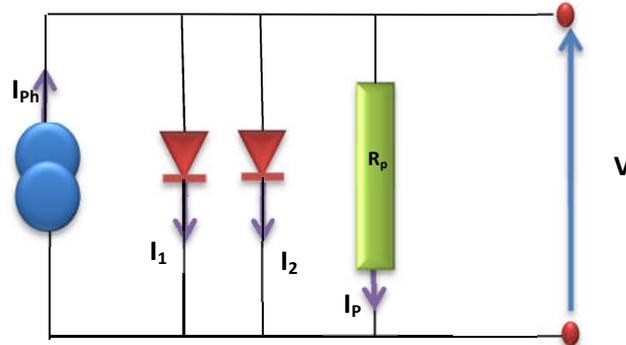


Figure II-31. Modèle à deux diodes d'une cellule lors de la mesure Suns-Voc

Il est aussi possible de tracer un pseudo courbe J-V sous éclairciment, et sous obscurité, à partir des mesures de \$V_{oc}\$ mesurées. La tension de circuit ouvert des cellules sous un soleil peut donc en être extraite. Le pseudo courbe J-V sous éclairciment donne également une valeur du facteur de forme ne prenant pas en compte les pertes dues aux phénomènes de résistance série.

Donc la résistance série est l'une des différences de la mesure Suns-Voc par-rapport à la mesure I-V sous éclairciment. Cette technique est basée sur l'évolution linéaire du facteur de forme en fonction de la résistance série pour de faibles valeurs de résistance série (\$R_s < 2 \text{ Ohm.cm}^2\$) et pour \$J_{cc}\$, \$V_{oc}\$ et \$J_m\$ constants. Dans ce cas, \$FF=f(R_s)\$ décroît avec une pente de [57]:

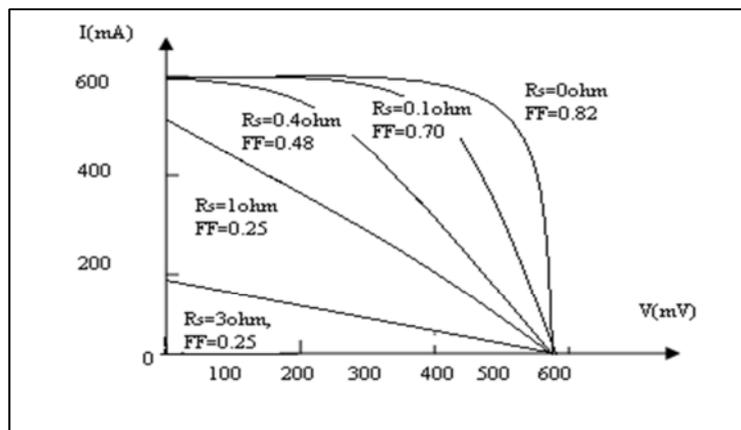


Figure II-32. Caractéristique \$I(V)\$ pour plusieurs valeurs de résistance série [57]

La détermination de τ_{eff} à partir de la méthode Suns Voc permet théoriquement d'explorer des niveaux d'injection plus faibles. Elle permet également d'obtenir une valeur de τ_{eff} sur les dispositifs métallisés, [58].

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{n_i^2 (\exp \frac{qV_{\text{oc}}}{kT})}{J_{\text{ph}} (\frac{N_A + \Delta n}{qW})} \quad (\text{II-10})$$

5.3 Caractérisation par réponse spectrale

5.3.1 Principe

La réponse spectrale (ou rendement quantique) externe est le rapport entre le nombre de paires électrons-trous photogénérées collectées par les contacts ohmiques et le nombre de photons incidents pour une longueur d'onde donnée.

La réponse spectrale interne est le nombre de paires électrons trous collectés divisé par le nombre de photons absorbés.

Soit :

- $RS(\lambda)$: Réponse spectrale ($A.W^{-1}$)
- $J_{\text{ph}}(\lambda)$: La densité de courant fournie sous éclairage par la longueur d'onde λ ($A.cm^{-2}$)
- $P(\lambda)$: Densité de puissance incidente ($W.cm^{-2}$)
- $N(\lambda)$: Le nombre de photons incidents
- $R(\lambda)$: Le coefficient de réflexion de la surface d'une cellule solaire
- q : La charge de l'électron

$$RS_{\text{INT}}(\lambda) = \frac{J_{\text{ph}}(\lambda)}{qN(\lambda)[1-R(\lambda)]} \quad (\text{II-11})$$

$$RS_{\text{INT}}(\lambda) = \frac{J_{\text{ph}}(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (\text{II-12})$$

$$RS_{\text{EXT}} = \frac{J_{\text{ph}}(\lambda)}{qN(\lambda)} \quad (\text{II-13})$$

La réponse spectrale idéale est limitée aux grandes longueurs d'onde en raison de l'incapacité du semi-conducteur à absorber des photons d'énergie inférieure à son gap. De plus, la réponse spectrale diminue aux petites longueurs d'ondes. En effet, à ces longueurs d'onde, les porteurs sont générés près de la surface et les pertes liées à la recombinaison en surface sont plus élevées [55].

L'objectif de la mesure spectrale est de repérer les zones de la cellule qui génèrent le plus de photocourant ou au contraire le moins de photocourant. Par exemple, une faible

réponse aux basses longueurs d'ondes met en évidence un problème à la surface alors qu'une faible réponse dans les longueurs d'ondes intermédiaires peut montrer que la longueur de diffusion des porteurs générés dans le volume est trop faible pour que ceux-ci soient collectés.

Or cette mesure consiste à illuminer la cellule solaire avec un spot monochromatique que l'on fait varier dans la plage d'absorption du matériau (entre 350 et 1150 nm pour le silicium cristallin). La mesure du courant débité par la cellule en fonction de la longueur d'onde permet alors de connaître la réponse spectrale de la cellule à l'aide de la relation (II-11 et II-12). Selon la longueur d'onde du rayonnement incident, le courant mesuré sera plus ou moins élevé en fonction du Rendement Quantique Externe (RQE) de la cellule. Pour connaître celui-ci, il faut multiplier RS par un facteur explicité dans la relation (II-14). Ceci permet d'obtenir le pourcentage d'électrons participant au photocourant par rapport au nombre de photons incidents.

$$\text{RQE}(\lambda) = \text{RS}(\lambda) \frac{hc}{q\lambda} \quad (\text{II-14})$$

Avec :

- RQE(λ): Rendement Quantique Externe (%)
- RS(λ): Réponse spectrale (A.W-1)
- h: Constante de Planck (kg.m².s⁻¹):
- c: Célérité de la lumière dans le vide (m.s⁻¹)
- q : Charge élémentaire (C)
- λ : Longueur d'onde (m)

Pour étudier les mécanismes internes à la cellule, il est nécessaire de considérer uniquement les photons absorbés dans le dispositif. On sépare alors du calcul de rendement quantique les photons réfléchis ou transmis, ainsi que ceux absorbés dans les couches non actives comme la couche anti-reflet. Le Rendement Quantique Interne (RQI) donne ainsi le pourcentage d'électrons participant au photocourant par rapport au nombre de photons qui ont été réellement absorbés dans la cellule :

$$\text{RQI}(\lambda) = \frac{\text{RQE}(\lambda)}{1 - \text{R}(\lambda) - \text{A}(\lambda) - \text{T}(\lambda)} \quad (\text{II-15})$$

Avec:

RQI(λ): Rendement Quantique Interne (%)

RQE(λ): Rendement Quantique Externe (%)

$R(\lambda)$: Réflectivité de la cellule (%)

$A(\lambda)$: Absorption dans les couches non actives (%)

$T(\lambda)$: Rayonnement transmis à travers la cellule (%)

On considère de manière générale que les courtes longueurs d'ondes (Ultra-Violet) sont absorbées majoritairement dans les premiers μm de la cellule, alors que les grandes longueurs d'ondes (Infra-Rouge) peuvent l'être au niveau de la face arrière. L'étude du RQI aux courtes longueurs d'ondes donne donc des indications sur la qualité de la face avant, tandis que celle aux grandes longueurs d'ondes concerne plus la face arrière (voir la figure II-30).

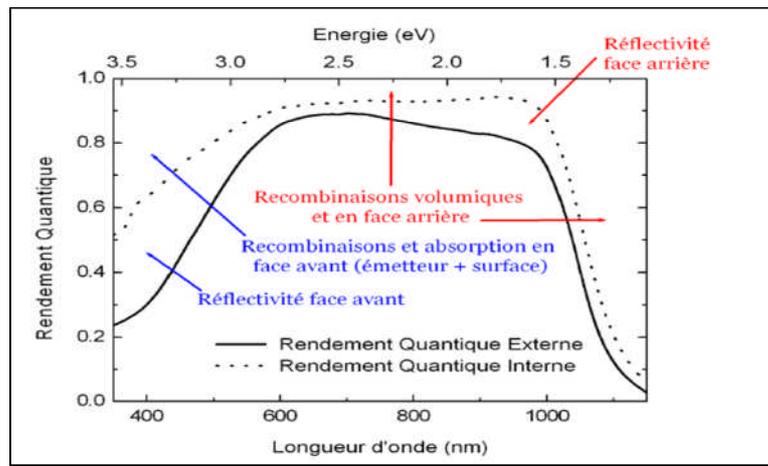


Figure II-33. Exemple de Rendements Quantiques Externe et Interne d'une cellule solaire
La méthode LBIC (Light Beam Induced Current)[59]

La réponse spectrale est basée sur la mesure du courant de court-circuit d'une cellule.

5.4 La mesure I-V sous obscurité

La mesure J-V à l'obscurité est également utile pour analyser le fonctionnement d'une cellule solaire. Il est possible dans la plupart des cas, de modéliser une cellule solaire à l'obscurité par un schéma électrique équivalent comprenant deux diodes D_1 et D_2 en parallèle (voir la figure II-34). La première diode correspond aux phénomènes de diffusion dans les zones neutres (base et émetteur), la seconde permet de modéliser la génération / recombinaison et les effets tunnels dans la zone de charge d'espace (ZCE). I_{01} et I_{02} sont les courants de saturation de chaque diode, n_1 et n_2 , leur facteur d'idéalité. Les courants de fuite, pouvant exister sur les bords de la cellule ou à travers l'émetteur, sont modélisés par une résistance parallèle R_p qui doit être la plus élevée possible. Une résistance série R_s modélise les pertes résistives dans la structure (base et émetteur) : les résistances de contact aux interfaces métal / semiconducteur et celles du métal à proprement parler.

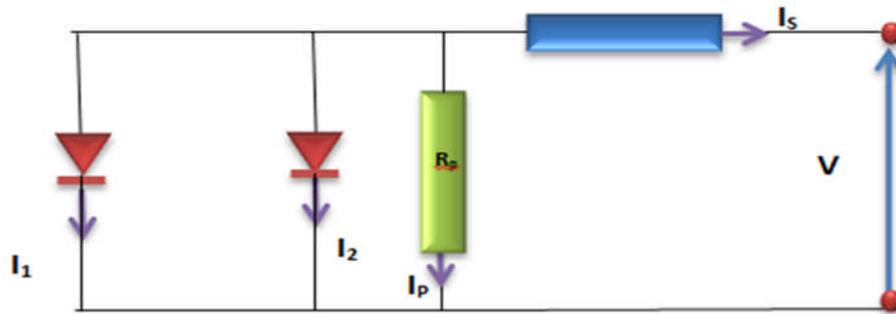


Figure II-34. *Modèle à deux diodes d'une cellule sous obscurité*

La relation (II-19) permet alors de modéliser les courbes J-V sous obscurité en fonction des différents paramètres. Pour modéliser le courant photogénéré sous éclairage, il suffit d'ajouter une source de courant inverse en parallèle des diodes. On peut noter que pour une cellule solaire en silicium sous éclairage, les recombinaisons dans la ZCE sont souvent négligeables par rapport à celles des zones neutres. Un modèle à une seule diode peut alors suffire.

$$I_{\text{OBS}} = I_{01} \left(\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{n_1 kT} \right) - 1 \right) + I_{02} \left(\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{n_2 kT} \right) - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_p} \quad (\text{II-16})$$

Avec:

I_{01} : Densité de courant de saturation des zones neutres (A.cm^{-2})

n_1 : Facteur d'idéalité de D_1

I_{02} : Densité de courant de saturation dans la ZCE (A.cm^{-2})

n_2 : Facteur d'idéalité de D_2

R_s : Résistance série spécifique ($\Omega.\text{cm}^2$)

R_p : Résistance parallèle spécifique ($\Omega.\text{cm}^2$)

En ajustant les paramètres de ce modèle à deux diodes aux mesures J-V sous obscurité, il est alors possible d'obtenir des valeurs caractérisant les cellules mesurées. Pour qu'une cellule solaire atteigne des rendements élevés, il faut d'abord que les courants de saturation de ses diodes restent faibles ($I_{01} \leq 1 \times 10^{-5} \text{ A.cm}^{-2}$ et $I_{02} \leq 1 \times 10^{-12} \text{ A.cm}^{-2}$). Les valeurs courantes pour les facteurs d'idéalité se situent vers l'unité pour n_1 et entre 2 et 3 pour n_2 . Pour limiter les pertes résistives, il est nécessaire que la valeur de résistance parallèle soit élevée ($R_p \geq 104 \Omega.\text{cm}^2$) et que celle de la résistance série soit inférieure à $1 \Omega.\text{cm}^2$. Pour la détermination de R_s , il est nécessaire de confronter les mesures I-V sous éclairage et

obscurité avec le pseudo courbe I-V déterminée au SunsVoc [60]. En effet, les phénomènes de résistance série dans la cellule ne sont pas identiques selon son état : sous éclairage ou sous obscurité.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord fait une description générale des différentes technologies photovoltaïques. Dans un premier temps, on a vu le principe de l'hétérojonction suivant le principe d'Anderson, ensuite, on a entamé l'étude théorique de l'hétérojonction silicium amorphe/ silicium cristallin (c-Si et a-Si:H) et les composants de ce type de cellules. Puis, nous avons présenté la technologie silicium à hétérojonctions et la technologie à contacts arrière (RCC). Ce chapitre se conclut par une brève présentation de la structure combinant ces deux technologies qui suscite un intérêt grandissant de la communauté photovoltaïque. L'étude de cette structure innovante sera détaillée dans le chapitre III et IV et constitue le cœur de ce travail. Nous avons aussi réalisé une étude théorique sur quelques méthodes de caractérisations.

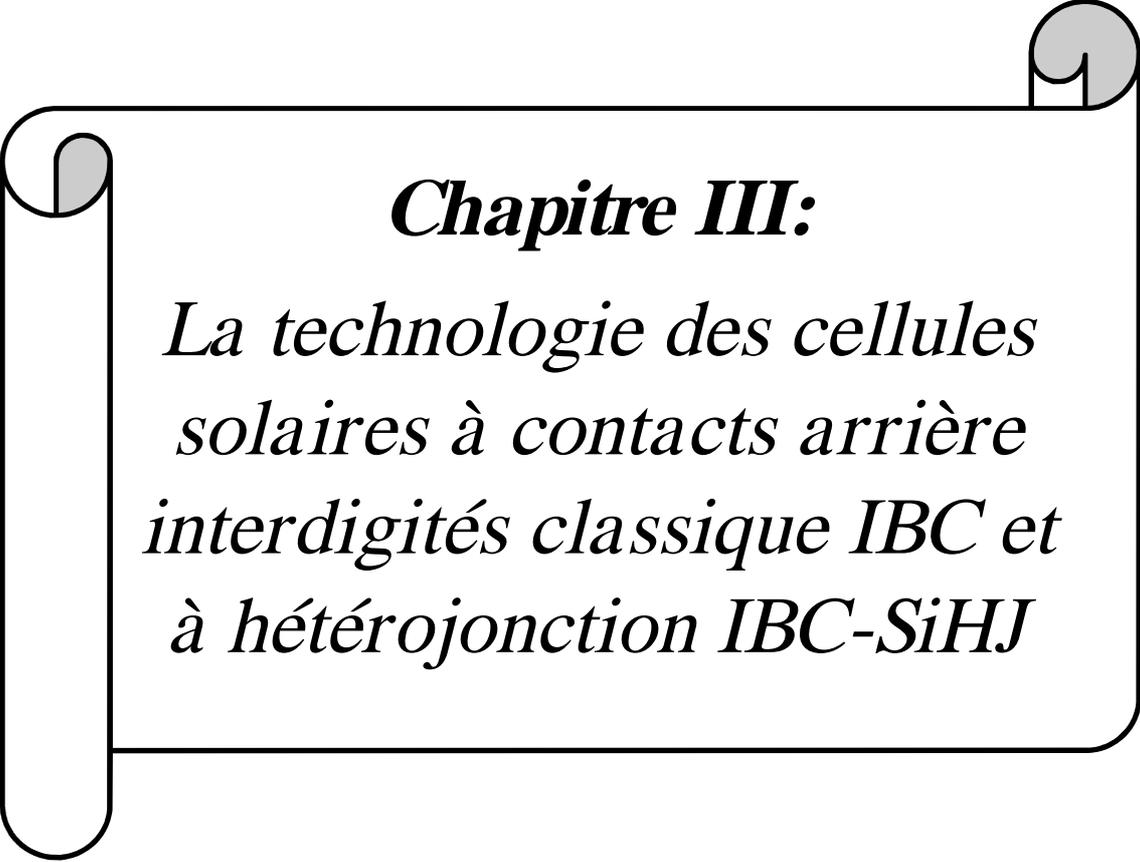
Références bibliographiques du chapitre II

- [1] J.P. HAUET « **Energie photovoltaïques réalités et perspectives.** » Assemblée Générale de la SEE (juin 20009).
- [2] B. Garcia, « **Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco atlas** », thèse, U. Monterey, California, (2007).
- [3] K.A. Münzer, K.T. Holdermann, R.E. Schlosser, S. Sterk. « **Improvements and benefits of thin crystalline silicon solar cells** ». 2nd IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp. 1214-1219. Vienna (Autriche), (1998).
- [4] D. Sarti, R. Einhaus « **Silicon feedstock for the multicrystalline photovoltaic industry** ». Solar En.Mat.&Sol.Cells, Vol. 72, pp. 27-40, (2002).
- [5] J.M. Roman. « **State of the art of III-V Solar cells. Fabrication technologies, Device designs and Application** ». Advanced photovoltaic cell design (2004).
- [6] A. Vapaille, R. Castagné. « **Dispositifs et circuits intégrés semi-conducteurs physique et technologie** ». 1ère édition, DUNOD, (1987).
- [7] R. Legros . « **physique des semiconducteurs Technologie-Diodes Tome 1** ». Editions eyrolles, (1974).
- [8] T. Mueller, S. Schwertheim, M. Scherff and W.R. Fahrner, Appl. Phys. Lett. 92, 033504 (2008).
- [9] T. Desrues « **Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière** ». Thèse de doctorat école Doctorale Matériaux de Lyon, (Année 2009).
- [10] J. Zhao J, A. Wang, M.A. Green « **24.5% Efficiency silicon PERT cells on CZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates.** » Progress in Photovoltaics: Research and Applications, volume 7, numéro 6, pages 471-474, (1999).
- [11] M.A. Green « **The Path to 25% Silicon Solar Cell Efficiency: History of Silicon Cell Evolution.** » Progress in Photovoltaics: Research and Applications, volume 17, numéro 3, pages 183-189, (2009).
- [12] R. Einhaus ,al. « **Isotropic texturing of multicrystalline wafers with acidic texturing solutions** ». 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 167-170. Anaheim (C.A.), (1997).
- [13] A. Rohatgi, V. Yelundur, al. « **Aluminum-enhanced PECVD SiNx Hydrogenation in silicon ribbons** ». 16th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference., pp.1120-1123. Glasgow (UK), (2000).
- [14] J. Horzel, al. « **Optimization results for an industrially applicable selective emitter process** ». 2nd IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion., pp.1483-1486 Vienna (Autriche), (1998).
- [15] B. Lakehal « **Etude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky** » mémoire de magister en microélectronique Université batna, (2009).
- [16] C. Honsberg, S. Bowden, Photovoltaics: Devices, Systems and Applications [CDROM]. Sydney (Aus) : Univ. of New South Wales, (1998).
- [17] J. Horzel, S. Sivoththaman, J. Njs. « **Screen-printed apide thermal processes (RTP) selective emitter solar cells using a single diffusion step** », These de doctorat Univ. of New South Wales. (1999).
- [18] Z. Abada. « **Etude des cellules photovoltaïques à base de GaInP et GaAs à haut** » (2000).
- [19] A. Sylla .« **conversion photovoltaïques multi spectrale étude du tandem Hg_{1-x} Cd_xTe/GaAs** », Thèse de Doctorat, Université Nationale de Côte d'Ivoire, (1991)

- [20] B. Equer, J. Percebois « **Energie solaire photovoltaïque** ». - Tome 2, Aspects socio-économiques Collectif, (1993).
- [21] http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolt%C3%AFque#Cellule_photovolta.C3.AFque_en_silicium_amorphe.
- [22] J.F. Guillemoles, S. Taunier, J. Sicx-kurdi, P.P. Grand, A. Chaumont, O. Ramdani, L. Parissi, P. Panheleux, N. Naghavi, C. Hubert, M. Enfarah, J.P. Fauvarque, J. Connolly, O. Roussel, P. Mogensen, E. Mahe, D. Lincot, O. Kerrec – « **Cu(In,Ga)(S,Se)₂ solar cells and modules by electrodeposition. – Thin Solid Films** », 480, 526-531, (2005).
- [23] F. Cassore, G. Orlandi, M. Rau « **cellules photovoltaïques a colorant** » (2012) www.physique.unice.fr/sem6/2011-012/PagesWeb/PT/.../Photovoltaique.pdf
- [24] M. A. Vonchen, « **III-V epitaxial lift-off investigated by multi-release layers** ». 17th European photovoltaic conference, (2001).
- [25] Y. Hamakawa « **Solar PV energy conversion and the 21st Century civilization** ». Tech.Digest of 12th PVSEC, Jeju, Corée du Sud, pp. 15-18. (2001).
- [26] M.A. Green, E. Emery, K. Y. Hishikawa, W. Warta, « **Solar Cell Efficiency Progress in photovoltaics** », vol, 1G, pp 435-440. (2008).
- [27] Y. Veschetti, « **Modélisation, Caractérisation et Réalisation de Nouvelles Structures Photovoltaïques sur Substrat de Silicium Mince.** » Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur Strasbourg, page 79, 80, (2005).
- [28] R.L. Anderson, I.B.M. J. Res. Dev. 4, 283, (1960).
- [29] L.J. Van Ruyven « **Phenomena at Hétérojunctions** », Annu. Rev. Mater. Sci. 2, 501 (1972).
- [30] A.L. Fahrenbruch, R.H. Bube « **Fundamentals of Solar Cells** », Academic Press, (1983).
- [31] J.D. Lacoste « **Vers une Ingénierie de Bandes des Cellules Photovoltaïques à Hétérojonctions a-Si :H/c-Si. Rol Prépondérant de L'hydrogène** ». Thèse LPICM, Palaiseau, Ecole Polytechnique., p 222 (2007).
- [32] A. Froitzheim, R. Stangl, W. Elstner, M. Schmidt, W. Fuhs: « **Interface Recombination In Amorphous / Crystalline Silicon Solar Cells, Asimulation Study** ». Proceeding of the 17th European PV Solar Energy Conference, Rome (2002).
- [33] H. Mathieu: « **Pysique de semi-conducteurs et des composants électroniques** ». Edition Masson, P.304, (1987).
- [34] P. Buehlmann, A. Billet, J. Bailat, C. Ballif « **Anti-Reflection Layer at the ACO/Si Interface for High Efficiency Thin Solar Cells Deposited on Rough LP-CVD Front zno.** » Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy, pp.2182-2185, (2007).
- [35] M. Tagushi, K. Kawamoto, S. Tsuge, T. Baba, H. Sakata, M. Morizane, K. Uchihashi, O. Oota. « **HIT Cells-High-Efficiency Crystalline Si Cells With Novel Structure** ». Progress in Photovoltaics, Res, APPL; 8:503-513, (2000).
- [36] T. Mizrah, D. Adler : « **Operation of ITO/Si Heterojunction Solar Cells.** ». Applied Physics Letters, Vol 29, No.10, (Nov 1976).
- [37] R. Stangl, A. Froitzheim, M. Schmidt, W. Fuhs: « **Design Criteria For Amorphous/Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells,-Asimulation Study** ». Proceedings of the third World Photovoltaic Conference WCPEC, Osaka, Japan, (may 2003).
- [38] S. Martinzzi, F. Ferrazza, I. Périchaud. « **Improved P-type or raw N-type Multicrystalline Silicon Wafers For Solar Cells** ». Solid-State Phenomena, Vol 108-109, 525, (2005).

- [39] T. Sawada, N. Terada, S. Tsuge, T. Baba, T. Takahama, K. Wakisaka, S. Tsuda, S. Nakano «**High-efficiency a-Si :H/c-Si Heterojunction Solar Cells**». Proceedings of the 1st WCPEC, Hawaii, (Dec 1994).
- [40] K. Wakisaka, M. Tugushi, T. Sawada, M. Tanaka, T. Matsuyana, T. Matsuoka, S. Tsuda, S. Nanakano, Y. Kishi and Y. Kuwano. «**More Than 16% Solar Cells With a New “ HIT ” (Doped a-Si:H/ Non Doped a-Si:H/Crystallin Si) Structure.** » Proceedings Of The 22nd IEEE PV Specialist Conference, Las Vegas, P.887, Nevada, (1991).
- [41] W. Fuhs, K. Niemann, and J. Stuke, Bull. Am. Phys. Soc. **19**, 345 (1974).
- [42] H. Sakata, T. Nakai, T. Baba, M. Tagushi, S. Tsuge, K. Uchihashi, S. Kiyama. «**20,7% Highest Efficiency Large Area (100,5%) HITTM Cells.** ». Proceedings of the 28th IEEE PV Specialist Conference, p.7, Anchorage, Alaska, (2000).
- [43] S. Taira, Y. Yoshimine, T. Baba, M. Taguchi, H. Kanno, T. Kinoshita, H. Sakata, E. Maruyama, M. Tanaka. «**Our Approches for Achieving HIT Solar Cells With more than 23% Efficiency** ». Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy, pp.932 -935 (2007).
- [44] D. Diouf «**Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière** » Thèse de doctorat, université paris-sud 11, (2010).
- [45] M. Taguchi, A. Terakawa, E. Maruyama and M. Tanaka, Prog. Photovolt.: Res. Appl. **13**,481 (2005).
- [46] Press release from SANYO. <http://us.sanyo.com/News/SANYO-Develops-HIT-Solar-Cells-with-World-s-Highest-Energy-Conversion-Efficiency-of-23-0->.
- [47] H. Fujiwara, M. Kondo, Appl. Phys. Lett. **101**, 054516 (2007).
- [48] U. K. Das, M. Burrows, M. Lu, S. Bowden, and R. W. Birkmire, Proc. of the 22nd EPVSEC, 1290 (2007).
- [49] Q. Wang, M.R. Page, E. Iwaniczko, Y.Q. Xu, L. Roybal, R. Bauer, B. To, H.C. Yuan, A. Duda, Y.F. Yan, Proc. of the 33rd PVSEC-IEEE, 978 (2008).
- [50] D. Muñoz, Communications au steering committee du projet HETSI (Juillet 2009).
- [51] L. Korte, E. Conrad, H. Angermann, R. Stangl, M. Schmidt, Proc. of the 22nd EPVSEC,859 (2007)
- [52] Panasonic Eco Solutions Energy Management Europe SANYO Component Europe GmbH «**Record du monde de rendement de conversion*1 pour la cellule solaire anasonic HIT®, qui atteint un taux de 25,6 %*2 au stade de la recherche**»; <http://www.eu-solar.panasonic.net>
- [53] J. François «**Elaboration de SiNx :H par PECVD Optimisation des Propriétés Optiques Passivantes et Structurales pour Applications Photovoltaïques** » Thèse de doctorat de l’Institut national des sciences Applications de Lyon, *Page 9 et 10* (2007).
- [54] N. Berrouba-tani «**Etude de cellules photovoltaïques à hétérojonctions et structure interdigitée** », Mémoire de magister, Université Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen, (juin 2011).
- [55] N. Oleksiy, «**Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités** » Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon , page 87,(2005).
- [56] P. Papet «**Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium cristallin.** » Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, (2007).
- [57] E. Fourmond «**Développement de techniques de dépôt plasma et photo assistées pour la réalisation de couches antireflets passivantes en SiNx:H sur silicium multicristallin pour applications photovoltaïques** », Thèse, INSA de Lyon, 165 p, (2002).

- [57] J. Szlufcik, S. Sivoththaman, al. « **Low-Cost Industrial Technologies of Crystalline Silicon Solar Cells** », Proc.of the IEEE, vol. 85, no. 5, pp. 711-730, (1997).
- [58] R.A . Sinton, A. Cuevas « **A quasi-steady-state open-circuit voltage method for solar cell characterization**». Proceedings of the 16th EUPVSEC, Glasgow, Royaume-Uni, pages 1152-1155, (2000).
- [59] T. Desrués, « **Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière** » Thèse de doctorat institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (2009).
- [60] D. Pysch, A. Mette, S.W. Glunz «**A review and comparison of different methods to determine the series resistance of solar cells.** » Solar Energy Materials & Solar Cells, volume 91, pages 1698-1706, (2007).



Chapitre III:

La technologie des cellules solaires à contacts arrière interdigités classique IBC et à hétérojonction IBC-SiHJ

Chapitre III : Technologies des cellules solaires à contacts arrière interdigités classiques IBC et à hétérojonctions IBC-SiHJ

Introduction

Les cellules solaires à haut rendement de silicium ont été un sujet de recherches depuis de nombreuses années [1],[2]. Ces recherches ont amené à acquérir une connaissance importante de cette technologie, soit au niveau des matériaux utilisés, soit aux procédés de fabrication ; et par la suite, introduire ces connaissances acquises pour produire des cellules solaires à un prix d'un coût compétitif. Les cellules solaires à haut rendement peuvent atteindre des rendements de conversion d'énergie bien au-dessus de 20 % sous l'éclairage AM1.5, exemple la cellule (PERL) [4] avec un rendement de 24.7% obtenu dans le laboratoire [3],[4], la cellule solaire à hétérojonction à couche intrinsèque HIT d'un rendement de l'ordre de 22% [6], et la cellule solaire à contacts arrière interdigités IBC [5] qui reste d'un point faible, prix élevé et complexité de fabrication ; ce qui nécessite d'élargir et d'approfondir plus les recherches en créant des cellules combinant les différents avantages des différentes cellules à haut rendement. Les recherches ont fini par donner naissance à une nouvelle structure : la cellule solaire en silicium à hétérojonction à contacts arrière interdigités (IBC-SiHJ) qui est le sujet de cette recherche. Nous allons commencer par donner les notions préliminaires afin d'acquérir une base de connaissances qui nous permettront plus tard d'optimiser cette structure. Alors, l'objectif de cette partie du travail est de présenter les cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités IBC classique et à hétérojonction (IBC-SiHJ). Nous rappellerons le principe de fonctionnement des cellules PV à contacts arrière interdigités, ainsi que les avantages et les inconvénients de telles cellules, et discuteront les trois procédés technologiques qui seront mis en œuvre dans la fabrication de ces cellules solaires

1. Les cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités :

1.1 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités IBC classique :

1.1.1 Résultats de littérature (Historique) :

Les cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités IBC classique et depuis leur première apparition ont été largement étudiées, surtout à l'échelle des laboratoires vers les années 80 [7], leurs recherches ont été faites pour optimiser les différents paramètres de ces

types de cellules (le dopage par le phosphore et le bore, dépôt d'une couche en SiO₂ pour avoir une excellente passivation en plus d'un système de métallisation approprié le tout conduit à un rendement de conversion maximal de 22,7% avec une surface de 35,7 cm² [8]). Actuellement SunPower a réussi à produire une cellule IBC de type n avec un rendement de 22 à 23% et d'un rendement de 24,2% pour un substrat Mono-cristallins des tranches de silicium de 125 mm CZ de type n [9]. Récemment, les recherches tendent vers le développement de technologies des procédés de fabrication des cellules IBC, à base de silicium de qualité cristallin au lieu du monocristallin afin de réduire le coût de fabrication.

Tableau III-1. *Présentation des rendements obtenus des cellules solaires IBC classiques rapportés dans la littérature [10].*

Equipes	Références	Années	Substrat	Surface (cm ²)	Rendement(%)
Stanford University	[8]	1990	Type (n), FZ	35.7	22.7
ISFH	[11]	2006	Type (p), FZ	4	22.0
Q-cells, ISFH, ISE	[12]	2006	Type (n), CZ	4	21.0
UNSW	[14]	2007	Type (n), FZ	8	19.9
Sharp	[13]	2008	Type (n), CZ	157	20.1
SunPower	[9]	2010	Type (n), CZ	157	24.2

1.1.2 Représentation de la structure d'une cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités IBC classique [10]

Dans le cas des cellules photovoltaïques conventionnelles, la jonction p-n est placée sur la face avant (illuminée) de la cellule et les contacts à l'émetteur et au substrat sont sur les faces opposées, sa structure est simple, mais elle présente des inconvénients ; on peut citer :

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

Ces problèmes sont évités dans les cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités IBC. Dans cette structure, la jonction et les contacts se trouvent sur la face

opposée du rayonnement. La figure III-1 représente une structure d'une cellule à contacts arrière interdigités IBC:

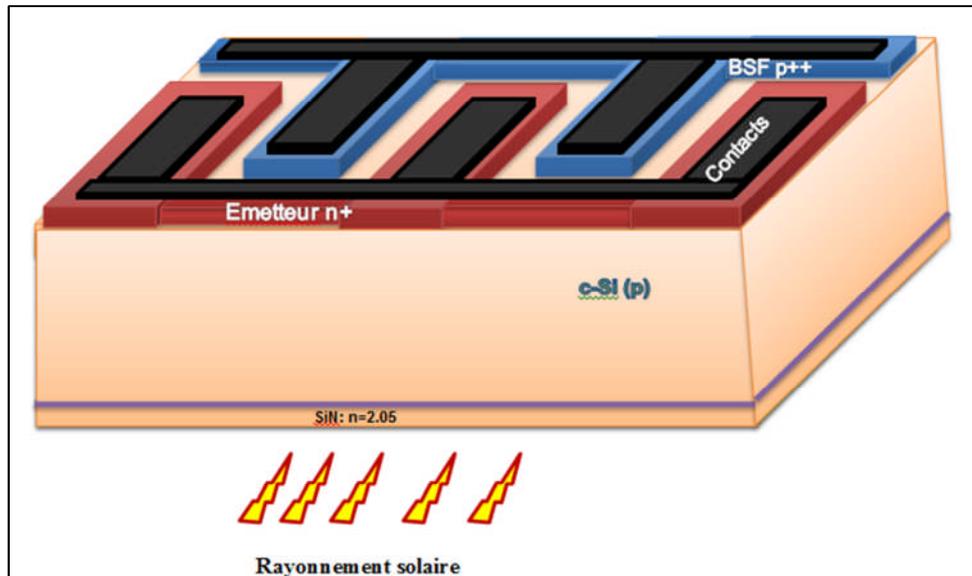


Figure III-1. Structure de cellule PV à contacts arrière interdigités IBC [15]

Cette structure de cellule est réalisée sur des substrats de silicium de bonne qualité (n ou p), c'est-à-dire avec une longueur de diffusion plus importante que l'épaisseur du substrat. La jonction p-n ou bien l'hétérojonction p-n sont élaborées en forme de peigne et sont situées sur la face arrière (non exposée à la lumière) du substrat.

Les contacts ohmiques à l'émetteur et au substrat sont réalisés en forme de peignes interpénétrés, une zone dopée p^+ au cas où on a une jonction formée sous le contact du substrat pour assurer l'ohmicité du contact et réduire la recombinaison des porteurs minoritaires sur le contact.

La face avant de la cellule texturée : on dépose une couche de passivation et antireflet (habituellement le nitrure de silicium). La cellule à contacts arrière interdigités est éclairée du côté où il n'y a pas de métallisation.

1.1.3 Principe de fonctionnement

La lumière génère des paires électrons - trous dans le substrat et diffusent vers les contacts correspondants (les électrons vers l'émetteur et les trous vers le BSF). Les paramètres géométriques de la cellule doivent satisfaire la condition suivante : la distance qui doit être parcourue par les porteurs minoritaires entre la génération et les contacts, et qui doit être plus petite que la longueur de la diffusion. Dans le cas contraire, le rendement de la cellule va se dégrader en raison des recombinaisons en volume.

1.2 Les avantages des cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités IBC

Classique [15],[16]

- Il n'y a pas de taux d'ombre des contacts.
- L'absence de jonction fortement dopée à l'avant permet d'atteindre une excellente qualité de surface en terme de passivation ce qui implique une forte tension en circuit ouvert grâce à la réduction du courant de saturation.
- La libre géométrie de contacts à l'arrière permet d'obtenir d'excellentes valeurs du facteur de forme.
- Aussi et grâce à la faible recombinaison dans l'émetteur, celui-ci peut être fortement dopé. L'avantage d'un émetteur fortement dopé est l'augmentation de la barrière de potentiel de la jonction p - n. Par conséquent, la tension de circuit ouvert V_{co} augmente et la recombinaison sur le contact à l'émetteur est réduite
- Pas de contacts à l'avant de la cellule, donc on aura une réduction dans la réflectivité et par conséquent un courant en circuit ouvert élevé.
- Les contacts étant réalisés sur la face arrière, ils peuvent être larges ce qui réduit la résistance série de la cellule et améliore le confinement optique car les contacts métalliques servent de réflecteur arrière.
- Le courant d'obscurité de la cellule (courant de diode) est réduit car la surface de la jonction p-n est plus petite.
- La recombinaison dans l'émetteur est diminuée puisqu'il est situé sur la face non illuminée.
- L'assemblage des cellules PV interdigités est simplifié car tous les contacts sont situés sur une face de la cellule. Pour réaliser la cellule à contacts arrière interdigités, l'accès à une seule face du substrat suffit, sauf pour le dépôt de la couche antireflet. Mais ce dépôt est une opération «moins critique» puisqu'elle se passe à basse température (200-400°C)

1.3 Les inconvénients des cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités IBC

- La technologie de réalisation de cellules solaire à contacts arrière interdigités est compliquée, car elles nécessitent de nombreuses étapes de photolithographie et d'alignement difficilement adaptée à une application industrielle.
- La nécessité de substrats doit être de très haute qualité électronique, pour que la longueur de diffusion des porteurs représente 2 à 4 fois l'épaisseur de la cellule.

- Les cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités sont très sensibles à la recombinaison en surface ; donc, la passivation de la face avant doit être très bonne.

2. Les technologies de base pour la réalisation des cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités IBC classique

L'inconvénient majeur des cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités, reste leur complexité de fabrication et par conséquent leur coût élevé. Par exemple, on a besoin de trois à six lithographies pour l'élaboration d'une seule cellule solaire de ce type. Dans cette partie, nous allons présenter les trois procédés technologiques qui ont été validés dans l'industrie [16].

- Le premier procédé : nous avons utilisé un seul type de métal qui a été appliqué sur des substrats massifs en silicium (Si) de type p.
- Le deuxième procédé : on prend deux matériaux différents pour les contacts n et p, et qui ont été testés sur des substrats de type p avec différentes épaisseurs (réalisation des cellules interdigités sur des couche épitaxiales).
- Le troisième procédé : dit « auto-aligné » permet de diminuer le nombre de lithographies utilisées.

Les paramètres des cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités (dimension et profondeurs des zones dopées, niveaux de dopage, dimensions des grilles métalliques) sont basé sur les résultats de simulation.

2.1 Réalisation de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités par le premier procédé :

2.1.1 Etapes technologiques pour la réalisation de cellules solaires à contacts arrière interdigités par le procédé 1

Sur la figue III-2, nous avons représenté les différentes étapes pour la réalisation des structures à contacts arrière interdigités par le procédé 1

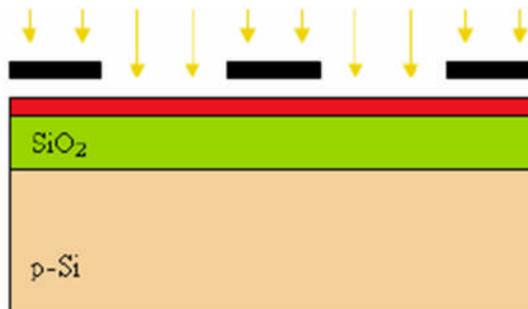
Etape 1 : On nettoie la plaque initiale, on la pose 20 secondes dans BE7 (HF dilué à 5%), ensuite dans $H_2O_2+H_2SO_4$ pendant 15 minutes ; après, on remet la plaque une seconde fois dans BE7.



Etape 2 : A l'aide d'oxydation humide on forme une couche de SiO_2 d'épaisseur $0.6\mu\text{m}$ (les paramètres d'oxydation c'est 50 min à 1050°C dans O_2 humide).



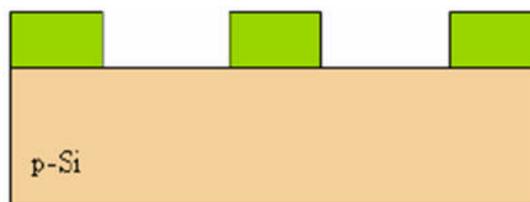
Etape 3 : On dépose la résine positive sur l'oxyde et on attend (1 minute à 150°C) pour le séchage ; l'étape qui suit c'est l'insolation de la résine avec le masque 1 qui sert à délimiter l'émetteur dans un temps de 35 secondes.



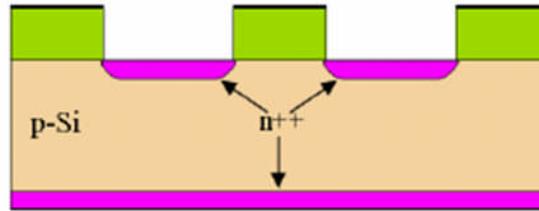
Etape 4 : Développement de la résine insolée sur une durée de 2 minutes à 120°C ouverture de fenêtres dans l'oxyde par gravure dans BE7 pendant 5-6 minutes (la gravure sera contrôlée par le mouillage de la surface).



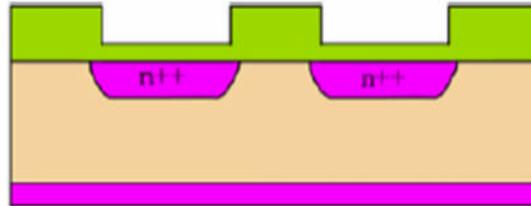
Etape 5 : Gravure de la résine dans le remover sur un temps de 10 minutes.



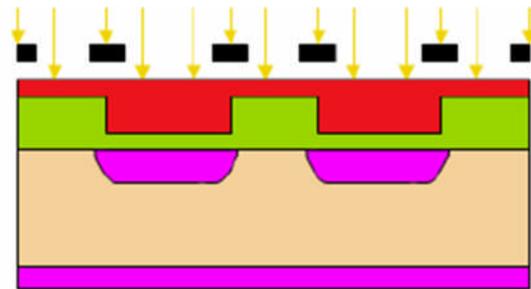
Etape 6 : La diffusion de phosphore de POCl_3 à 950°C et pendant 20 minutes a créé des zones n^{++} (peignes face arrière et émetteur flottant face avant)



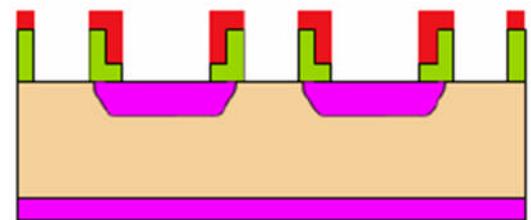
Etape 7 : Formation d'oxyde sec sur les zones n++ avec une épaisseur de 80 nm, par la mise sous oxygène à 1050°C et pour une durée de 60 minutes.



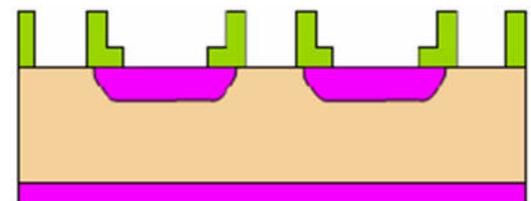
Etape 8 : Dépôt de résine positive, séchage de la résine, alignement des motifs, insolation à travers le deuxième masque qui sert à délimiter les ouvertures de contacts dans l'oxyde.



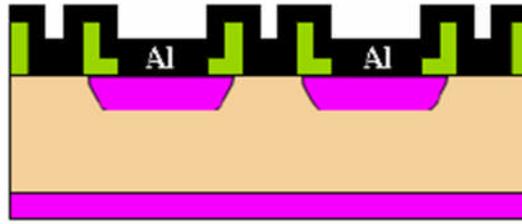
Etape 9 : On attend le développement de la résine insolée et son durcissement, après et par gravure dans BE7, on ouvre des fenêtres dans l'oxyde (le temps de gravure est de 5-6 minutes).



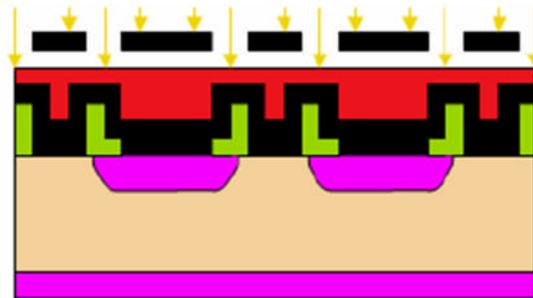
Etape 10 : Enlèvement de la résine dans le remover. Le temps de gravure est de 10 minutes.



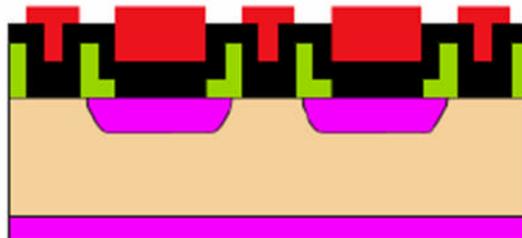
Etape 11 : Dépôt de $1\mu\text{m}$ ou plus d'aluminium plein plaque par évaporation sous vide pour assurer une résistance série faible.



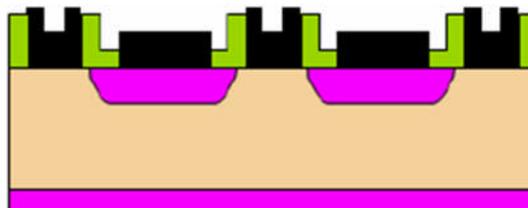
Etape 12 : Dépôt de la résine positive, séchage de la résine ; alignement des motifs, insolation de la résine via le masque trois qui sert à délimiter les contacts.



Etape 13 : Développement et durcissement de la résine insolée.



Etape 14 : Gravure de l'aluminium (dans les zones non protégées par la résine) par une solution acide ; ensuite on enlève la résine dans le remover.



Etape 15 : Recuit (RTA) des contacts à 550°C pendant 30 secondes, formation d'une zone $p+$; dépôt d'une couche antireflet (SiN) par UV CVD.

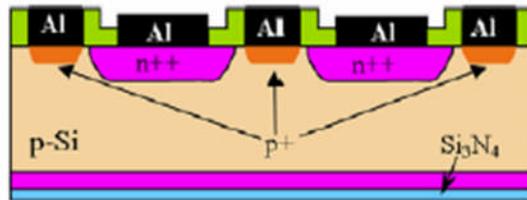


Figure III-2 Différentes étapes de réalisation d'une structure IBC par le procédé 1 [16]

2.1.2 Les masques utilisés dans les cellules solaires à contacts arrière interdigités par le procédé 1

Les masques sont utilisés pour l'élaboration des cellules sur des substrats de deux pouces. Sur chaque plaque de silicium on peut, réaliser quatre cellules solaires à contacts arrière interdigités en même temps (figure III-3).

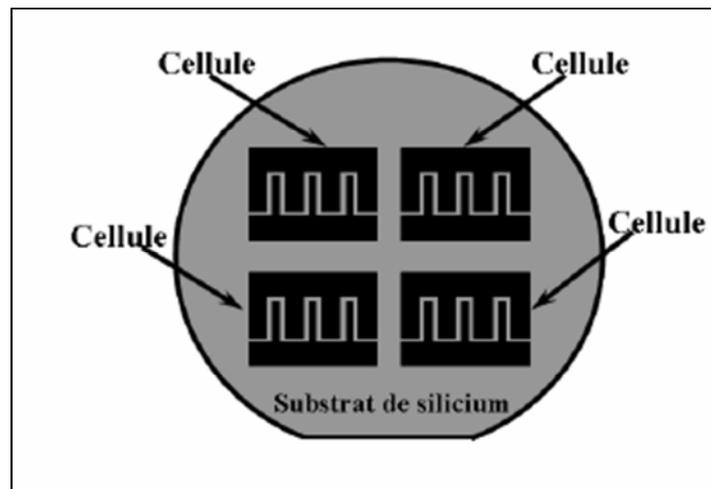


Figure III-3. Disposition des cellules sur substrat de deux pouces pour le procédé 1 [16]

Dans le procédé 1, nous avons utilisé trois masques représentés sur la figure III-4

- Masque 1 : pour la formation de l'émetteur (la zone n^{++})
- Masque 2 : utilisé pour l'ouverture des fenêtres dans SiO_2 (afin de pouvoir déposer les contacts sur l'émetteur et le substrat).
- Masque 3 : pour la formation des contacts métalliques.

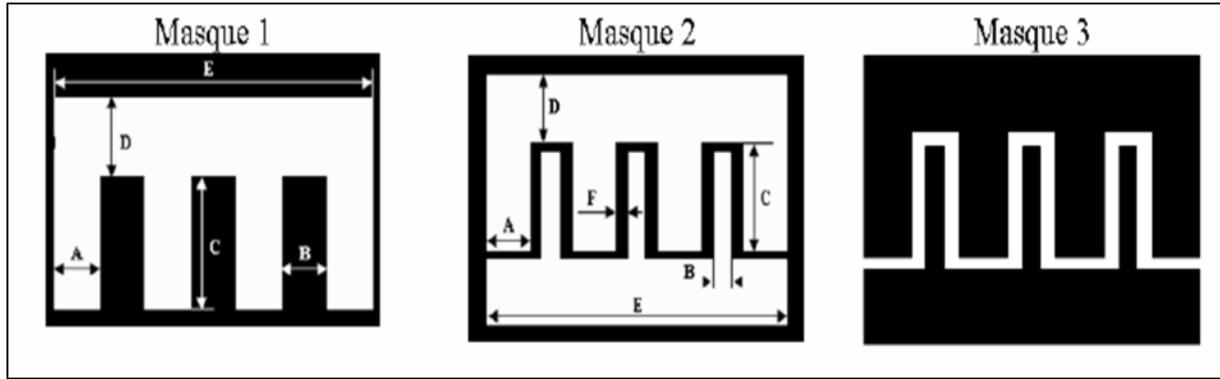


Figure III-4. Dessin des masques utilisés pour la fabrication des cellules à contacts arrière interdigités par le procédé 1[16]

2.2 Réalisation des cellules solaires à contacts arrière interdigités par le deuxième procédé

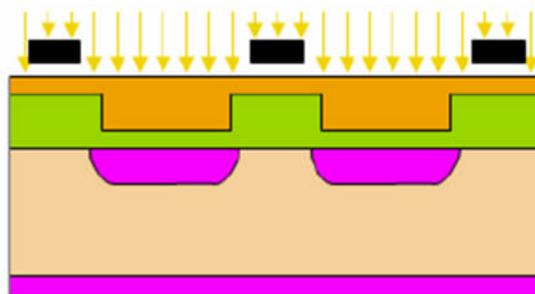
2.2.1 Etapes technologiques pour la réalisation des cellules solaires à contacts arrière interdigités par le procédé 2

Sur la figure III-5, nous avons représenté les différentes étapes pour la réalisation des structures à contacts arrière interdigités par le procédé 2

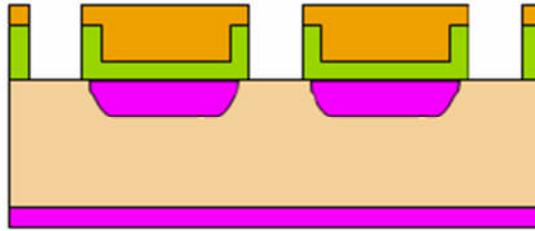
Remarque

Les étapes de 1-7 sont identiques pour les deux procédés 1 et 2.

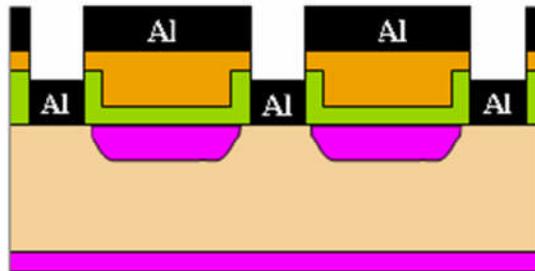
Etape 8 : Dépôt de résine négative, séchage de la résine, alignement des motifs, insolation via le masque 2 qui sert à réaliser l'ouverture des contacts p^+ à travers l'oxyde.



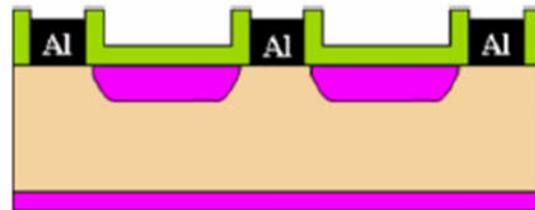
Etape 9 : Développement : on attend le durcissement de la résine ; puis on réalise une ouverture des fenêtres dans l'oxyde humide par gravure dans BE7 sur une durée de 5-6 minutes.



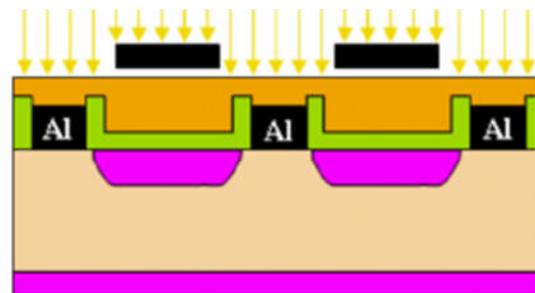
Etape 10 : Dépôt d'aluminium plein plaque par évaporation sous vide sur une épaisseur de $1\mu\text{m}$ ou plus ; afin d'assurer une résistance faible.



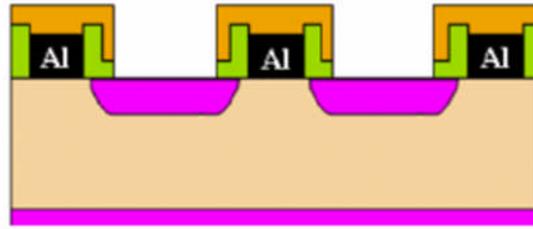
Etape 11 : Enlèvement de la résine et de l'aluminium par lift-off.



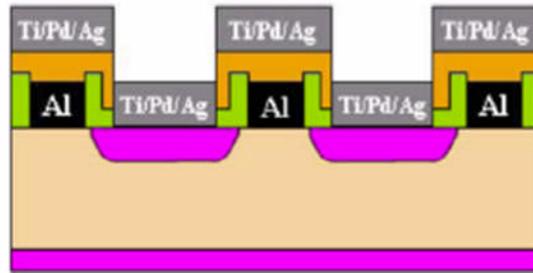
Etape 12 : Dépôt de la résine négative, séchage de la résine, alignement des motifs, insolation via le masque 3 qui sert à réaliser l'ouverture des contacts sur l'émetteur à travers l'oxyde.



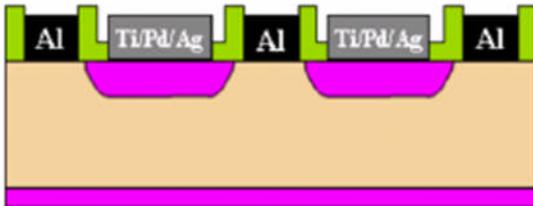
Etape 13 : Développement de la résine, durcissement de la résine ; ouverture des fenêtres dans l'oxyde par gravure dans BE7. Le temps de gravure de l'oxyde sec est de 1-2 minutes.



Etape 14 : Dépôt de Ti/Pd/Ag (structure sandwich des métaux) plein plaque par évaporation sous vide. Les épaisseurs des métaux sont : Ti-50nm ;Pd-10nm ;Ag -800nm.



Etape 15 : Enlèvement de la résine et de Ti/Pd/Ag par lift-off.



Etape 16 : Recuit des contacts à 650°C pendant 30 secondes (RTA) pour former la zone p⁺.

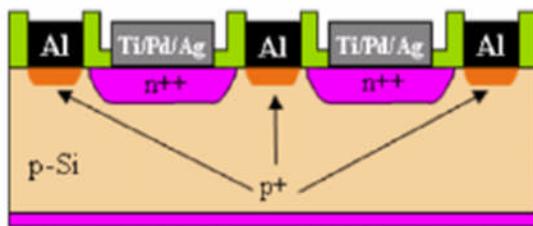


Figure III-5. Différentes étapes de réalisation d'une structure IBC par le procédé 2 [16]

Dans ce procédé, il y a trois lithographies (formation de l'émetteur, création du contact p⁺, et création de contact n⁺⁺). Il est nécessaire de faire des alignements pour les deux derniers. Mais l'inconvénient de ce procédé reste l'utilisation de deux types de résines, une négative et l'autre positive ; il permet d'éviter l'utilisation d'aluminium pour le contact sur l'émetteur (ce qui évite les problèmes de résistance parallèle au moment de recuit)

2.2.2 Les masques utilisés dans les cellules solaires à contacts arrière interdigités par le procédé 2

Six cellules à contacts arrière interdigités sont réalisées au même temps (voir la figure III-6) sur un substrat de deux pouces.

Dans le procédé 2 nous avons utilisé trois masques représentés sur la figure III-7 :

- Masque 1 : pour la formation de l'émetteur (la zone n^{++})
- Masque 2 : pour la formation du contact substrat (ouverture des fenêtres dans le SiO_2 et formation des peignes en aluminium par lift-off).
- Masque 3 : pour la formation du contact émetteur (ouverture des fenêtres dans le SiO_2 et formation des peignes en Ti/Pd/Ag par lift-off).

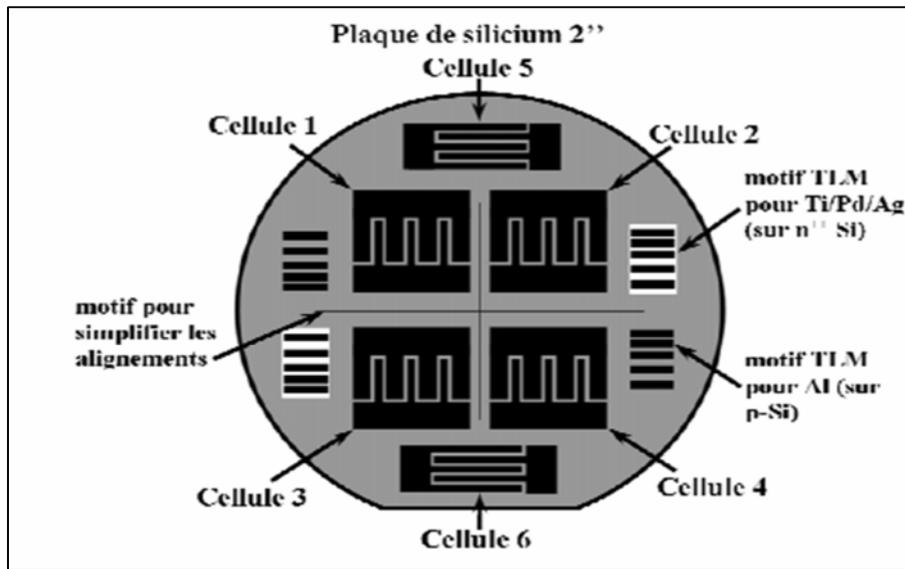


Figure III-6. Disposition des cellules sur substrat de deux pouces pour le procédé 2[16]

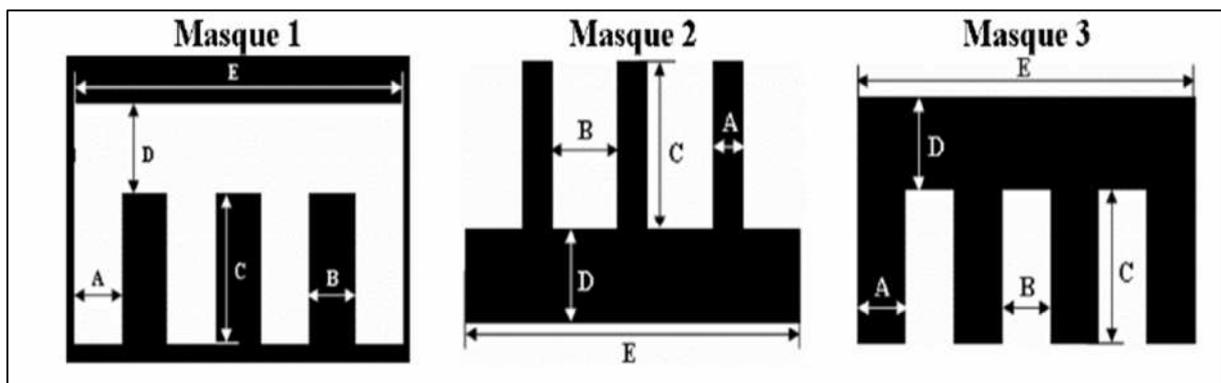


Figure III-7. Dessin des masques utilisés pour la fabrication des cellules à contacts arrière interdigités par le procédé 2[16]

2.3 Réalisation des cellules solaires à contacts arrière interdigités par le procédé 3

Un procédé technologique dit auto-aligné a été proposé par Sinton [18] (Figure III-8), qui permet de réaliser une cellule interdigitée en une seule lithographie. Les étapes technologiques de ce procédé sont :

- Diffusion du phosphore plein plaque.
- Une lithographie pour définir la forme des peignes n^{++} .
- Gravure du verre du phosphore.
- Gravure de la jonction p-n, seuls les peignes n^{++} sont protégés par le verre au phosphore.
- Diffusion de bore, le verre de phosphore sert de masque pour éviter la diffusion de bore dans le peigne n^{++} .
- Formation des contacts, elle peut être réalisée par sérigraphie.

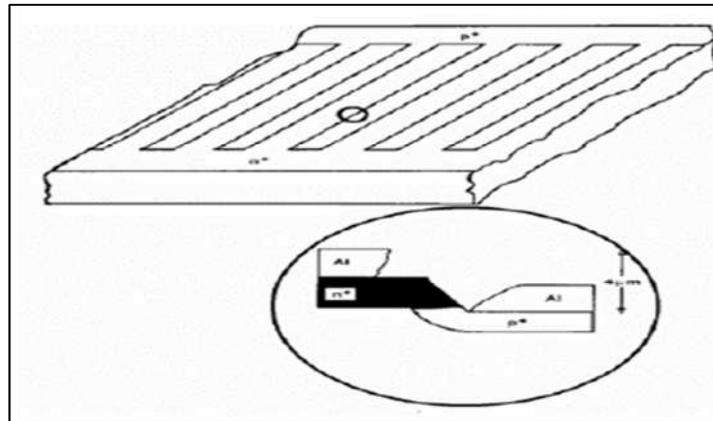


Figure III-8. Structure des cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités élaborés par le procédé auto-aligné de Sinton [17]

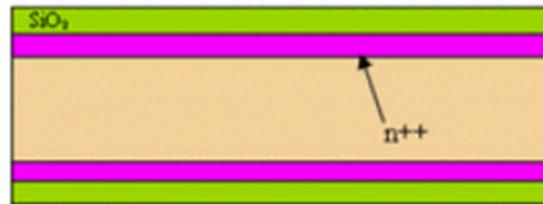
2.3.1 Etapes technologiques pour la réalisation des cellules solaires à contacts arrière interdigités par le procédé 3 (auto-aligné) :

Sur la figue III-9, nous avons représenté les différentes étapes pour la réalisation des structures à contacts arrière interdigités par le procédé 3

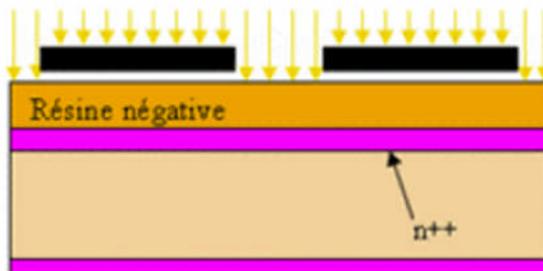
Etape1 : Nettoyage de la plaque initiale pendant 20 secondes dans le BE7 (HF dilué à 5%), ensuite on le met dans $H_2O_2+H_2SO_4$ pendant 15 minutes puis dans BE7 une nouvelle fois pour une durée de 20 secondes.



Etape 2 : Diffusion plein plaque de phosphore de POCl_3 à 950°C pendant 20 minutes ; redistribution à 1050°C pendant 60 minutes sous oxygène (formation d'oxyde sec).



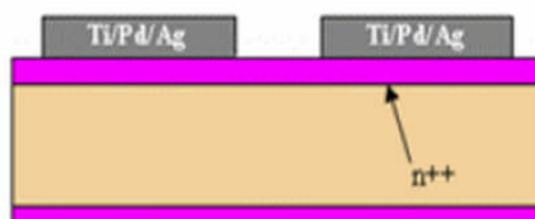
Etape 3 : Gravure de l'oxyde dans BE7 pour une durée de 1-2 minutes (fin de gravure contrôlée par le mouillage de la surface). On dépose la résine négative, puis on attend le séchage de la résine, pour terminer avec une insolation via le masque 3 du procédé technologique 2.



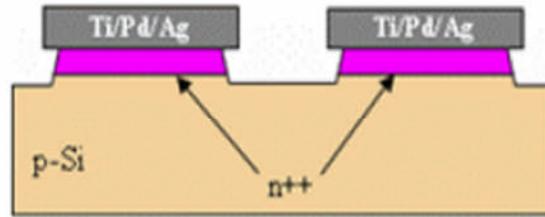
Etape 4 : Développement puis durcissement de la résine enfin le dépôt de Ti/Pd/Ag plein plaque pour évaporation sous vide.



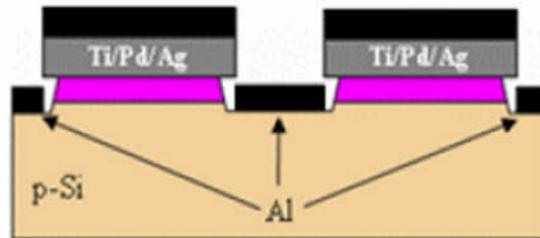
Etape 5 : Gravure de la résine et de Ti/Pd/Ag par lift-off.



Etape 6 : Gravure du silicium dans KOH ou FN ($\text{HF}+\text{HNO}_3$). Les contacts Ti/Pd/Ag servent de masque protégeant l'émetteur.



Etape 7 : Dépôt d'aluminium plein plaque par évaporation sous vide. L'épaisseur d'aluminium doit être de $1\mu\text{m}$ ou plus pour assurer une résistance série faible.



Etape 8 : Recuit des contacts à 650°C pendant 30 secondes (RTA) afin de former une zone p^+ sous aluminium ; dépôt d'une couche antireflet (Si_3N_4).

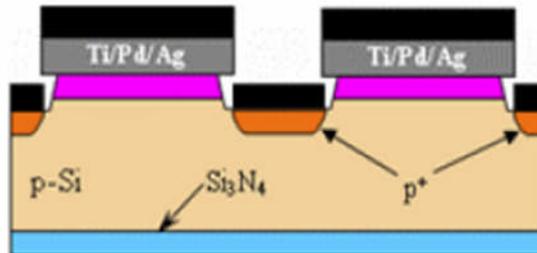


Figure III-9. Différentes étapes de réalisation d'une structure IBC par le procédé 2[16]

Remarque :

Ce procédé a l'avantage de supprimer une étape à haute température (l'oxydation humide), ce qui rend la dégradation de la longueur de diffusion moins importante. Le point clé de ce procédé est la formation des ponts en métal au-dessus de l'émetteur.

3. La cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités à hétérojonction (IBC-SiHJ)

3.1 Historique des cellules solaires IBC-SiHJ (Résultats expérimentaux)

Bien que les résultats soient rapportés sur les structures solaires à hétérojonctions à contacts arrière interdigités pour presque de vingt ans, c'est seulement au cours des cinq dernières années que la mise en œuvre de la structure IBC-SiHJ a suscité l'intérêt de beaucoup de recherches, le premier rapport d'une telle structure en lieu en 2007 [19]. C'est pour cette raison, qu'un grand nombre des documents sont généralement fabriqués sur de petites cellules de 25 cm² [20],[21]. La plupart des résultats ont été obtenus sur un substrat de silicium, à la fois de type p et de type n. La structuration de la face arrière de la cellule est le plus souvent réalisée avec la photolithographie. Sur le tableau, quelques résultats expérimentaux d'un maximum de rendement d'environ 15 à 16 %, ce qui est nettement inférieur à celui diffusé des cellules solaires IBC classique (> 22%) comme a été décrit dans le paragraphe précédent.

Tableau III-2 Aperçu sur les rendements des cellules solaires à hétérojonction à contacts arrière interdigités IBC-SiHJ.

Tableau III-2. Résultats des différents laboratoires sur les cellules solaires à contacts arrière interdigités

Laboratoire	Surface(cm ²)	Substrat	Rendement(%)	Années	Références
Univ.Of Delaware	1.32	FZ, type(n)	11.8	2007	[19]
HZB	1	FZ, type(p)	13.9	2008	[23],[24]
ENEA	6.25	CZ, type(p)	15	2008	[22]
University of Toronto	1	FZ, type(n)	8.1	2009	[22]
IMEC	1	CZ, type(n)	15.2	2010	[26]
INES	25	FZ, type(n)	15.7	2010	[20],[21]

Actuellement, le principal défi pour la réalisation et l'amélioration du rendement d'une structure IBC-SiHJ est la combinaison entre le silicium amorphe et le silicium cristallin. Une majorité de laboratoires travaillent sur l'évolution et la conception de cellules interdigitées à hétérojonctions. Voici les premiers résultats sur les cellules solaires à hétérojonction à contacts arrière interdigités IBC-SiHJ qui ont été signalés par [27]:

3.1.1 La structure IBC-SiHJ (*Interdigitated Back Contact Silicon Hetero-Jonction*)

La structure IBC-SiHJ (**Interdigitated Back Contact Silicon Hetero-Jonction**) a été évoqué par Lu et al en 2007 [19]. La conception de ce genres de cellules se fait sur des substrats poly-cristallin de type n, d'épaisseur 300 μm et de résistivité 2,5 $\Omega\cdot\text{cm}$. La passivation de la face avant se fera par l'utilisation de 20 nm de silicium amorphe (a-Si:H(i)) et par l'ajout d'une couche anti reflet. Le rendement optimal obtenu est de 11,8 % sur une cellule de 1,32 cm^2 . Il est à noter que la face avant de la cellule n'a pas été texturée ; aussi aucune couche de passivation n'est présente entre le BSF et l'émetteur [28]. Le procédé de fabrication est basé sur deux étapes de photolithographie.

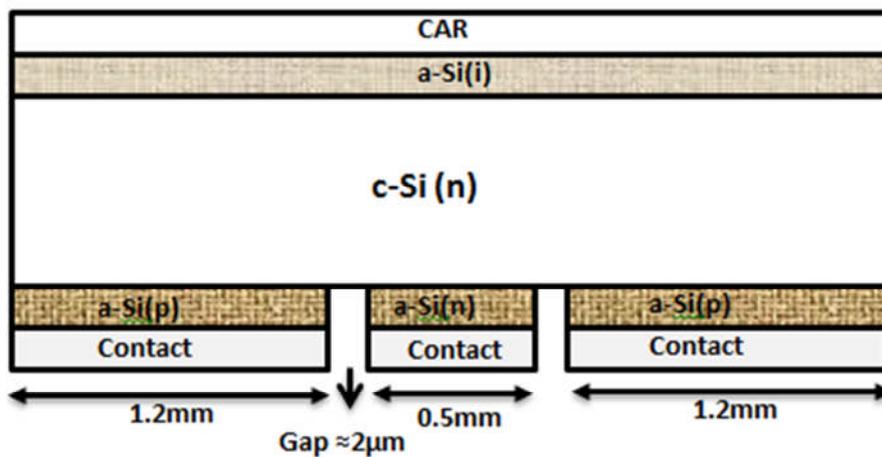


Figure III-10. Représentation schématique de la structure d'une cellule solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigités IBC-SiHJ développée à l'université du Delaware.

3.1.2 La structure **BEHIND** (*Back Enhanced Heterostructure with InterDigitated contacts*)

Tucci et al. de l'ENEA « Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile » (Italie) [22],[29] en 2008 ont présenté la structure **BEHIND** (**Back Enhanced Heterostructure with InterDigitated contacts**). Ces types de cellules sont construites sur des substrats en silicium cristallin (c-Si) de type p, et d'épaisseur 200 μm , de résistivité 1 $\Omega\cdot\text{cm}$. Une couche de silicium amorphe intrinsèque a-Si:H(i) a été utilisée pour passiver les hétéro-interfaces c-Si/a-Si:H. en plus d'utilisation de masque métallique pour la conception de la face arrière. Le rendement obtenu est de 15% sur une cellule de 6,25 cm^2 avec une tension en circuit ouvert V_{co} de 695 mV.

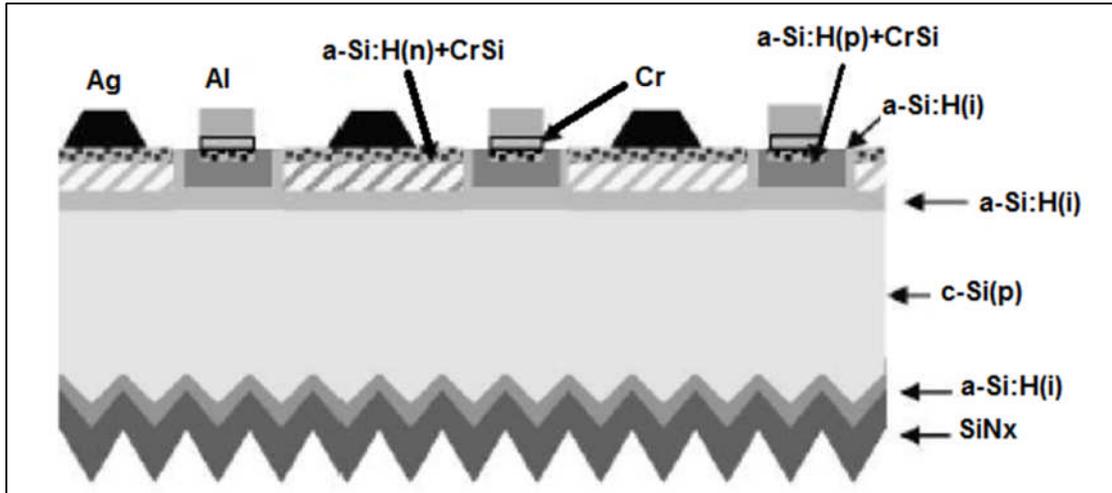


Figure III-11. Schéma d'une cellule solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigités BEHIND développée à l'ENEA[27].

3.1.3 La cellule IBC-SiHJ non texturés

Desrués et al. de l'INES [20],[27], Dans le cadre du projet européen QCPASSI avec une cellule IBC-SiHJ non texturée et sur un substrat de silicium CZ de type n, un rendement de conversion de 13% sur une surface de 25 cm² est obtenu ; après optimisation récemment de la couche intrinsèque, et aussi par l'utilisation de techniques d'alignement bas coût (masque métallique, sérigraphie). La figure III-12 représente un schéma de la structure de la cellule interdigitée à hétérojonctions réalisée à l'INES/CEA : le substrat est en silicium cristallin c-Si, avec une résistivité d'un intervalle entre 1 et 5Ω.cm.

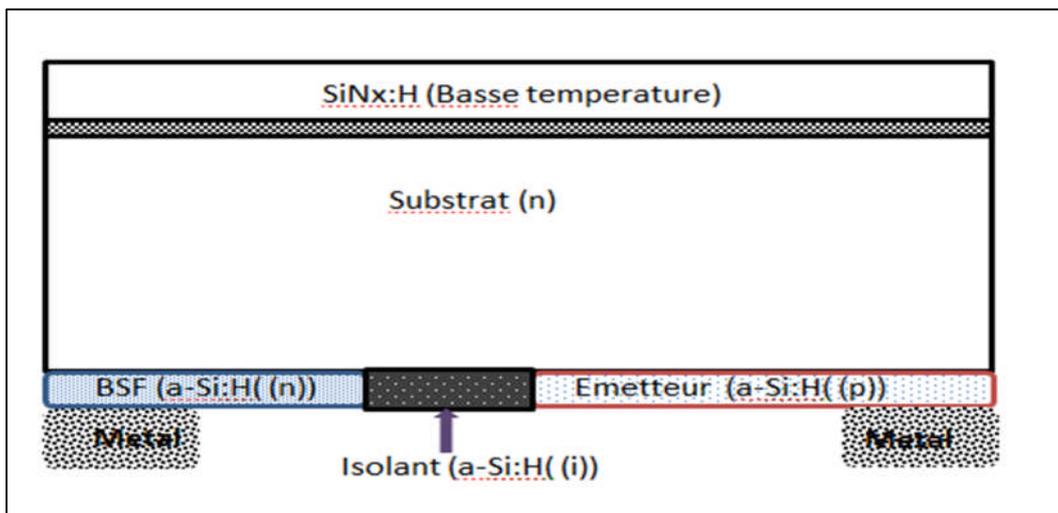


Figure III-12. Schéma de la structure de la cellule interdigitée à hétérojonctions réalisée

3.1.4 La structure **RECASH** « *Rear Contact Amorphous / crystalline Silicon Heterojunction* »

Stangl et al ont présentés deux structures solaires innovantes [23],[24]. Lors de la première structuration, l'aluminium Al est déposé en premier, et isolé avec une couche d'oxyde, avant la fabrication de l'émetteur, et la mise en contact à travers une couche TCO, leur problème se situe dans les états d'interface. Cette structure est appelé **RECASH** « **Rear Contact Amorphous / crystalline Silicon Heterojunction** » [30] réalisée par le HZB « **Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie** » (Allemagne). Les cellules sont construite à partir d'un substrat cristallin (c-Si) de type p, d'épaisseur 240 μm et de résistivité 1 $\Omega\cdot\text{cm}$. La passivation de la face avant est réalisée avec une couche antireflet de nitrure de silicium SiN_x . Ces cellules ont permis d'obtenir un rendement de 13,9% sur une cellule de 1 cm^2 .

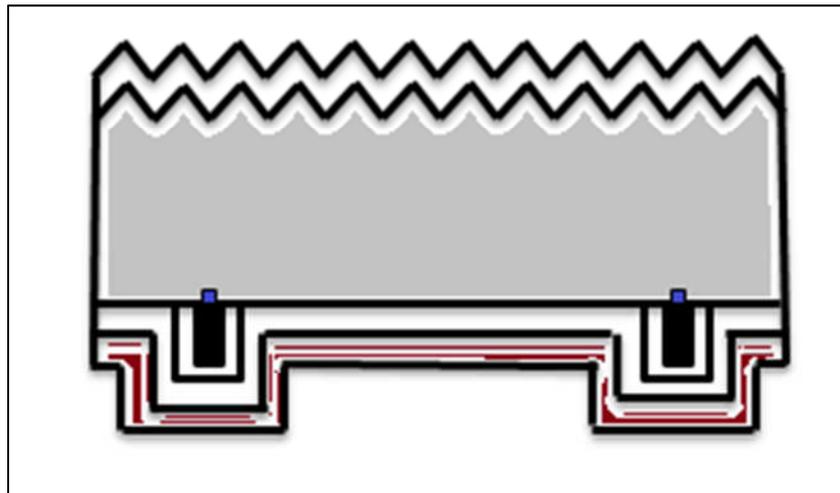


Figure III-13. Schéma de principe de la structure solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigités **RECASH** développée au HZB[27].

3.1.5 La structure **BACH** « *Back Amorphous-Crystalline silicon Heterojunction* »

Une autre structure propose un processus qui commence par lithographie avec l'ouverture d'un trou. L'isolation se fait par l'utilisation SiO_2 . De telles structures ont acquis un rendement de 7.15%. Hertanto et al de l'Université de Toronto (Canada) ont proposé en 2009 [25],[31] la structure **BACH** « **Back Amorphous-Crystalline silicon Heterojunction** », les cellules ont été construite sur un substrat cristallin (c-Si) de type n, d'épaisseur 300 μm et de résistivité 1 ou 20 $\Omega\cdot\text{cm}$. le nombre de lithographie et de trois. La structure utilisée pour passer la face avant est la suivante est a-Si:H (45nm)/ a-SiN (75 nm) [27]. Le rendement obtenu est entre 7,3 et 8,1%, sur une cellule de 1 cm^2 .

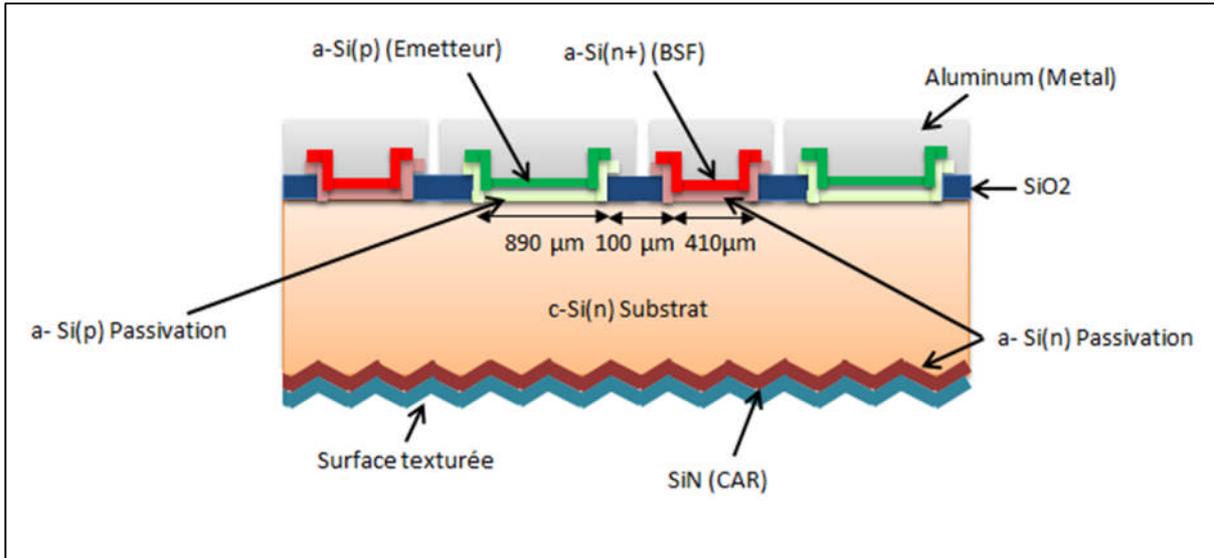


Figure III-14. Représentation schématique de la cellule interdigitée à hétérojonction BACH développée à L'université de Toronto[27].

3.1.6 La structure IBC-SHJ « Interdigitated Back Contact Silicon Heterojunction »

Dans le travail de l'IMEC (Belgique) [26],[32], la structure IBC-SHJ « **Interdigitated Back Contact Silicon Heterojunction** » est proposée. La réalisation de ce types de cellules se fait sur des substrats cristallin (c-Si) de type n, d'épaisseur 160 µm et de résistivité 3 Ω.cm. avec une étape de photolithographie et une étape par masque métallique. Les résultats ont abouti à une densité de courant en circuit ouvert J_{cc} supérieure à 38 mA/cm² et d'un rendement optimisé de 14,6 % sur une cellule de 1 cm². Cette structure n'utilise pas la couche fortement dopée FSF mais plutôt une couche d'Al, déposée directement (Schottky-contact).

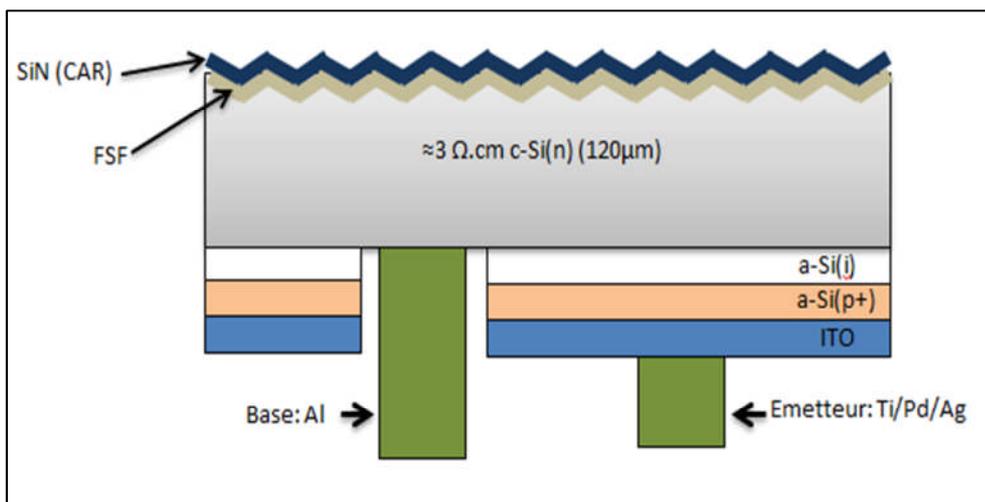


Figure III-15. Schéma de principe de la structure interdigitée à hétérojonctions IBC-SHJ développée à l'IMEC[27].

3.2 Structure d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction à contacts arrière interdigités IBC-SiHJ

La figure III-16 est une représentation schématique d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction à contacts arrière interdigités.

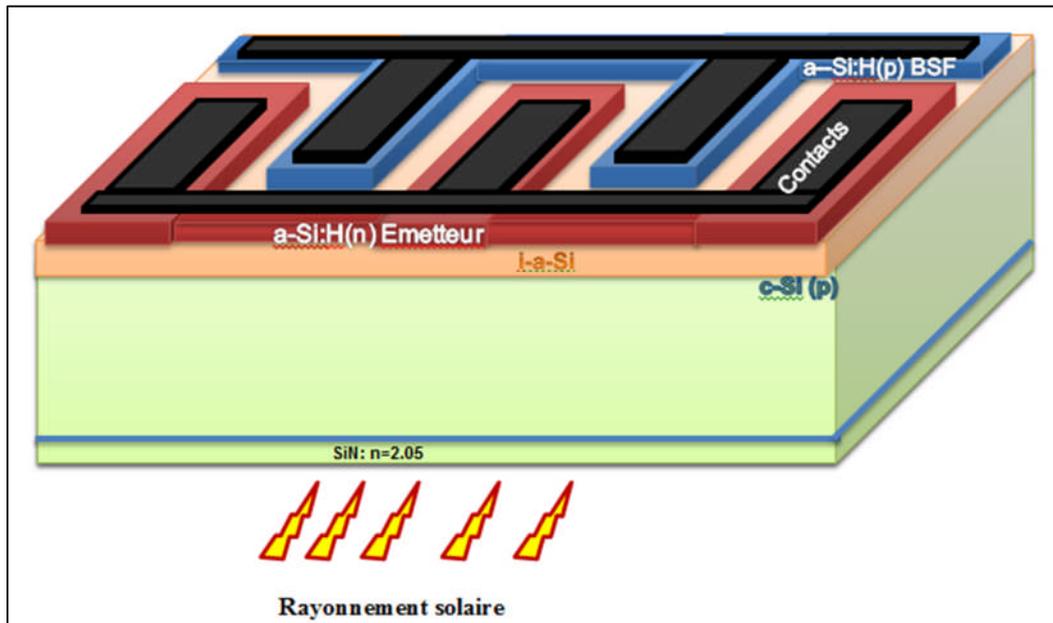


Figure III-16. Représentation schématique d'une cellule solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigités IBC-SiHJ [15].

La conception des cellules photovoltaïques à hétérojonction à contacts arrière interdigités (IBC-Si-HJ) repose sur le même principe que celui des cellules solaires IBC classique sauf que ce genre de cellules sont constitués d'un émetteur en silicium amorphe séparé du substrat cristallin (c-Si) généralement par une couche intermédiaire (couche intrinsèque de silicium amorphe), aussi, les contacts ont été placés sur l'arrière de la cellule (face non illuminée).

- L'intérêt d'introduire une couche intrinsèque :
 - Assure la passivation de la surface ce qui améliore la tension en circuit ouvert V_{co} (surpassent les 740 mV [33]).
- L'intérêt d'utilisation d'un émetteur en silicium amorphe
 - Le gap est de 1,8 eV [34] de silicium amorphe est un avantage puisqu'il nous facilite la séparation et la collecte des porteurs de charges photogénérées.
 - Un processus de fabrication réduit (réduction dans le budget thermique)

Sur le schéma la structure IBC-SiHJ est représentée sur la figure III-16. La face avant est texturée dans certains cas et couvée d'une couche anti-réfléchissante (par exemple le nitrure de silicium SiN) pour augmenter l'absorption optique. Cette couche est souvent combinée à une couche de silicium amorphe intrinsèque (i-a-Si) très fine pour assurer la passivation. Comme alternative, un champ de surface avant pourrait être appliqué. A l'arrière de la cellule solaire IBC-SiHJ, les couches de silicium amorphe sont appliquées d'une manière interdigitée constituant l'émetteur et le BSF. Une couche intrinsèque de silicium amorphe (a-Si) est appliquée à fin de passiver la surface arrière. En outre, une couche conductrice peut être intercalée entre la couche de silicium amorphe et celles de contacts métalliques, qui protègent le silicium amorphe des effets dégradants du métal, et améliore la conductivité des propriétés de réflexion à l'arrière de la cellule IBC-SiHJ.

3.3 Problématique de la réalisation de la face arrière et la face avant dans une structure solaire à contacts arrière interdigitée

Le développement de la face arrière et la face avant dans les structures IBC à hétérojonction se fait au niveau de la conception des jonctions où au niveau des hétéro-interfaces. Ceci entraîne la détermination d'une géométrie optimale pour la face arrière de la cellule interdigitée et aussi de déterminer les propriétés optimales du substrat (c-Si) pour permettre l'augmentation du rendement. Les performances de la cellule interdigitée sont très sensibles à la qualité du substrat c-Si (durée de vie des porteurs minoritaires).

L'insertion d'une couche FSF permet la passivation de substrat cristallin. La passivation des hétéro-interfaces (c-Si/a-Si:H) constitue aussi un paramètre crucial, car la présence d'une grande densité de défauts se traduit par une dégradation des performances de la cellule solaire. Aussi, la métallisation peut être une source de pertes résistives. L'optimisation de cellules à contacts arrière interdigités se fait sur plusieurs niveaux qui seront détaillés dans le chapitre IV.

3.4 Paramètres d'optimisation d'une cellule IBC-SiHJ (étude théorique)

3.4.1 Étude du substrat

La qualité du substrat de silicium est un facteur très influent sur les performances d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction à contacts arrière interdigités (IBC-SiHJ). Etant donné que l'émetteur est placé sur l'arrière, les porteurs de charges photogénérées, dont la majorité sont créés à proximité de la surface d'avant, doivent couvrir un parcours jusqu'à l'arrière de la cellule. En outre, les porteurs doivent également se déplacer latéralement, pour atteindre soit l'émetteur soit le champ de la surface arrière BSF. Au cas où la qualité du substrat est moins

bonne, les porteurs de charges vont se recombiner avant d'atteindre les jonctions arrière. C'est un phénomène néfaste pour la cellule qui influe sur la densité de courant en court-circuit J_{cc} et par conséquent sur le rendement de conversion. Alors une règle générale s'applique c'est que la longueur de diffusion des porteurs de charges minoritaires doit être au moins de deux à trois fois l'épaisseur de la cellule (IBC-SiHJ). Par exemple pour une épaisseur de cellule de 200 μm une longueur de diffusion de 600 μm est nécessaire [35]. Une telle longueur de diffusion correspond à peu près à une durée de vie des charges minoritaires de 140 μs . Ce qui entraîne la réduction de l'épaisseur du substrat dont il diminue la qualité. C'est un compromis qui doit être résolu afin de maintenir un rendement maximal.

3.4.1.1 Choix du type de substrat dans la littérature

➤ Avantage d'un substrat de type n

- La plupart des impuretés ont une section efficace de capture d'électrons plus grande par rapport à celle des trous, ce qui rend le substrat de type n moins sensible aux impuretés courantes, tel que le fer.
- Avec l'utilisation du silicium CZ de type n, on aura moins de complexités créées par le bore dans le cas de silicium CZ de type p et qui peut causer une dégradation dans les performances des cellules solaires après l'illumination.
- La passivation de la surface avant par oxyde thermique de silicium SiO_2 ou de nitrure de silicium SiN crée une faible vitesse de recombinaison pour les substrats de type n plus que celle dans le cas du substrat type p.
- En terme de résistivité du substrat, deux effets contraires doivent être considérés : un niveau de dopage élevé dans le substrat qui se traduira d'une part une conductance plus élevée, un phénomène important pour le mouvement des porteurs photogénérés ; un faible niveau de dopage, d'autre part, il se traduira avec moins de pertes de recombinaison par rapport au dopage supérieur.

Remarque

Les rendements les plus élevés des cellules IBC ont été réalisés sur des substrats de type n (FZ), PV-FZ ou Matériau CZ. Jusqu'à présent, la plupart des épaisseurs de cellules utilisées sont de 160 à 250 μm . Aussi la résistivité est de l'ordre de 1 à 10 $\Omega \cdot \text{cm}$ [36].

➤ inconvénients de choisir un substrat de type n

- La passivation de la face arrière près de l'émetteur est désavantageuse (difficile).
- Les porteurs minoritaires (trous) ont une mobilité plus faible par rapport aux électrons dans les substrats de type p.

3.4.2 Passivation de surface

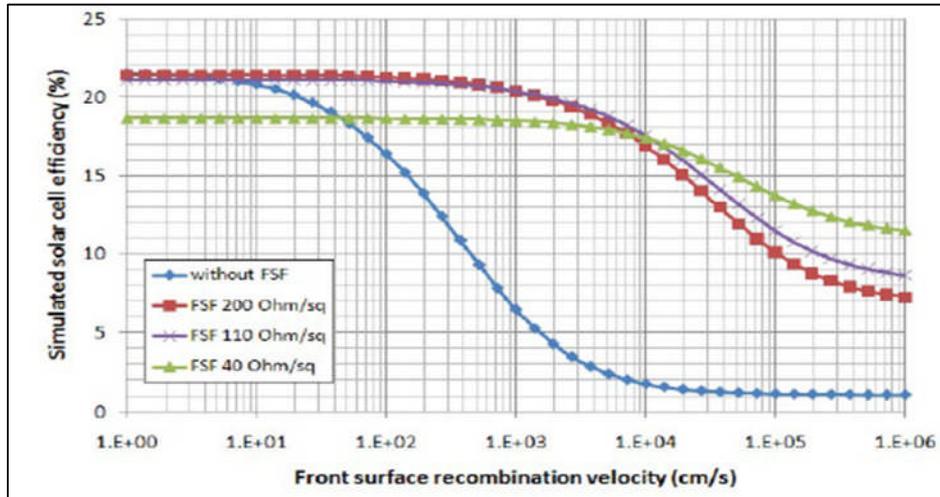


Figure III-17 L'influence du champ face avant FSF sur le rendement d'une cellule IBC [35]

La passivation de la surface avant est très importante. Elle repose sur la création d'un champ de surface face avant (FSF) [36] par la création d'une couche fortement stimulée d'un dopage similaire à celui du substrat, afin d'atteindre un rendement optimal. L'ajout d'un champ de surface avant fournira une protection électrique de la face avant, de telle sorte que la vitesse de recombinaison devienne moins sensible. Nous pouvons voir sur la figure III-17, qu'avec une faible vitesse de recombinaison à la surface, on aura une augmentation dans les valeurs de rendement liée à l'augmentation des niveaux de dopage dans la FSF, et cela est dû aux pertes par absorption. Sur cette couche fortement dopée on dépose une couche antireflet d'oxyde de silicium thermique (SiO_2) qui est un bon candidat dans le cas du dopage avec le bore, étant donné que ce dernier à haute température se diffuse facilement dans la couche d'oxyde. Les couches antireflet en nitrure de silicium ou l'oxyde peuvent améliorer la passivation et par conséquent optimiser les résultats.

3.4.3 Structuration des jonctions arrière dans une cellule IBC

Le montage de la face arrière dans la structure IBC, nécessite l'approfondissement de l'étude sur les dimensions de la jonction dans les cas des IBC classiques et de l'hétérojonction dans le cas de IBC-SiHJ (interface entre le silicium amorphe/silicium cristallin (p/n),(p/p) ou (n/n)) et de la métallisation). L'émetteur doit couvrir une grande partie de la face arrière, entre 70 et 90 % avec un émetteur de largeur inférieure à 50 % la densité de court-circuit J_{cc} diminue [37]. Le parcours des porteurs de charges peut atteindre 1,5 mm pour des longueurs

de diffusion de 600 μm . En cas de substrats de haute qualité, la durée de vie des porteurs minoritaires est de 1 ms ; le parcours peut être aussi grand 3,5 mm [35]. Un processus de fabrication par lithographie nécessite des petites dimensions (quelques micromètres) tandis que dans un processus par sérigraphie, la limite de la hauteur minimale est à quelques 100 micromètres. L'écart entre l'émetteur et le BSF devrait être très bien passivé et d'une largeur aussi petite que possible surtout pour les cellules avec une couverture d'émetteur faible.

Dans la plupart des structures présentées dans la littérature, la hauteur est comprise entre 1,2 et 2 mm et la couverture de l'émetteur de l'ordre de 70 à 80% [38], [39].

Remarque

La structuration des jonctions, pour les cellules IBC se fait principalement à l'aide de la lithographie. En combinaison avec la gravure humide ou en utilisant des masques diélectriques.

3.4.4.Métallisation

La figure III-18 est une représentation schématique de deux niveaux de métallisation

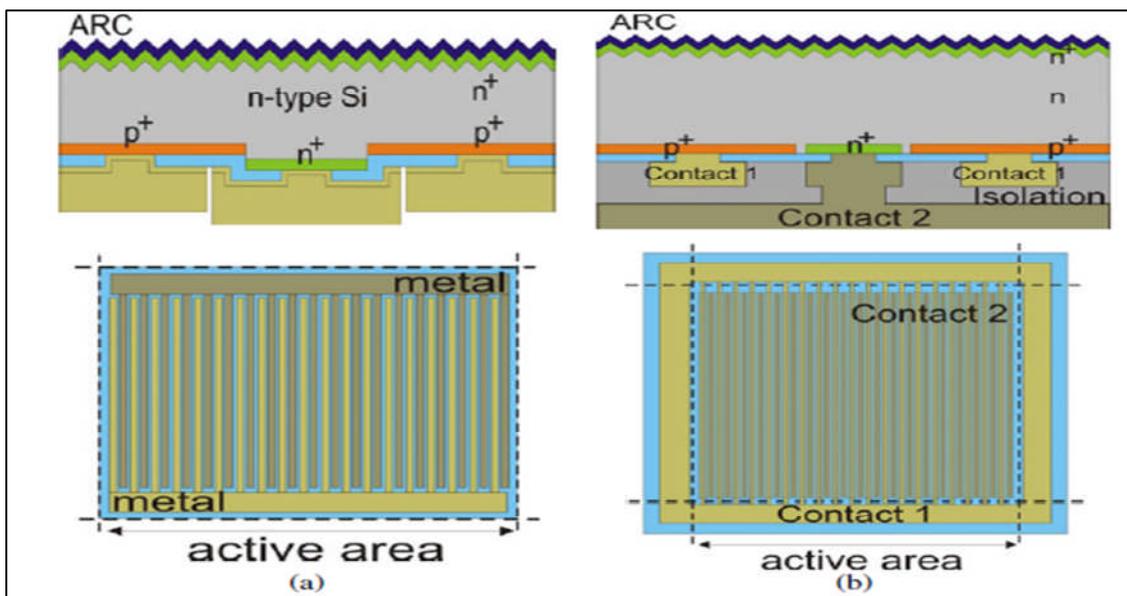


Figure III-18. Schématisation de deux niveaux de métallisation (a) une métallisation niveau 1 et (b) une métallisation niveau 2 pour une cellule IBC [35]

Afin d'assurer une faible vitesse de recombinaison sur la surface arrière de la cellule IBC, la constitution métal/semi-conducteur doit être faite avec précision pour ne pas endommager le silicium et la métallisation qui se réalise par lithographie et par voie humide de gravure chimique. L'emplacement des trous de contact à l'égard des bords des jonctions doit être choisi en tenant compte de la distance des porteurs de charges (doit être minimisé) pour réduire la recombinaison et les pertes résistives.

La résistance d'une ligne de métal (doigt) augmente fortement avec la surface de la cellule. Un large doigt présente l'avantage d'une faible résistance, et avoir une bonne propriété de réflexion à la surface arrière de la cellule solaire. La métallisation doit couvrir l'émetteur et le BSF d'environ 70 à 90 % et doit être séparée par un diélectrique. Ce dernier devrait également être électriquement isolant et sans trou d'épingle [40].

Conclusion

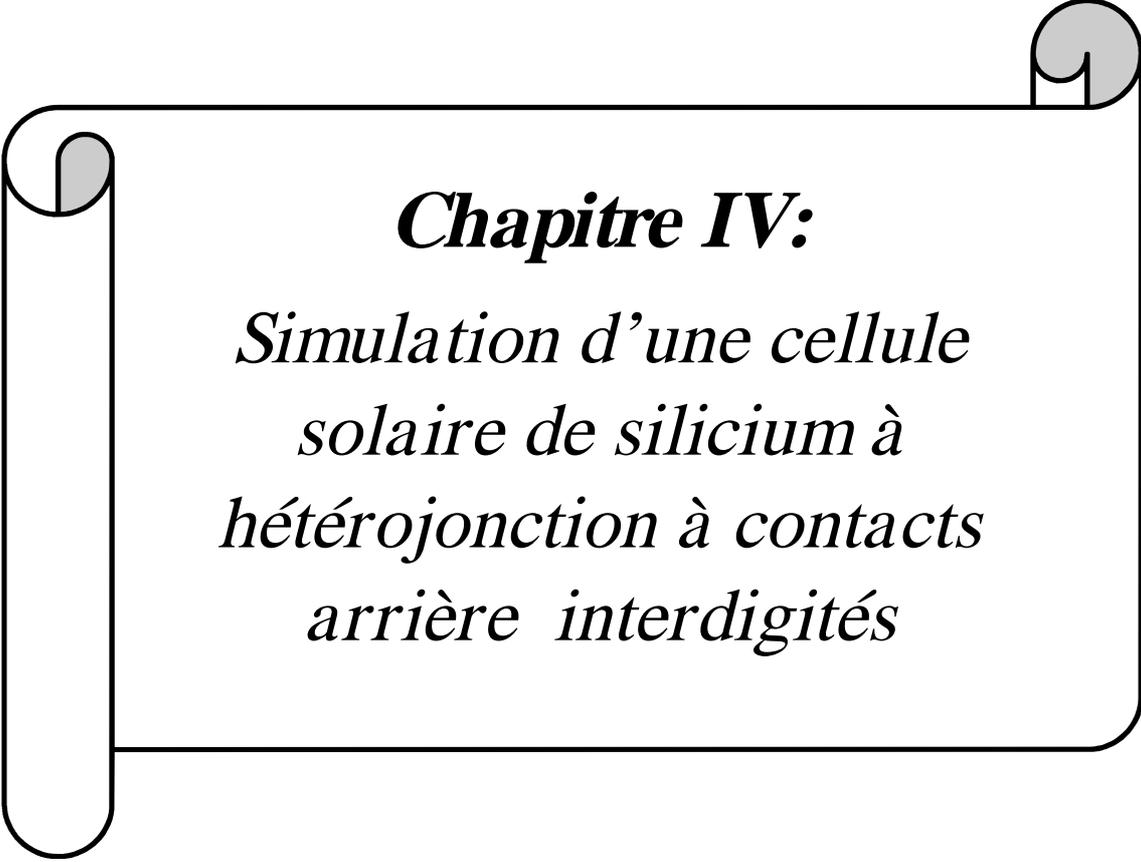
Dans ce chapitre, nous avons abordé les différentes technologies des cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités (IBC classiques et IBC-SiHJ) rapportées dans la littérature. Nous avons montré l'intérêt de cette technologie par la présentation des trois procédés utilisés en ce moment dans l'industrie. Nous avons utilisé premièrement, le même métal pour les contacts à l'émetteur et au substrat, dans le deuxième cas nous avons utilisés deux métaux différents afin de simplifier la procédure de réalisation des cellules à contacts arrière interdigités et le membre de lithographie, troisièmement, nous avons vu le procédé dit auto-aligné qui nécessite qu'une seule lithographie. Ce chapitre donne un aperçu sur les différentes technologies à contacts arrière interdigités et la conception de cellules solaires IBC de silicium. Nous avons proposé une importante quantité de connaissances que ce soit pour les cellules IBC classiques ou pour les IBC à hétérojonction. Nous avons aussi étudié les différents paramètres constituons une cellule IBC. Aussi nous avons constaté à travers les différentes recherches présentées dans la littérature que la face avant d'une cellule à hétérojonction IBC peut être texturée de façon similaire à celles développées en industrie pour les cellules solaires en silicium. La passivation de la face avant, sera à travers un champ de surface avant FSF (réduite de la vitesse de recombinaison). Cette couche de FSF est combinée avec une couche antireflet (nitrure de silicium) ou par l'intermédiaire d'une fine couche unique de silicium amorphe intrinsèque. Pour l'arrière de la cellule IBC, la technologie et la conception des cellules à hétérojonction sont similaires aux cellules IBC classiques dans de nombreux aspects. La qualité de l'interface a-Si/c-Si influe largement sur le rendement de conversion des cellules solaires IBC. Un aspect clé ici, est le dépôt à l'interface, une couche mince de silicium amorphe intrinsèque entre le silicium cristallin (c-Si) et le silicium amorphe. L'optimisation des cellules à hétérojonction à contacts arrière interdigités se fait sur plusieurs niveaux. Dans le chapitre suivant, La simulation intervient pour nous aider à mieux comprendre le fonctionnement des cellules à hétérojonctions à contacts arrière interdigités et à déterminer les conditions indispensables pour atteindre des hauts rendements.

Références Bibliographiques du chapitre III

- [1] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, S.R. Wenham, « **Very High Efficiency Silicon Solar Cells—Science and Technology** ». IEEE TED 46, 1940–1947 (1999).
- [2] S.W. Glunz, « **High-Efficiency Crystalline Silicon Solar Cells. Advances in OptoElectronics** », doi:10.1155/2007/97370, (2007).
- [3] J. Zhao, A. Wang, M.A. Green: « **24.5% efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates** ». Progress in Photovoltaics 7, 471–474 (1999).
- [4] M.A. Green « **The Path to 25% Silicon Solar Cell Efficiency: History of Silicon Cell Evolution** ». Progress in Photovoltaics: Research and Applications 17, 183–189 (2009)
- [5] E. V. Kerschaver, G. Beaucarne: « **Back-contact Solar Cells: A Review. Progress in Photovoltaics** »: Research and Applications 14, 107–123 (2006)
- [6] M. Taguchi, Y. Tsunomura, H. Inoue, al.: « **High efficiency HIT solar cells on thin (< 100 mm) silicon wafer** ». In: Proceedings of the 24th European PVSEC, Hamburg, pp. 1690–1693 (2009).
- [7] P. Verlinden, , F. Wiele, G. Stehelin, F. Floret, J.P. David: « **High efficiency interdigitated back contact solar cells** ». In: Proceedings of the IEEE PVSC, Orlando, pp. 405–410 (1987).
- [8] R.R. King « **Studies of oxide-passivated emitters in silicon and applications to solar cells** ». PhD thesis Stanford University (1990).
- [9] P.J. Cousins, D.D. Smith, H.C. Luan, al.: « **Generation 3: improved performance at lower cost** ». In: 35th IEEE PVSEC, Hawaii (2010).
- [10] E. Niels, P. Posthuma, Barry J. O’Sullivan, I. Gordon. I. Belgium. « **Technology and Design of Classical and Heterojunction Back Contacted Silicon Solar Cells**» chapter 16 in “Physics and technology of amorphous-crystalline heterostructure silicon solar cells”, page 525, ISBN 978-3-642-22274-0, e-ISBN 978-3-642-22275-7, DOI 10.1007/978-3-642-22275-7 Engineering Materials ISSN 1612-1317, Library of Congress Control Number: 2011934499, (Springer 2012).
- [11] P. Engelhart, N.P. Harder, R. Grischke, al.: « **Laser Structuring for Back Junction Silicon Solar Cells** ». Progress in Photovoltaics: Research and Applications 15, 237–243 (2007).
- [12] F. Granek, M. Hermle, D. Huljić, al.: « **Enhanced lateral current transport via the front n+ diffused layer of n-type high-efficiency back-junction back-contact silicon solar cells** ». Progress in Photovoltaics: Research and Applications 17, 47–56 (2009).
- [13] K. Nakamura, M. Kohira, Y. Abiko, al.: « **Development of back contact Si solar cell and module in pilot production line** ». In: Proceedings of the 23rd EU-PVSEC, Valencia, pp. 1006–1009 (2008).
- [14] J. Guo, J.E. Cotter, K.R. McIntosh, al.: « **Edge passivation for small-area, high efficiency solar cells** ». In: Proceedings of the 22nd EU-PVSEC, Milan, pp. 1348–1351 (2007).
- [15] Y. Veschetti « **Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince** », Thèse de doctorat de l’Université Louis Pasteur Strasbourg. (Octobre 2005).
- [16] N. Oleksiy « **Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités** », Thèse de doctorat de l’Institut National des Sciences Appliquées à Lyon, (Mai 2005).
- [17] R.A. Sinton, R.M. Swanson. « **Simplified Backside, Contact Solar Cells.** » IEEE. Trans. Electron. Dev. Vol 37 pp.348-352, (1990).

- [18] J.G. Fossum, A. Neugroschel, F.A. Lindholm, «**A Unifying Study of Tandem-Junction, Front-Surface-Field, and Interdigitated Back Contact Solar Cells** », (1980).
- [19] M. Lu, S. Bowden, U. Das, R. Birkmore, «**Interdigitated back contact silicon heterojunction solar cell and the effect of front surface passivation** ». Applied Physics Letters 91, 063507 (2007).
- [20] T. Desrues, P.-J. Ribeyron, A. Vandeneynde, , A.-S. Ozanne, al.: «**Progress in contacting a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells and its application to interdigitated back contact structure** ». In: Proceedings of the 24th EU-PVSEC, Hamburg, pp. 2202–2205 (2009).
- [21] T. Desrues, F. Souche, A. Vandeneynde, al.: «**Emitter optimization for interdigitated back contact (IBC)** ». In: Proceedings of the 25th EU-PVSEC, Valencia, pp. 2374–2377 (2010).
- [22] M. Tucci, , L. Serenelli, E. Salza, al.: «**Behind (Back Enhanced Heterostructure With Interdigitated Contact) Solar Cell** ». In: Proceedings of the 23rd EU-PVSEC, Valencia, pp. 1749–1752 (2008).
- [23] R. Stangl, J. Haschke, M. Bivour, L. Korte, M. Schmidt, K. Lips, B. Rech: «**Planar rear emitter back contact silicon heterojunction solar cells** ». Solar Energy Materials & Solar Cells 93, 1900–1903 (2009).
- [24] R. Stangl, J. Haschke, M. Bivour, M. Schmidt, K. Lips, B. Rech, «**Planar rear emitter back contact Amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells (RECASH / PRECASH)** ». In: Proceedings of the 33rd IEEE PVSC, San Diego, pp. 1–6 (2008)
- [25] A. Hertanto, H. Liu, D. Yeghikyan, B.G. Rayaprol, N.P. Kherani, S. Zukotynski: «**Back Amorphous-Crystalline Silicon Heterojunction (BACH) Photovoltaic Device** ». In: Proceedings of the 34rd IEEE PVSC, Philadelphia, pp. 1767–1770 (2009).
- [26] B.J. O’Sullivan, T. Bearda, Y. Qiu, J. Robblein, C. Gong, N.E. Posthuma, I. Gordon, J. Poortmans «**Interdigitated rear contact solar cells with amorphous silicon heterojunction emitter** ». In: Proceedings of the 35rd IEEE PVSC, Honolulu, pp. 3549–3552 (2010).
- [27] D. Diouf, «**Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière** ».Thèse de Doctorat ,Université de paris-sud, (2010).
- [28] M. Lu, S. Bowden and R. Birkmire, Appl. Phys. Lett. 91, 063507 (2007).
- [29] M. Tucci, L. Serenelli, E. Salza, S. De Iuliis, L.J. Geerligs, D. Caputo, M. eccarelli, G.de Cesare, J. Non-Cryst. Solids 354, 2386 (2008).
- [30] R. Stangl, J. Haschke, M. Bivour, L. Korte, M. Schmidt, K. Lips, B. Rech, Proc. of the 33rd IEEE PVSC, San Diego, (2008).
- [31] A. Hertanto *et al.*, Proc. of the 34th IEEE PVSC, 1767 (2009).
- [32] N. Posthuma, Communications au workshop HETSI, Utrecht (Février 2010).
- [33] H. Sakata, Y. Tsunomura, H. Inoue, «**R&D progress of next-generation very thin HIT solar cells** ». In: Proceedings of the 25th EU-PVSEC, Valencia, pp. 1102–1105 (2010)
- [34] S. Ray, S. Hazra, «**Preparation of high and low bandgap amorphous silicon by PECVD and their application in solar cell** ». In: Proceedings of the 25th IEEE PVSC, Crystal City, pp. 1077–1080 (1996)
- [36] F. Granek, C. Reichel, , M. Hermle, al.: «**Front surface passivation of n-type high efficiency back-junction silicon solar cells using front surface field** ». In: Proceedings of the 23rd EU-PVSEC, Milan, pp. 1262–1265 (2007).
- [37] M. Hermle, «**Analyse neuartiger Silizium- und III-VSolarzellenmittels Simulation und Experiment** ». PhD thesis Universität Konstanz/Fraunhofer ISE (2008)

- [38] U.S. Patent: « **Solar cell and method of manufacture** », Sunpower Corporation, US, 7, 339,110 B1 (2008).
- [39] D.M. Huljić, M. Zerres, A. Mohr et al.: « **Development of a 21% back-contact monocrystalline solar cell for large-scale production** ». In: Proceedings of the 21st EUPVSEC, Dresden, pp. 765–768 (2006).
- [40] K. Nakamura, M. Kohira, , Y. Abiko, al.: « **Development of back contact Si solar cell and module in pilot production line** ». In: Proceedings of the 23rd EU-PVSEC, Valencia, pp. 1006–1009 (2008).



Chapitre IV:

*Simulation d'une cellule
solaire de silicium à
hétérojonction à contacts
arrière interdigités*

Chapitre IV. Simulation des cellules photovoltaïques à hétérojonction à contacts arrière interdigités

Introduction

L'optimisation du rendement des cellules solaires à hétérojonction à contacts arrière interdigités IBC-SiHJ possédant les contacts sur la face opposée à l'incidence du rayonnement, dépend de plusieurs paramètres. Ces paramètres, sont liés souvent à la qualité du matériau (substrat {durée de vie, mobilité}, contacts ohmiques et à la vitesse de recombinaison en faces avant et arrière) aussi à la géométrie de la structure plus précisément sur :

- Les dimensions géométriques de la structure élémentaire (pitch)
- Les dimensions géométriques des contacts (largeur et épaisseur de l'émetteur et du BSF)
- Le « Gap » est la zone entre les contacts, émetteur et BSF
- Largeur et épaisseur du substrat
- Les niveaux de dopage dans le substrat, émetteur et BSF) ;
- Le taux de recombinaison pour les faces avant et arrière, durée de vie des porteurs minoritaires dans le substrat)
- Les coefficients de réflexion pour les faces avant et arrière.

Nous avons étudié l'influence de ces différents paramètres cités auparavant sur les performances d'une cellule solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigités (IBC-SiHJ). Chacune de ces grandeurs constitue une partie de ce chapitre où nous allons détailler, nos résultats, nos hypothèses et nos conclusions.

Pour étudier l'influence d'un paramètre donné, on varie sa valeur tout en fixant toutes les autres et pour chaque variation de ce paramètre donné, on génère la caractéristique de sortie courant-tension $I(V)$, sous illumination AM1.5, afin d'extraire, la tension en circuit ouvert V_{co} , la densité de courant de court-circuit J_{cc} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η de la cellule.

Dans le cadre de ce travail, la modélisation numérique (Atlas /Silvaco deux dimensions (2D)) a été largement utilisée. Un logiciel de simulation pour plusieurs dispositifs permet la simulation électrique, optique, en plus d'une résolution bien précise des défauts au niveau des interfaces grâce à la méthode des éléments finis. [1]

Nous présenterons d'abord les différents modèles physiques utilisés pour la simulation d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction à contacts arrière interdigités IBC-SiHJ. Ensuite nous décrirons la structure géométrique à étudier. Après, nous présenterons un résumé du logiciel de simulation Silvaco. Enfin et à l'aide des résultats de simulation, les critères d'optimisation de cette géométrie seront déterminés afin de maximiser le rendement de conversion de la cellule étudiée.

1. Equations fondamentales et modèles physiques utilisés pour la simulation sous Atlas /Silvaco

1.1 Equations fondamentales

La simulation est fondée sur la résolution numérique des trois équations fondamentales de transport de charges dans un semi-conducteur (équation de Continuité, équation de Poisson et la statistique de Boltzmann (pour les concentrations des porteurs)). Le simulateur estime numériquement une résolution de ces équations à chaque nœud du maillage de la structure solaire à étudier.

1.1.1 Equations de continuités

C'est la dérivée de la variation des concentrations des charges libres (électrons-trous) en fonction du temps. Cette variation est due :

- Aux générations-recombinaisons internes.
- A la présence des courants de conduction et de diffusion dus au phénomène de transport.

L'équation de continuité s'exprime par :

- Cas des électrons :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \quad (\text{IV-1})$$

- Cas des trous :

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad (\text{IV-2})$$

G_n : Taux de génération pour les électrons.

G_p : Taux de génération pour les trous.

R_n : Taux de recombinaisons internes pour les électrons.

R_p : Taux de recombinaisons internes pour les trous.

J_n : La densité de courant des électrons

J_p : La densité de courant des trous.

1.1.2 Equation de poisson

L'équation de poisson s'exprime par :

$$\text{div}(\epsilon \nabla \psi) = \rho \quad (\text{IV-3})$$

Or

$$\nabla \epsilon \cdot \nabla \psi = -q(p - n + N_{D^+} - N_{A^-}) \quad (\text{IV-4})$$

Ou

ψ : Le potentiel électrostatique.

ϵ : La permittivité avec ($\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$)

ϵ_0 : La permittivité du vide.

ϵ_r : La permittivité relative du matériau.

ρ : La densité volumique.

q : La charge électronique élémentaire

n : Concentration des électrons

p : Concentration des trous

N_D^+ : Le nombre d'impuretés ionisées des donneurs

N_A^- : Le nombre d'impuretés ionisées des accepteurs.

Notons aussi que le champ électrique est donné par la relation :

$$E = - \text{grad}(\psi) \quad (\text{IV-5})$$

1.1.3 Equation de transport

Les densités des porteurs sont calculées par le modèle de Dérive-Diffusion (modèle isothermique de transport). Ce modèle est basé sur l'expression des densités de courants :

$$j_n = -pq\mu_n \nabla \Phi_n \quad (\text{IV-6})$$

$$j_p = -pq\mu_p \nabla \Phi_p \quad (\text{IV-7})$$

Avec

μ_n : La mobilité des électrons.

μ_p : La mobilité des trous.

Φ_n et Φ_p représentent les quasi-niveaux de Fermi.

1.1.3.1 Diffusion

La présence d'une concentration non uniforme des électrons ou des trous dans le semiconducteur génère un courant de diffusion : le passage des charges d'une zone de concentration élevée vers une zone de faible concentration. Ce phénomène de diffusion est

décrit par la première loi de Fick [2] basée sur la proportionnalité entre le flux de particules \vec{F} et le gradient de leur concentration $\vec{\nabla}C$ selon la relation :

$$\vec{F} = -D \cdot \vec{\nabla}C \quad (\text{IV-8})$$

D : Le coefficient de diffusion.

- Pour les électrons (C=n, D=Dn) :

$$\vec{F} = -D_n \cdot \vec{\nabla}n \quad (\text{IV-9})$$

- Pour les trous (C=p, D=Dp) :

$$\vec{F} = -D_p \cdot \vec{\nabla}p \quad (\text{IV-10})$$

Nous trouvons les densités des courants de diffusion :

$$J_{n,diff} = -q\vec{F}_n = qD_n \nabla_n \quad (\text{IV-11})$$

$$J_{p,diff} = -q\vec{F}_p = qD_p \nabla_p \quad (\text{IV-12})$$

1.1.3.2 Drift

La présence d'un champ électrique accélère la vitesse des porteurs de charges libres entre deux collisions suivant la direction du champ.

La vitesse est donnée par :

- Cas des électrons :

$$\vec{v}_n = -\mu_n \cdot \vec{E} \quad (\text{IV-13})$$

- Cas des trous

$$\vec{v}_p = -\mu_p \cdot \vec{E} \quad (\text{IV-14})$$

Le courant de drift est donné par :

$$\vec{J}_{n,Dr} = -qn\vec{v}_n \quad (\text{IV-15})$$

$$\vec{J}_{p,Dr} = -qp\vec{v}_p \quad (\text{IV-16})$$

2. Modèles physiques utilisés pour la simulation sous Atlas/ Silvaco

Aussi l'exactitude des simulations numériques dérive du choix des modèles physique suivants :

2.1 Modèle de recombinaison Shockley-Read-Hall

C'est la recombinaison de porteurs en excès via les niveaux énergétiques dans la bande interdite du semiconducteur (niveaux appelés pièges, due à certains défauts

cristallographiques ou impuretés présents dans le matériau). Une description de ce mécanisme est schématisée sur la figure IV-1.

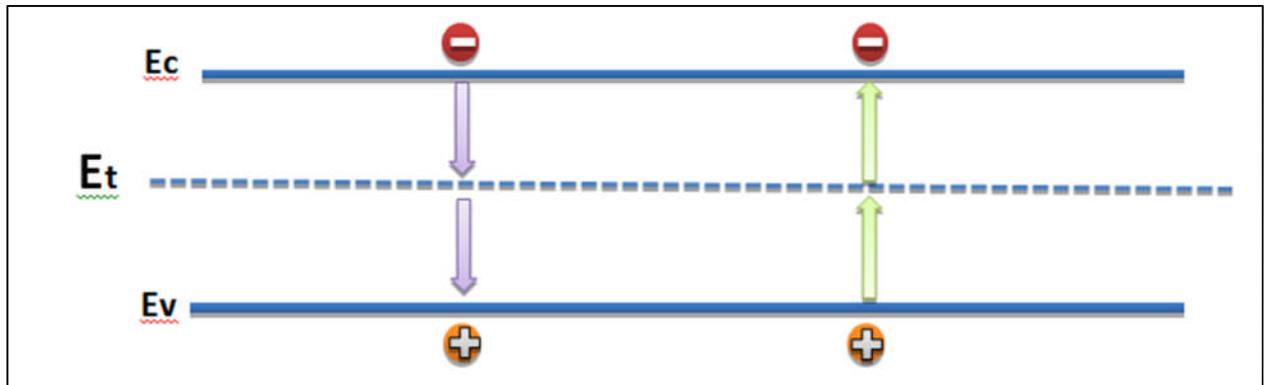


Figure IV-1. Principe de base de la recombinaison Schokley-Read-Hall (SRH)

Conformément à la théorie de Shockley Read Hall, l'expression IV-17 donne le nombre de porteurs recombinés par 1cm^3 pendant une seconde. [3],[4]

$$U_{\text{SRH}} = \frac{\sigma_p \sigma_n v_{\text{th}} (pn - n_i^2) N_t}{\sigma_n [n + n_i \exp(\frac{E_t - E_i}{kT})] + \sigma_p [p + n_i \exp(\frac{E_i - E_t}{kT})]} \quad (\text{IV-17})$$

Avec

$$v_{\text{th}} = \sqrt{\frac{3kT}{m^*}} \quad (\text{IV-18})$$

Où

σ_n : Sections de capture efficace pour les trous.

σ_p : Sections de capture efficace pour les électrons.

E_t : Position énergétique des états de piège.

N_t : La concentration des états de piège.

n_i : La concentration intrinsèque.

E_i : Le niveau de Fermi dans le semi-conducteur intrinsèque.

v_{th} : La vitesse thermique des porteurs.

m^* : La masse effective.

k : Constant de boltzmann.

T : La température à l'équilibre thermodynamique.

Dans Silvaco l'équation (IV-18) s'adapte aussi sous la forme suivante :

$$R_{\text{SRH}} = \frac{np - n_{i,\text{eff}}^2}{\tau_{\text{aup}}(n + n_1) + \tau_{\text{aun}}(p + p_1)} \quad (\text{IV-19})$$

Où n_1 et p_1 sont donnés par la statistique de Fermi pour le niveau d'énergie du piège considéré :

$$n_1 = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_t}{kT}\right) \quad (IV-20)$$

$$P_1 = n_i \cdot \exp\left(\frac{-E_t}{kT}\right) \quad (IV-21)$$

Le tableau IV-1 Représente les paramètres par défaut du modèle de recombinaison Schokley-Read-Hall utilisées dans le logiciel Silvaco.

Tableau IV-1 Paramètres par défaut du modèle de recombinaison Shockley Read Hall dans Silvaco.

(Et-Ei)(eV)	Taun0 (ms)	Taup0 (ms)
0.0	1	1

La dépendance de la durée de vie du modèle Schokley-Read-Hall –SRH avec la température est donnée par les deux Relations de Klaassen's [5]:

$$\frac{1}{\text{Tauno}} = \left(\frac{1}{\text{Tauksrbn}} + C_{\text{ksrbn}} \cdot N \right) \cdot \left(\frac{300}{T_L} \right)^{G_{\text{ksrbn}}} \quad (IV-22)$$

$$\frac{1}{\text{Taup0}} = \left(\frac{1}{\text{Tauksrbp}} + C_{\text{ksrbp}} \cdot N \right) \cdot \left(\frac{300}{T_L} \right)^{G_{\text{ksrbp}}} \quad (IV-23)$$

Avec

Taun0 : La durée de vie des porteurs minoritaires (électrons).

Taup0 : La durée de vie des porteurs minoritaires (trous).

N : La concentration totale d'impuretés.

Concernant les autres paramètres des relations, (IV-20) et (IV-21) ils seront définis par défaut dans le tableau IV-2.

Tableau IV-2 : Paramètres par défaut des équations (IV-22) et (IV-23) dans Silvaco [6].

Tableau IV-2. Paramètres par défaut du modèle de recombinaison Shockley Read Hall dans Silvaco.

Tauksbn ⁻¹ (ms)	Tauksbp ⁻¹ (ms)	Cksbn(cm ³ /s)	Cksbp(cm ³ /s)	Gksbn	Gksbn
2.5	2.5	0.3*10 ⁻¹²	1.176*10 ⁻¹²	1.77	0.57

La dépendance de la durée de vie avec le dopage est donnée par la relation de Schafetter : [7],[8]

$$\text{Tau}_{\text{dop}}(N_i) = \text{Tau}_{\text{min}} + \frac{\text{Tau}_{\text{max}} - \text{Tau}_{\text{min}}}{1 + \left(\frac{N_i}{N_{\text{ref}}}\right)^\gamma} \quad (IV-24)$$

Où

τ_{\max} : Valeur maximale de la durée de vie.

τ_{\min} : Valeur minimale de la durée de vie.

γ : L'exposant.

N_{ref} : Le niveau de référence du dopage pour lequel.

$$\tau(N_{\text{ref}}) = (\tau_{\max} + \tau_{\min}) / 2 \quad (\text{IV-25})$$

Le tableau IV-3 représente les paramètres par défaut utilisés dans Silvaco :

Tableau IV-3. Paramètres par défaut du modèle de recombinaison Shockley-Read-Hall dans Silvaco

	$\tau_{\max}(\text{s})$	$\tau_{\max}(\text{s})$	$N_{\text{ref}}(\text{cm}^{-3})$	$E_t(\text{eV})$	$n_i(\text{cm}^{-3})$	Γ
Electron	$10 \cdot 10^{-6}$	0	$1 \cdot 10^{16}$	0	$1 \cdot 10^{10}$	1
Trous	$3 \cdot 10^{-6}$	0	$1 \cdot 10^{16}$	0	$1 \cdot 10^{10}$	1

2.2 Modèle de recombinaison Auger

La recombinaison Auger est la transmission de l'énergie d'une paire électron ou trou à une autre charge libre. Une description de ce mécanisme est schématisée sur la figure IV.2

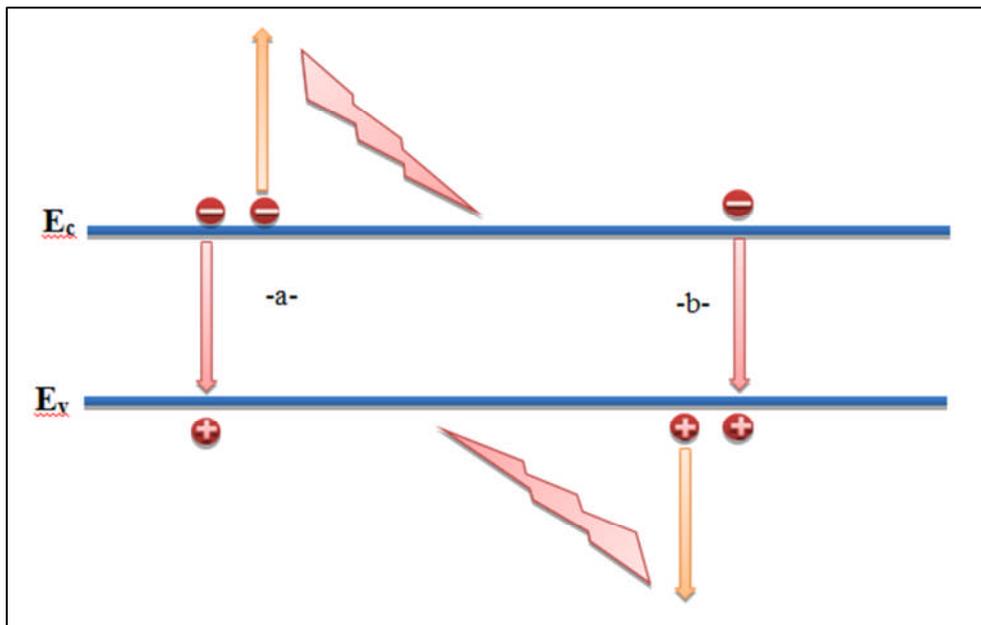


Figure IV-2. Mécanisme de recombinaison Auger. L'excès d'énergie issu de la recombinaison peut être transféré à un électron -a- ou à un trou -b-

Le taux de recombinaison Auger est donné par les relations suivantes [9]

$$R_A = C_{A,n}(pn^2 - n_i^2) + C_{A,p}(np^2 - p_i^2) \quad (\text{IV-26})$$

C_n : coefficient Auger pour les électrons

C_p : coefficient Auger pour les trous

$$C_n = \left(A_{A,n} + B_{A,n} \frac{T}{T_0} + C_{A,n} \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 \right) \cdot \left(1 + H_{A,n} \exp\left(-\frac{n}{N_{0,n}}\right) \right) \quad (IV-27)$$

$$C_p = \left(A_{A,p} + B_{A,p} \frac{T}{T_0} + C_{A,p} \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 \right) \cdot \left(1 + H_{A,p} \exp\left(-\frac{n}{N_{0,p}}\right) \right) \quad (IV-28)$$

Les coefficients $A_{A,n}, B_{A,n}, C_{A,n}, A_{A,p}, B_{A,p}, C_{A,p}, H_{A,n}, H_{A,p}, N_{0,n}$ et $N_{0,p}$ décrivent empiriquement la dépendance des coefficients Auger en fonction de la température et du niveau de dopage [10][11].

Les valeurs par défaut de ces coefficients sont données dans le tableau IV-4:

Tableau IV-4 Paramètres par défaut du modèle de recombinaison Auger dans Silvaco

	A_A [cm ⁶ /s]	B_A [cm ⁶ /s]	C_A [cm ⁶ /s]	H_A [1]	T_0 [K]	T [K]	N_0 [cm ⁻³]
Electrons	$6.7 \cdot 10^{-32}$	$2.45 \cdot 10^{-32}$	$8.3 \cdot 10^{-32}$	3.46	300	300	$1 \cdot 10^{18}$
Trous	$7.2 \cdot 10^{-32}$	$4.5 \cdot 10^{-32}$	$8.3 \cdot 10^{-32}$	8.25	300	300	$1 \cdot 10^{18}$

Le mécanisme de la recombinaison Auger devient prépondérant dans les semiconducteurs fortement dopés (fortes injections). Ainsi, la recombinaison Auger est l'une des causes principales des pertes par recombinaison pour les cellules photovoltaïques si la puissance de la lumière dépasse 200 W/cm² [12].

2.3 Modèle de recombinaison en surface

Le principe de la recombinaison en surface est schématisé sur la figure IV-3

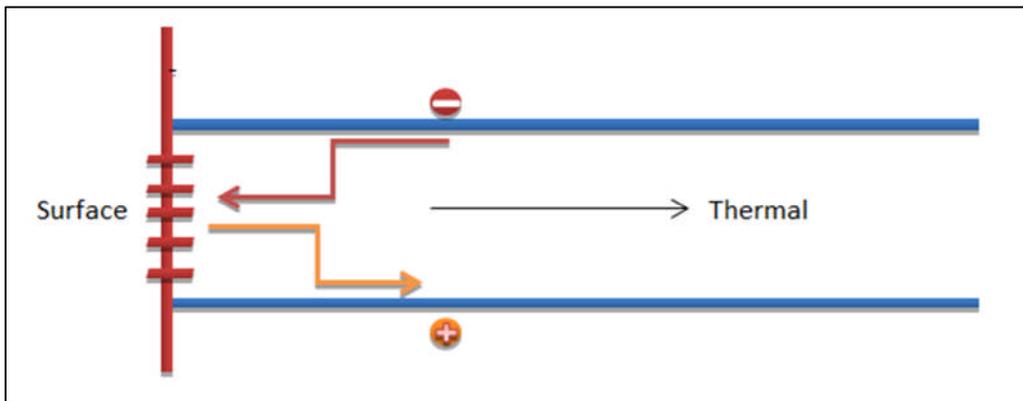


Figure IV-3. Mécanisme de recombinaison en surface

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

$$R_{\text{surf}}^{\text{SRH}} = \frac{np - n_i^2}{\frac{(n+n_1)}{s_n} + \frac{(p+p_1)}{s_p}} \quad (IV-29)$$

S_p : La vitesse de recombinaison en surface pour les trous.

S_n : La vitesse de recombinaison en surface pour les électrons.

Par défaut $S_n=S_p=10^3$ cm/s.

2.4 Modèle de Masetti (Mobilité des porteurs dépendant du dopage)

L'augmentation du dopage dans un semiconducteur a pour effet de diminuer la mobilité des charges libres (dislocation des porteurs par collision avec les impuretés fixes). Le modèle de Masetti nous permet de calculer la mobilité des trous et des électrons en tenant compte de cette dégradation.

L'expression de la mobilité est donnée par

$$\mu_{\text{dop}} = \mu_{\text{min1}} \exp\left(-\frac{P_c}{N_i}\right) + \frac{\mu_L - \mu_{\text{min2}}}{1 + \left(\frac{N_i}{C_r}\right)^\alpha} - \frac{\mu_1}{1 - \left(\frac{C_s}{N_i}\right)^\beta} \quad (\text{IV-30})$$

Avec :

$$N_i = N_A + N_D \quad (\text{IV-31})$$

Où

N_i : la concentration totale des impuretés ionisées.

μ_L : la mobilité qui tient compte de l'interaction électrons-phonons.

μ_{min1} , μ_{min2} et μ_1 : sont les mobilités de référence.

P_c , C_s et C_r sont les niveaux de référence du dopage.

α et β sont des coefficients de l'exposant [13].

Le tableau IV-5 présente les paramètres utilisés par défaut dans Silvaco pour le modèle de Masetti.

Tableau IV-5 : paramètres utilisés par défaut dans Silvaco pour le modèle Masetti en introduisant le phosphore dans le silicium

μ_{min1} cm ² /(Vs)	μ_{min2} cm ² /(Vs)	μ_{max} cm ² /(Vs)	μ_1 cm ² /(Vs)	P_c cm ⁻³	C_r cm ⁻³	C_s cm ⁻³	A	B
68.5	68.5	1414	56.1	0.0	$9.2 \cdot 10^{16}$	$3.41 \cdot 10^{20}$	0.711	1.98

2.5 Modèle de Canali (saturation de la vitesse des porteurs dans le champ électrique)

La dégradation de la mobilité dans un fort champ électrique est décrite par le modèle de Canali [14]:

$$\mu(F) = \frac{\mu_{\text{low}}}{\left[1 + \left(\frac{\mu_{\text{low}} F}{v_{\text{sat}}}\right)^\beta\right]^{1/\beta}} \quad (\text{IV-32})$$

Avec :

$$\vec{F} = \vec{E} \left(\frac{J}{|J|} \right) \quad (IV-33)$$

Où

F : Le champ électrique d'entraînement.

μ_{low} : La mobilité dans un faible champ électrique (voir la formule d IV-32).

V_{sat} : La vitesse de saturation

β : Est le coefficient de l'exposant.

Le tableau IV-6 indique les paramètres utilisés par défaut dans Silvaco pour le modèle de Canali :

Tableau IV-6. Paramètres utilisés par défaut dans Silvaco pour le modèle de Canali.

	$V_{sat}(cm/s)$	B
Electrons	$1.07*10^7$	1.109
Trous	$8.37*10^7$	1.213

2.6 Modèle de BGN- réduction de la bande interdite (Bandgap-Narrowing)

Le mécanisme qui traite les limites des bandes d'énergies sont dues à l'interaction des atomes donneurs avec les charges libres. Ces interactions provoquent un accroissement du niveau initialement discret des impuretés, ce qui conduit à un rassemblement des bandes d'énergies des impuretés ionisées en excès avec la bande la plus voisine (la bande de conduction pour un dopage type n et la bande de valence pour un dopage type p).

Pour les semi-conducteurs fortement dopés, le modèle de BGN se présente selon trois cas [15][16].

Avec l'augmentation de la concentration des impuretés (donneurs), les niveaux énergétiques de ces impuretés s'allongent en une bande d'impuretés qui chevauche avec la bande de conduction.

- Les limites des bandes de valence et de conduction développent des queues et entrent dans la bande interdite.
- Une concentration d'atomes donneurs très excitée provoque une modification spatiale de la largeur de la bande interdite, et par conséquent d'une détérioration du réseau cristallin.

Ce phénomène est connu sous le nom de «*Bandgap-Narrowing*».

Avec Silvaco, cet effet est adapté grâce au modèle de Bennett-Wilson. La formule de Bennett-Wilson est donnée par l'équation IV-34 [17].

$$\Delta E_G(N) = \begin{cases} -E_{bgn} \left[\log \left(\frac{N}{N_{bgn}} \right) \right]^2 & \text{si } N \geq N_{bgn} \\ 0 & \text{si } N < N_{bgn} \end{cases} \quad (IV-34)$$

Ou:

ΔE_G : La diminution de la bande interdite,

E_{bgn} : Paramètre du matériau qui caractérise la variation du gap,

N_{bgn} : Le niveau de référence du dopage.

Le tableau IV-7 représente les paramètres utilisés par défaut de modèles de Bennett-Wilson pour le silicium.

Tableau IV-7 : Paramètres utilisés par défaut dans Silvaco pour les modèles de Bennett-Wilson

Modèle	$E_{bgn}(\text{cm}^{-3})$	$N_{bgn}(\text{cm}^{-3})$
Bennett-Wilson	$6.84 \cdot 10^{-3}$	$3.162 \cdot 10^{18}$

2.7 Les modèles optiques

Les modèles optiques utilisant des valeurs correspondant à un spectre solaire AM1.5, permet de simuler les effets optiques dans la structure comme la réflexion, l'absorption et le passage de la lumière à travers les interfaces.

Le calcul des coefficients de réflexion et de transmission de la lumière au niveau des interfaces utilise des matrices de transfert dont le coefficient Z_j calculé à partir de l'indice de réfraction n_j , de la couche j et de l'angle d'incidence de la lumière θ_j . Les équations sont :

- Pour une lumière longitudinale

$$Z_j = n_j \cdot \cos \theta_j \quad (IV-35)$$

- Pour une lumière transversale

$$Z_j = n_j / \cos \theta_j \quad (IV-36)$$

Avec ces coefficients optiques, on peut donner la matrice de transfert suivante :

$$T_{j,j+1} = \frac{1}{2 \cdot Z_j} \begin{bmatrix} Z_j + Z_{j+1} & Z_j - Z_{j+1} \\ Z_j - Z_{j+1} & Z_j + Z_{j+1} \end{bmatrix} \quad (IV-37)$$

La propagation du rayonnement lumineux dans la couche j est donnée par la matrice

$$T_j(d_j) = \begin{bmatrix} \exp\left(2. \pi. i. n_j \cos \frac{\theta_j. d_j}{\lambda}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-2. \pi. i. n_j \cos \frac{\theta_j. d_j}{\lambda}\right) \end{bmatrix} \quad (IV-38)$$

Avec ces matrices, nous pouvons calculer les intensités transmises et réfléchies à travers une succession des couches. Finalement, et à l'aide de ces intensités, le taux de génération optique dans la structure solaire est calculé avec la formule suivante :

$$G_0^{opt} = \alpha * \eta * \frac{I(d)}{h.w} \quad (IV-39)$$

α : Coefficient d'absorption.

RQE : Rendement quantique.

$I(d)$: L'intensité à la profondeur d.

$h\omega$: L'énergie photonique.

3. Simulation numérique d'une cellule solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigités sous Atlas/Silvaco

3.1 Structure simulée

La simulation numérique de la structure photovoltaïque étudiée a été effectuée par l'utilisation de logiciel Atlas/Silvaco. Les paramètres sont choisis de façon à être plus proches de ceux des cellules technologiquement réalisables. Les cellules solaires à hétérojonction à contacts arrière interdigités étant de structure périodique (voir figure IV-4), c'est pourquoi, nous n'avons simulé qu'une partie élémentaire représentée sur la figure IV-5 et non pas toute la structure.

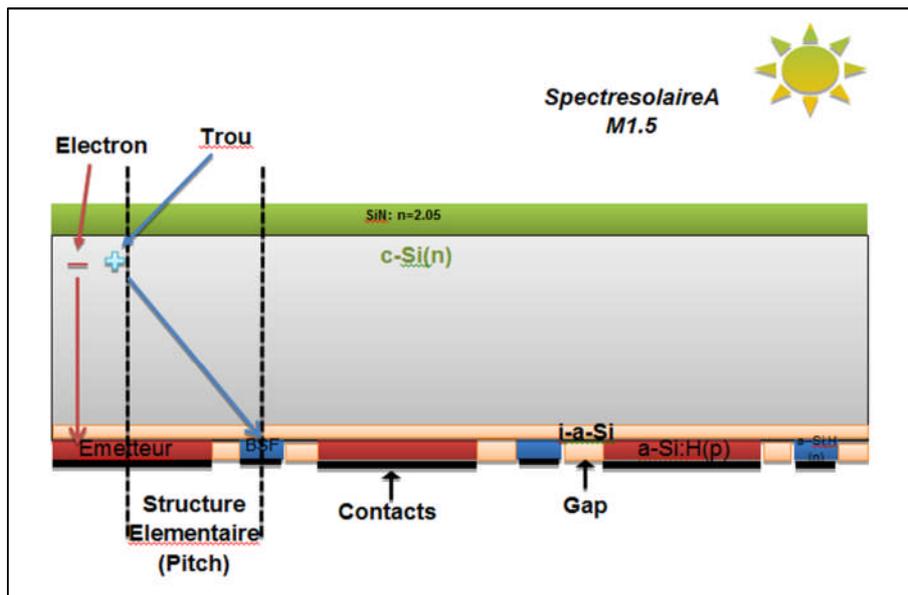


Figure IV-4. Structure d'une cellule solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigités avec couche intrinsèque

Nous avons représenté sur la figure IV-5 une partie de la cellule solaire à hétérojonction à contacts arrières interdigués, dite cellule élémentaire ou cellule de référence, celle qui sera optimisée au cours de la simulation. Pour étudier l'influence des différents paramètres, on fait varier un paramètre donné tout en maintenant les autres fixes. Puis on génère la caractéristique de sortie courant-tension $I(V)$, sous illumination AM1.5, afin d'extraire la tension en circuit ouvert V_{co} , la densité de courant de court-circuit J_{cc} , le facteur de forme FF et rendement de conversion électrique η de la cellule.

Ainsi, plusieurs paramètres sont retenus :

- Les dimensions géométriques de la structure élémentaire (pitch).
- Les dimensions géométriques des contacts (largeur de l'émetteur et du BSF).
- La zone entre les contacts, l'émetteur et le BSF (gap).
- L'épaisseur du substrat.
- Les niveaux de dopage (substrat, émetteur, BSF).
- Le taux de recombinaison pour les faces avant et arrière, durée de vie des porteurs minoritaires).
- Les coefficients de réflexion pour les faces avant et arrière.

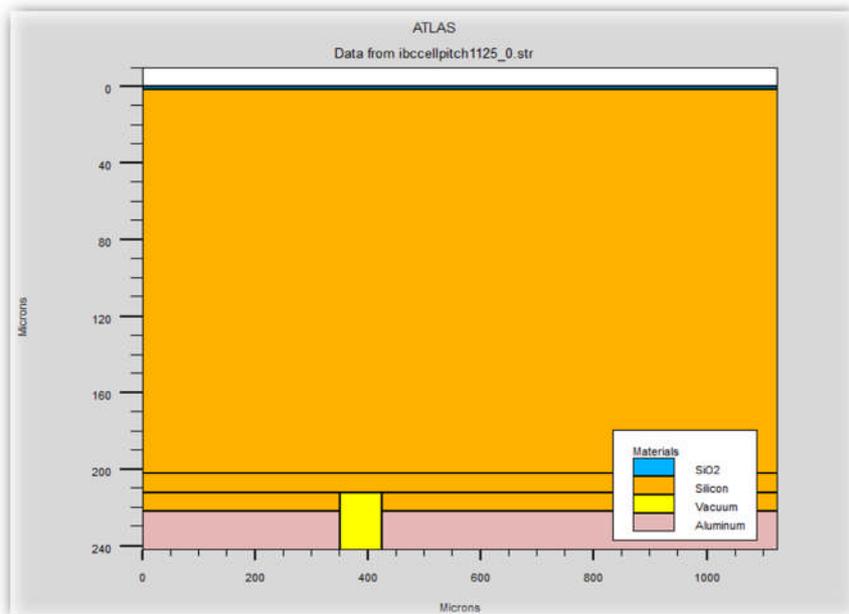


Figure IV-5. Structure de référence IBC-SiHJ avec couche intrinsèque simulée sous Silvaco/Atlas.

3.2 Paramètre de la structure simulée (cellule de référence)

Les paramètres de la cellule de référence sont présentés sur le tableau IV-8:

Tableau IV-8. Paramètres de la cellule de référence

Substrat	
Largeur de la structure	1125 μ m
Epaisseur	200 μ m
Dopage	$N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$
Profil du dopage	Uniforme
Vitesse de recombinaison en face avant	$S_{\text{FAV}} = 10^2 \text{cm/s}$
Vitesse de Recombinaison face arrière	$S_{\text{FAR}} = 10^2 \text{cm/s}$
Durée de vie des porteurs minoritaires	$\text{Tau}0 = 1 \text{ms}$
Couche antireflet	
Epaisseur de la couche antireflet	$e_{\text{ARC}} = 10^2 \text{nm}$
Indice de réfraction	$n = 2.05$
Réflectivité arrière	90%
Emetteur	
Epaisseur	0.1 μ m
Dopage	$N_A = 10^{20} \text{cm}^{-3}$
Demi-largeur de l'émetteur (a-si(p))	700 μ m
Demi-largeur du contact ohmique	700 μ m
Profil du dopage	Fonction erreur complémentaire
Couche intrinsèque	
Largeur	1125 μ m
Epaisseur	10nm
Concentration intrinsèque	$1 * 10^{10} \text{cm}^{-3}$
BSF	
Epaisseur	0.1 μ m
Dopage	$N_D = 5 * 10^{19} \text{cm}^{-3}$
Demi-largeur du BSF (a-si(n))	350 μ m
Demi-largeur du contact ohmique	350 μ m
Profil du dopage	Fonction erreur complémentaire
FSF	
Epaisseur	10 μ m
Dopage	$N_D = 5 * 10^{19} \text{cm}^{-3}$
Largeur de la zone dopée	1125 μ m
Profil du dopage	Fonction erreur complémentaire
Vitesse de recombinaison au contact	$S_e = 5 * 10^6 \text{cm/s}$; $S_h = 5 * 10^6 \text{cm/s}$

3.3 Maillage de la structure

Pour simuler correctement le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction à contacts arrière interdigités, un maillage adapté à la structure est indispensable. Tout en respectant la définition des dimensions de la structure simulée, les paramètres des zones dopées (le type, le niveau, l'emplacement et le profil de dopage), ainsi que le placement des contacts électriques sur la structure. Le maillage divise alors la structure simulée en petites cellules afin d'assurer une meilleure précision dans les calculs, mais cette action fait augmenter le temps de calcul lors de la simulation, ce qui nous oblige à trouver un compromis entre le temps de calcul et la précision au cours de la simulation. Pour atteindre ce but, nous avons appliqué un maillage plus serré seulement dans les zones où le changement des quantités physiques est important (surface avant forte absorption), les hétéro-interfaces de c-Si/a-Si:H et les zones autour des frontières des divers couches dans lesquelles les variations des quantités physiques sont importantes) tandis que dans les autres zones le maillage, est normal. Nous avons présenté sur la figure IV-6 le maillage de la structure à simuler.

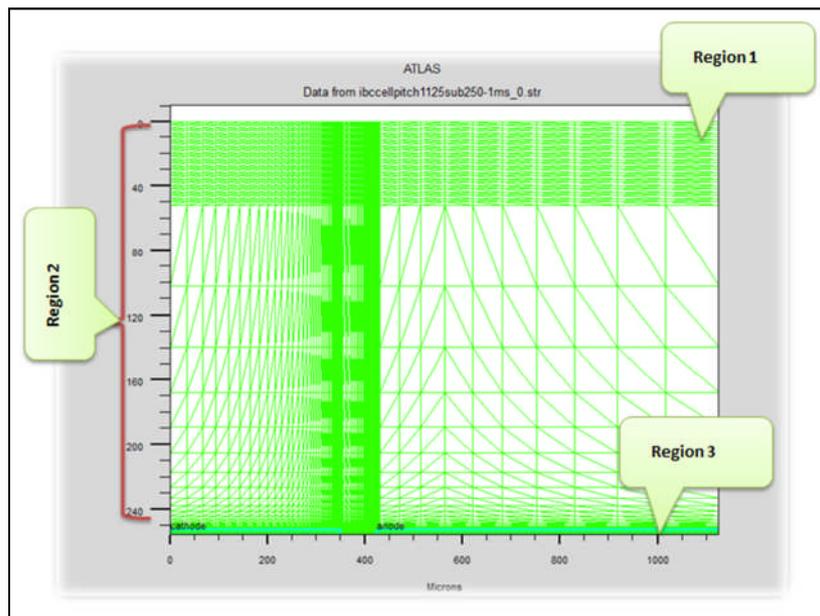


Figure IV-6 Maillage et affinements utilisés pour les simulations d'une cellule IBC-SiHJ.

La cellule a été divisée en trois régions :

Region1 :

- ✓ La région de face avant (SiN ou SiO₂).
- ✓ zone de forte absorption (FSF) : dans la première zone, nous avons affiné le maillage en fonction du dopage pour une définition plus précise des profils de dopage

Région 2 : comprenant deux zones.

- ✓ Substrat
- ✓ Couche intrinsèque.

Region3 : zones dopées (BSF, Emetteur) et face arrière (contacts).

3.4 Présentation d'une cellule de référence

Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel Atlas /Silvaco- 2D (Voire annexe). Les paramètres des matériaux ont été ajustés pour correspondre à notre structure (cellule solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigités). Cette structure a été créée sur un substrat de silicium cristallin (c-Si) type n. Sur la face avant, une couche antireflet (CAR) de nitrure de silicium SiN est placée, afin de diminuer les pertes par réflexion. Sur la face arrière nous avons placé un émetteur de silicium amorphe type p et une couche fortement dopée de silicium amorphe type n appelé (BSF). Le positionnement de l'émetteur et le BSF sont d'une manière interdigitée, placés sur une couche intrinsèque de silicium amorphe (i-a-Si) pour une meilleure passivation. Le BSF et l'émetteur sont couverts de contacts en aluminium métallique séparés par un isolant pour assurer l'isolation électrique.

Pour nos simulations, nous avons tout d'abord simulé une cellule de référence avec un ensemble de paramètres fixés au préalable ensuite comparé nos résultats avec celle trouvée dans la littérature. Aussi, nous avons utilisé un spectre solaire AM1.5G (pour la génération optique) avec une illumination du soleil à l'intensité 100 mW/cm^2 . Puis nous avons essayé d'optimiser cette structure par une étude approfondie de l'influence des différents paramètres géométriques et physiques sur les performances d'une cellule IBC-SiHJ. Pour chaque variation d'un paramètre donné, nous produisons la caractéristique de sortie courant-tension, $I(V)$, simulée sous l'illumination AM1.5. Nous avons ensuite déduit la tension en circuit ouvert V_{co} , la densité de courant de court-circuit J_{cc} , le facteur de forme FF et le rendement électrique la cellule η .

4. Exploitation des résultats de simulation

A partir de la cellule de référence décrite plus haut, nous avons tout d'abord étudié l'influence de la géométrie de la structure élémentaire (pitch) afin de bien spécifier le choix de la structure élémentaire, ensuite nous avons passé à l'étude du substrat en faisant varier le dopage, l'épaisseur de substrat, la durée de vie des porteurs de charges et la longueur de diffusion des porteurs de charges. Puis nous avons analysé l'influence de la vitesse de recombinaison sur les faces avant. Ensuite nous avons, abordé l'influence d'une simple couche antireflet en SiN où en SiO₂ puis en double couche (DCAR) couche antireflet, aussi l'étude de l'influence de la couche intrinsèque et les défauts à l'interface silicium

amorphe/silicium cristallin a été abordée. Après nous avons essayé d’optimiser la géométrie en face arrière par une étude de la largeur et l’épaisseur de l’émetteur, le dopage et de même pour le BSF. Aussi, nous avons étudié un autre paramètre très important, l’espacement entre contact (Gap). Enfin nous avons étudié l’influence de la réflectivité arrière pour deux substrats 50µm et 300µm, pour déterminer les meilleurs paramètres géométriques de la cellule IBC-SiHJ. Toutes ces simulations ont été réalisées pour la cellule de référence de substrat type (n) avec une durée de vie des porteurs de charges minoritaires de 1ms.

4.1 Optimisation de la structure élémentaire (pitch)

4.1.1 L’influence de la largeur de la structure élémentaire (Pitch) sur les performances d’une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ :

L’un des paramètres physiques très importants dans la conception des cellules solaires IBC-SiHJ est la largeur de la structure élémentaire (pitch) [18]. Pour étudier l’influence de la largeur de la structure élémentaire (pitch) sur les performances d’une cellule photovoltaïque. D’abord nous avons fixé l’épaisseur du substrat à (200 µm), puis fixé l’épaisseur de l’émetteur, BSF à (100 nm) enfin nous avons fait varier la largeur de 375µm à 3195µm. Sur la figure IV-7, nous avons présenté les caractéristiques courant-tension (I-V) pour différentes valeurs de pitch. Ces caractéristiques vont nous aider à déterminer les performances électriques (tension en circuit ouvert V_{co} , densité de courant J_{cc} , facteur de forme FF et rendement électrique η) de la cellule solaire IBC-SiHJ. Quand le pas augmente de 375µm à 3195µm, l’impact de la largeur de la structure élémentaire sur les caractéristiques courant-tension I(V) est remarquable sur le courant au moment où la tension est d’environ 670mV. Les résultats obtenus sont présentés sur le tableau IV-9 aussi voir figure IV-7.

Tableau IV-9 Résultats de la variation de la structure élémentaire (pitch)

	Vco(mV)	Icc(A)	Jcc(mA/cm²)	FF(%)	η(%)
Pitch375(µm)	670.31	1.423*10 ⁻⁷	31.78	83.24	17.73
Pitch825(µm)	670.27	3.123*10 ⁻⁷	36.74	82.01	20.19
Pitch1125(µm)	670.25	4.249*10⁻⁷	37.76	80.91	20.47
Pitch1800(µm)	670.26	6.743*10 ⁻⁷	37.46	78.09	19.60
Pitch2400(µm)	670.29	8.890*10 ⁻⁷	37.04	74.27	18.43
Pitch3195(µm)	670.35	1.159*10 ⁻⁶	36.27	64.99	15.80

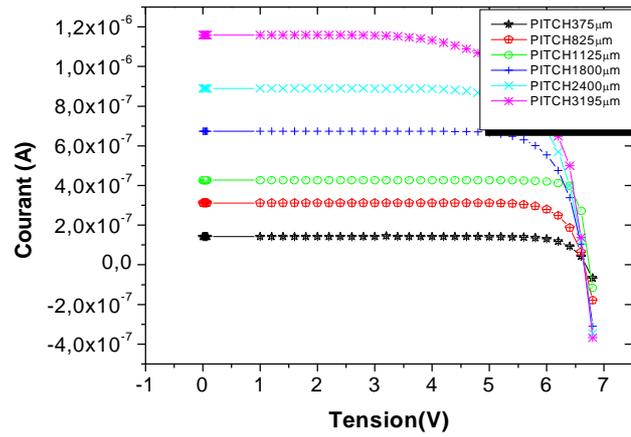
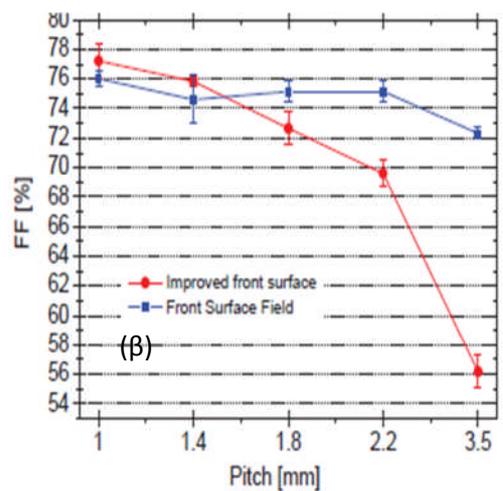
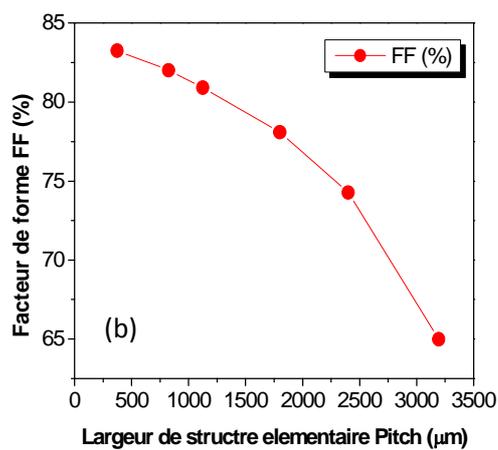
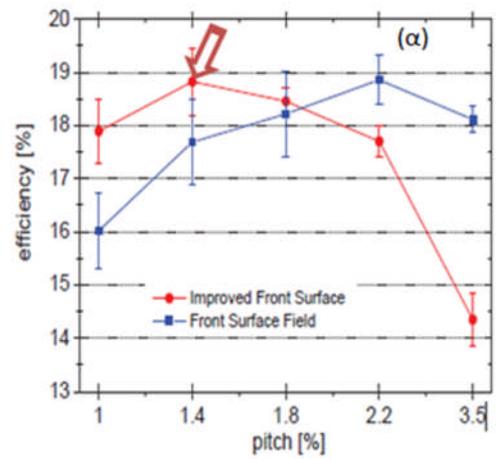
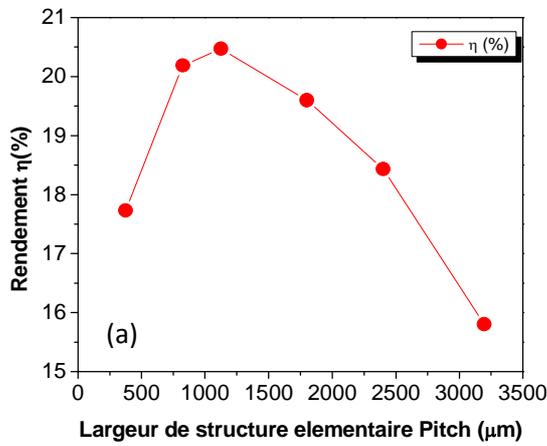


Figure IV-7. Caractéristiques $I(V)$ d'une cellule IBC-SiHJ pour différents pitch



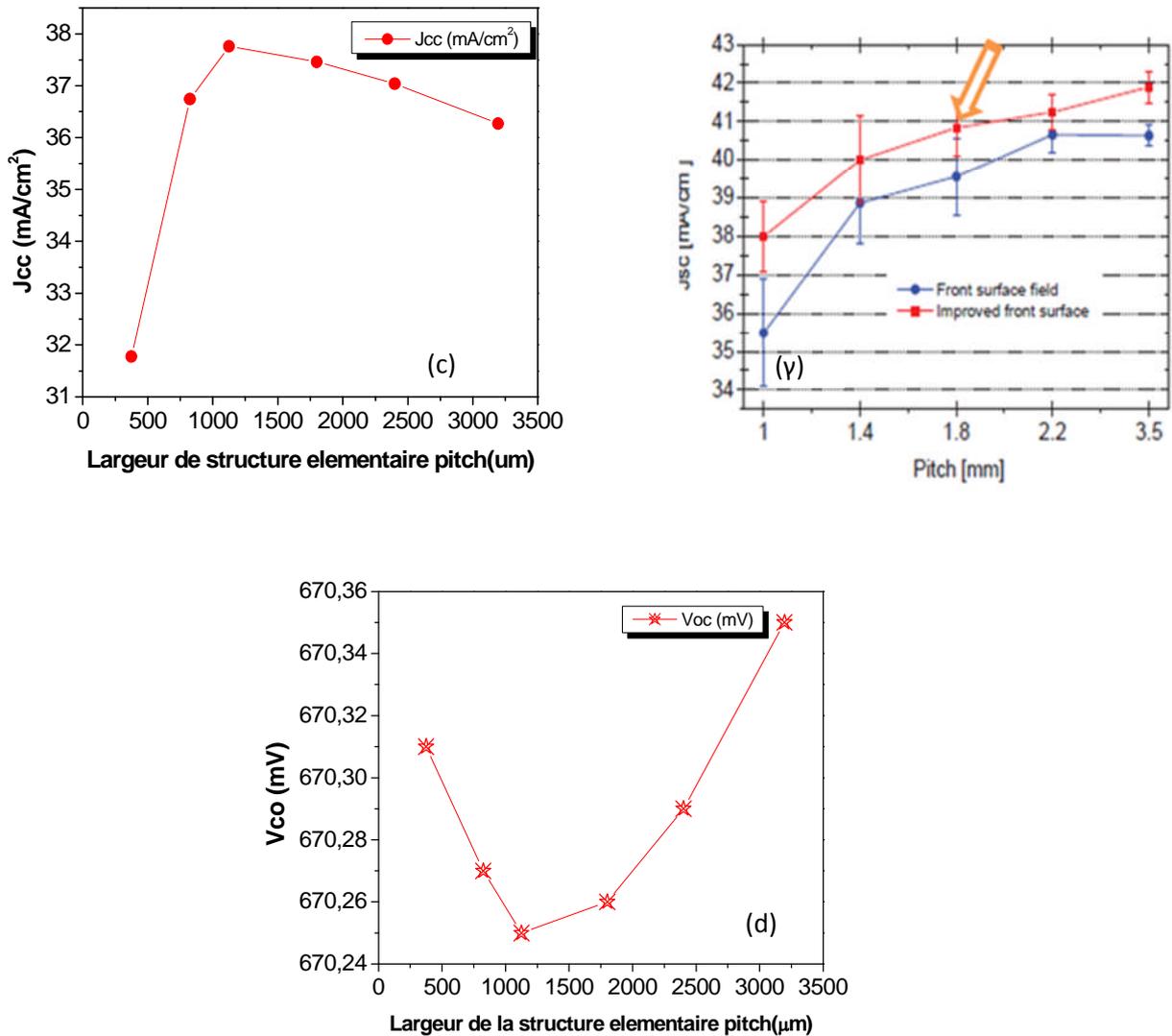


Figure IV-8. Evolution de V_{co} , J_{cc} et FF de la cellule IBC-SiHJ en fonction de la largeur de la structure élémentaire simulée (a,b,c,d) et littérature. (α,β,γ) [18]

➤ Effet sur les performances d'une cellule IBC-SiHJ (η , FF , J_{cc} et V_{co})

La figure IV-8(a) montre l'influence de la largeur de la structure élémentaire sur le rendement d'une cellule solaire IBC-SiHJ, nous pouvons dire qu'après 1125 μm, le rendement diminue avec l'augmentation de la largeur, ceci est dû à une dégradation du facteur de forme FF (voir figure IV-8 (b)). Ce résultat se rapproche de celui trouvé expérimentalement (α,β,γ) littérature [19] De même, nous constatons que c'est une valeur optimale qui donne un rendement de (20,47% de). La figure IV-8 (c) montre que J_{cc} décroît au-delà de 1125 μm. La densité de courant J_{cc} est réduite par la recombinaison dans la cellule solaire IBC-SiHJ, la

plupart des porteurs sont générés à proximité de la surface et les porteurs de charges parcourent jusqu'à l'arrière de la cellule.

En outre, la tension en circuit ouvert V_{co} valorise le meilleur résultat, quand la largeur est inférieure à $1125\mu\text{m}$ même si cette variation reste légère (voir figure IV-8(d)).

- *Choix de la géométrie de la cellule de référence*

Les résultats de simulation obtenus avec la cellule de référence sont donnés dans le tableau IV-10. Ce qui nous a donné une référence pour la comparaison à postériori.

On notera aussi qu'une durée de vie des porteurs minoritaires de (1 ms) a été utilisée au cours de la simulation de la structure IBC-SiHJ.

Tableau IV-10 *Caractéristiques de cellule de référence*

Cellule de référence	Pitch (μm)	Jcc(mA/cm^2)	V_{co} (mV)	FF(%)	η (%)
Simulée	1125	37.76	670.25	80.91	20.47
Literature[19]	1400	40.5	624	76.8	19.4

4.2 Optimisation géométriques et physiques de la face avant d'une cellule photovoltaïque (IBC-SiHJ)

4.2.1 Etude de l'influence de la présence d'une couche antireflet à la surface sur performances d'une cellule solaire IBC-SiHJ

Dans une cellule solaire sous éclairage, la majorité des porteurs de charges sont photo générées à proximité de la face avant. Ceci implique deux caractéristiques importantes pour l'obtention de hauts rendements sur les structures IBC [22].

- La passivation de la face avant doit être extrêmement bonne, afin de limiter le mécanisme de recombinaison surfacique des porteurs [27].
- La longueur de diffusion des porteurs doit être assez élevée pour permettre leur collecte par la jonction en face arrière.

Aussi pour améliorer plus la passivation, on peut rajouter aussi une couche antireflet en SiO_2 ou en SiN x: H [28]. Comme nous avons vu dans la première partie de ce chapitre, les cellules solaires à contacts arrière interdigités sont des structures idéales pour les substrats inférieurs à $250\mu\text{m}$. La diminution de l'épaisseur des cellules augmente le rapport entre la longueur de diffusion et l'épaisseur du substrat. Et par conséquent, une amélioration du rendement des cellules solaires à contacts arrière interdigités, l'utilisation d'une couche antireflet sur la face avant assurent une meilleure passivation et minimisent la réflexion à la surface de la cellule, afin d'intercepter le maximum de photons [29].

Les couches antireflets les plus adaptées dans l'industrie sont le dioxyde de silicium SiO_2 et le nitrure de silicium SiN_xH (celui utilisé au cours de cette simulation). Durant les dernières années, les chercheurs ont trouvé que l'utilisation de deux couches (dépôt d'oxyde suivi d'un dépôt de nitrure de silicium) a donné une amélioration notable sur le rendement de conversion électrique et une diminution intéressante de la vitesse de recombinaison (S_{FAV} devient faible) [30].

4.2.1.1 Le dioxyde de silicium SiO_2

L'un des matériaux les plus utilisés comme couche antireflet et couche passivante des surfaces des cellules solaires à base de silicium est l'oxydation thermique obtenue à haute température ($> 1000^\circ\text{C}$). Les qualités de passivation obtenues par cette méthode sont excellentes, malgré les nombreux avantages de dioxyde de silicium thermique (SiO_2), est un processus à haute température et à budget thermique élevé.

4.2.1.2 Le nitrure de silicium SiN

Le nitrure de silicium SiN est plus efficace que l'oxyde de silicium. On l'utilise aussi comme couche antireflet et passivant des surfaces du silicium. Dans l'industrie photovoltaïque, la technique la plus répandue pour élaborer les couches minces de nitrure de silicium est le dépôt chimique en phase vapeur (CVD – Chemical Vapor Deposition) assisté par plasma (PECVD – Plasma Enhanced Vapor Deposition) à partir des gaz silane (SiH_4) et amoniac (NH_3). Cette technologie permet de réaliser des dépôts à basse température ($<500^\circ\text{C}$). [31]

4.2.1.3 Doubles couches antireflets DACR (SiO_2+SiN)

Récemment, les recherches tendent vers l'utilisation d'une double couche antireflet SiN/SiO_2 déposée successivement sur le substrat ; elle présente une excellente passivation de la face avant des structures à contacts arrière interdigités à hétérojonction.

➤ Une couche de SiN et une couche de SiO_2 d'indice de réfraction respectivement $n = 2.05$ et $n=1.5$

4.2.1.4 Analyse des résultats de l'influence des couches antireflets sur les performances d'une cellule solaire IBC-SiHJ

A partir de la figure (IV-9), on remarque que les cellules avec une simple couche antireflet SiN présentent un courant de court-circuit plus faible par rapport aux cellules avec une double couche antireflet SiN/SiO_2 . Par contre, la tension en circuit ouvert varie très peu. En effet comme nous pouvons voir lors des simulations présentées en figure IV-10, la vitesse de recombinaison en face avant influe considérablement sur le courant de court-circuit J_{cc}

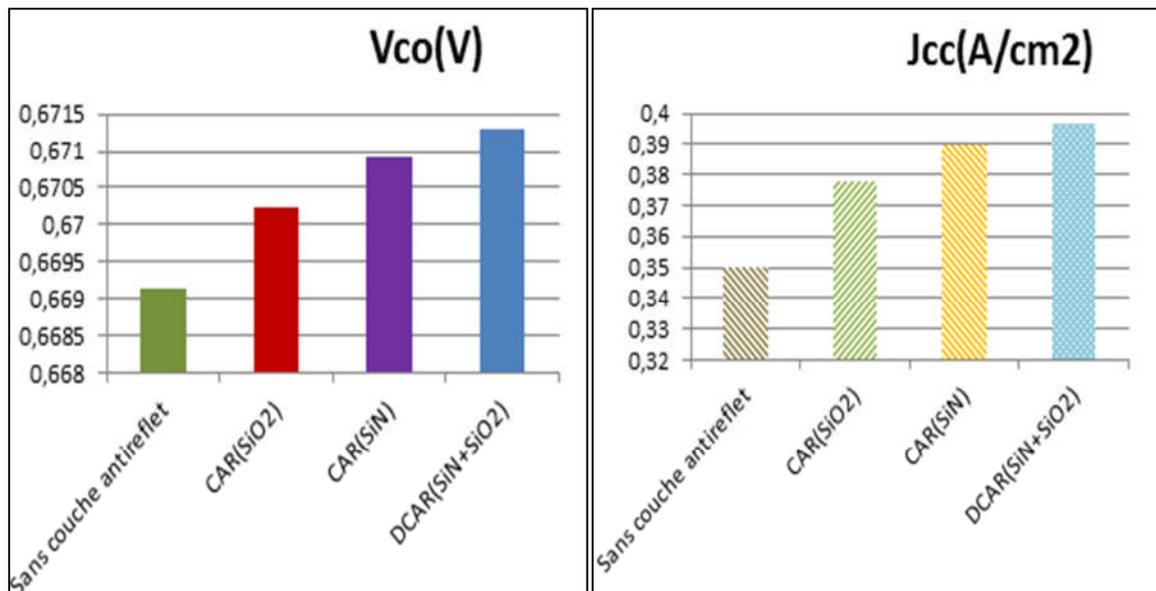
des cellules à hétérojonction et à contacts arrière interdigités, à cause de la génération des porteurs de charges créées dans cette région de la cellule.

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

Et l'ensemble des variations est résumé dans le tableau IV-11 :

Tableau IV-11 Résultats de l'influence de la couche antireflet sur les performances d'une cellule IBC-SiHJ

Pitch1125	Vco (mV)	Icc (A)	Jcc (mA/cm ²)	FF(%)	η (%)
Sans couche antireflet	669.13	3.938*10 ⁻⁷	35.01	80.41	18.77
CAR (SiN)	670.91	4.386*10 ⁻⁷	38.99	81.70	20.60
CAR (SiO2)	670.24	4.248e*10 ⁻⁷	37.76	80.91	20.48
DCAR (SiN+SiO2)	671.3	4.465*10⁻⁷	39.64	82.69	21.25



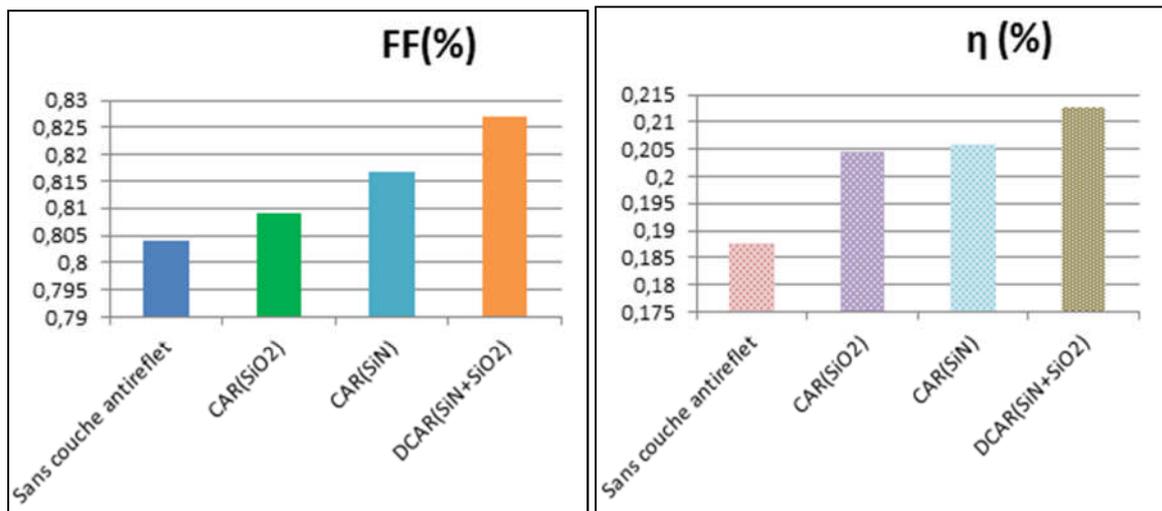


Figure IV-9. Influence des couches antireflets (CAR et DCAR) sur les performances d'une cellule à hétérojonction à contact arrière sous éclairement AM 1.5G (V_{co} , J_{cc} , FF et η)

4.2.1.5 Interprétation des résultats de l'amélioration dans les performances d'une cellule IBC-SiHJ due à l'utilisation de double couche antireflet (DCAR):

Le SiO₂ procède d'excellentes propriétés de passivation en surface. Le SiO₂ thermique n'est pas stable sous illumination [32]. Il convient de passiver la surface en ajoutant une autre couche antireflet par le dépôt d'une couche de SiN_x connue pour ses propriétés anti-réfléctives et sa stabilité sous éclairement [33]. En faisant une légère diffusion du phosphore, nous pouvons créer un champ en surface avant (FSF) qui diminuera les recombinaisons de surface et augmentera la stabilité de la passivation [34]. Ce FSF limitera les pertes électriques, notamment en termes de V_{co} et de FF qui compareront aux surfaces uniquement passivées par un oxyde [35].

4.2.2 Etude de l'influence de la vitesse de recombinaison et de la couche fortement dopée FSF sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ

4.2.2.1 Etude de l'influence de la vitesse de recombinaison face avant sur les performances d'une cellule solaire IBC-SiHJ

La passivation de la surface avant du substrat du silicium cristallin (c-Si) de la cellule IBC-SiHJ est un facteur important pour atteindre des hauts rendements. Il est estimé par la vitesse de recombinaison des porteurs de charges de surface avant. Sur la Figure IV-10, nous observons l'impact de S_{FAV} sur les performances d'une cellule IBC-SiHJ (la tension en circuit ouvert V_{co} , la densité de courant en court-circuit J_{cc} , et sur le rendement de conversion électrique η) de cellule de référence.

Pour examiner l'influence de la recombinaison sur les faces avant, les résultats de la simulation sont présentés sur la figure IV-10.

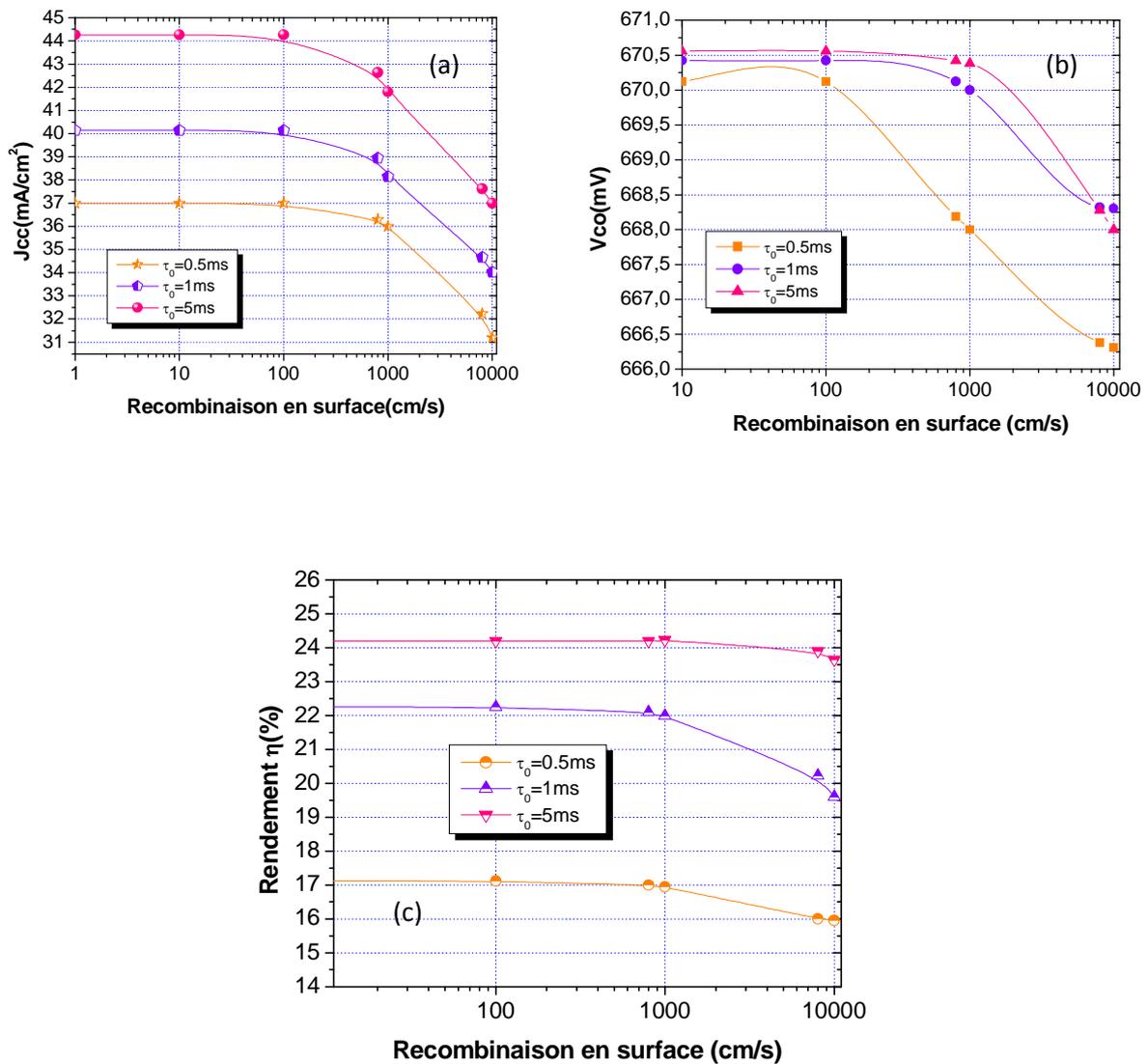


Figure IV-10. Evolution du J_{cc} , V_{co} et du η de la cellule en fonction de la recombinaison sur les faces avant.

➤ Effet sur les performances d'une cellule IBC-SiHJ (V_{co} , η et J_{cc})

En effet, la majorité des paires électron-trou sont photo-générés dans les premiers micromètres de substrat c-Si tandis que les contacts sont situés sur la face arrière, il est donc crucial que ces porteurs photogénérés ne se recombinent pas et peuvent se diffuser à l'arrière de la cellule à contacts arrières interdigités. Comme nous pouvons le voir sur la figure IV-10(a), une augmentation de la vitesse de recombinaison S_{FAV} entraîne une dégradation de courant en circuit-ouvert J_{cc} et par conséquent une dégradation de la performance de la cellule IBC-SiHJ. La même remarque reste relative à la tension en circuit ouvert V_{co} . Elle diminue aussi avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison (voir figure IV-10 (b)).

Concernant le rendement de conversion électrique ; quand la vitesse de recombinaison S_{FAV} varie de 100 cm / s et 10000 cm / s, le rendement des cellules IBC-SiHJ sur un substrat en c-Si de type n diminue légèrement de 22,5% à 19,5% (voir la figure IV-10(c)) pour une durée de vie de 1 ms, il tente à augmenter pour des durées de vie supérieure à 1ms et diminue pour des durées de vie inférieure à 1 ms. Par contre, une vitesse de recombinaison en surface inférieure à 100 cm/s, reste sans influence importante sur les caractéristiques de la cellule.

Une bonne passivation de la surface avant du substrat c-Si (S_{FAV} aussi faible que possible) est l'une des portes d'optimisation pour obtenir de bonnes performances avec ce type de cellules IBC-SiHJ.

4.2.2.2 Etude de l'influence de la présence d'une couche fortement dopée à la surface (FSF) sur performances d'une cellule solaire IBC-SiHJ

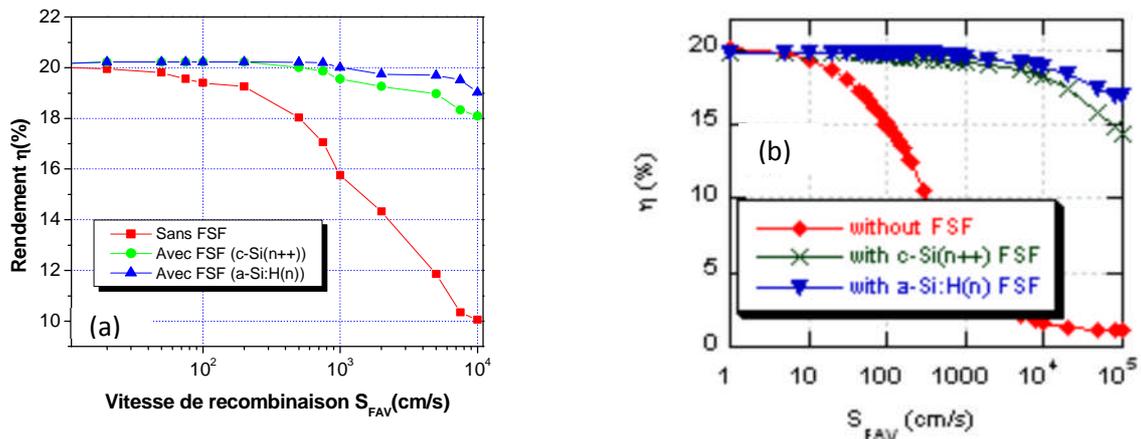


Figure IV-11. Influence de la vitesse de recombinaison en face avant avec et sans couche FSF (a) cellule de référence de type n et (b) la cellule de littérature [21].

❖ Interprétation des résultats

L'insertion d'une couche de silicium cristallin dopée n^{++} sur la surface d'avant de la cellule IBC-SiHJ est utilisée pour créer un champ électrique appelé champ face avant (FSF). Le champ FSF qui a pour rôle de protéger les porteurs minoritaires de la recombinaison de surface FSF renforce également le transport de courant latéral dans les cellules IBC, en diminuant la résistivité du substrat. Il permet aussi de limiter les recombinaisons à la surface [25]. Ceci repose sur le même principe du champ BSF (Back Surface Field) utilisé pour la structure conventionnelle. Dans cette étude, nous avons fixé une profondeur de dopage de la couche FSF de 0,5 μ m pour les deux cas, que ce soit pour le cas de dopage n^{++} de silicium cristallin ou pour l'utilisation d'une couche de silicium amorphe(a-Si :H) type n , et pour un

troisième cas, on utilise la structure IBC-SiHJ sans l'utilisation de la couche FSF sur la face avant de la cellule. Les trois cas sont représentés sur la figure IV-11. Comme nous pouvons remarquer sur cette figure, il existe une forte dépendance des performances de la cellule IBC-SiHJ avec une vitesse de recombinaison de surface de supports dans la cellule solaire classique IBC-SiHJ (sans couche FSF). La plupart des porteurs sont générés à proximité de la face avant, tandis que dans les cellules solaires à hétérojonction à contacts arrière interdigités, l'hétérojonction (n/p) se trouve à l'arrière de la cellule. Une mauvaise passivation sur la face avant qui signifie une augmentation dans la vitesse de recombinaison S_{FAV} , et par conséquent une diminution dans le taux des porteurs de charge avant même qu'ils n'atteignent l'arrière de la cellule IBC-SiHJ. La figure montre l'importance de la couche FSF afin d'assurer une meilleure passivation de la face avant. En effet, il n'y a pas de dégradation des performances de la cellule avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison des charges minoritaires sur la surface avant jusqu'à 4500 cm / s. Ce résultat est très important dans des conditions industrielles [26], où il est difficile d'obtenir une bonne passivation sur de grandes surfaces. Nous remarquons aussi, dans le cas où la couche FSF est en silicium amorphe type n a-Si:H(n) une amélioration dans le rendement mais avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison, il y a une certaine dégradation. La recombinaison peut augmenter à l'interface entre le silicium amorphe et le silicium cristallin.

4.3 Influence de substrat sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ

4.3.1 Etude de l'influence de la durée de vie des charges minoritaires dans le substrat (qualité du substrat)

Les cellules photovoltaïques de silicium à hétérojonction à contacts arrière interdigités (IBC-SiHJ) sont caractérisées par la position des contacts sur la face arrière de la cellule. Pour collecter les porteurs de charges, il est nécessaire qu'ils atteignent l'arrière de la cellule sans être recombinaisonnés, où l'importance d'un substrat (c-Si) de haute qualité. La durée de vie des porteurs de charges minoritaires est un paramètre employé universellement pour la détermination de la qualité de substrat (c-Si). Parler de la durée de vie ou du taux de recombinaison c'est pareil. En effet, avec une durée de vie plus élevée, un porteur de charge libre parcourt une distance plus longue dans le substrat de silicium cristallin(c-Si) avant qu'il ne se recombine. La distance moyenne parcourue par un porteur de charge minoritaire sans être recombinaisonné est la longueur de diffusion L_d . Elle est reliée à la durée de vie par la relation suivante [21]:

- cas des électrons :

$$L_{d,n} = \sqrt{D_n \tau_n} = \sqrt{\frac{kT}{q} \mu_n \tau_n} \quad (IV-40)$$

- Cas des trous :

$$L_{d,p} = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{\frac{kT}{q} \mu_p \tau_p} \quad (IV-41)$$

Les résultats sont présentés sur le Tableau IV-12, ainsi représentés sur la figure IV-12

Tableau IV-12 Résultats de la variation de la durée de vie dans un substrat :

		Vco(mV)	Jcc(mA/cm ²)	FF(%)	η (%)
Tau=5ms	Simulée	670.30	43.85	81.30	23.89
	Littérature [21]	726.2	34.69	84.6	21.3
Tau=1ms	Simulée	670.24	37.76	80.91	20.47
	Littérature [21]	718.9	33.34	82.9	19.85
Tau=0.5ms	Simulée	669.28	31.27	80.42	16.83
	Littérature [21]	705.6	31.78	82.3	18.46
Tau=0.1ms	Simulée	666.28	21.77	79.19	11.48
	Littérature [21]	665.3	23.09	82.4	12.49

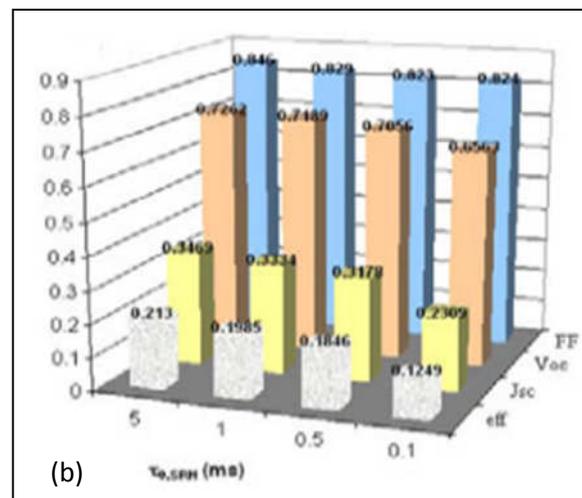
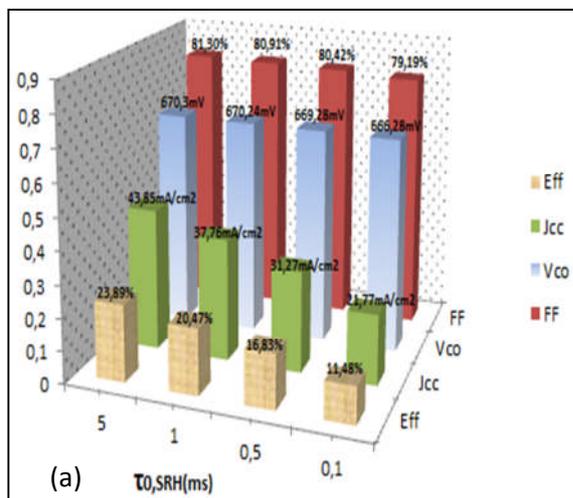


Figure IV-12. Evolution de la tension de circuit ouvert, du courant de court-circuit, facteur de forme et du rendement de la cellule IBC-SiHJ en fonction de la durée de vie des porteurs minoritaires. Pas de défaut à l'interface. (a) simulée ; (b) littérature [21]

4.3.2 Etude de l'influence de la variation des durées de vie sur le rendement quantique

RQE

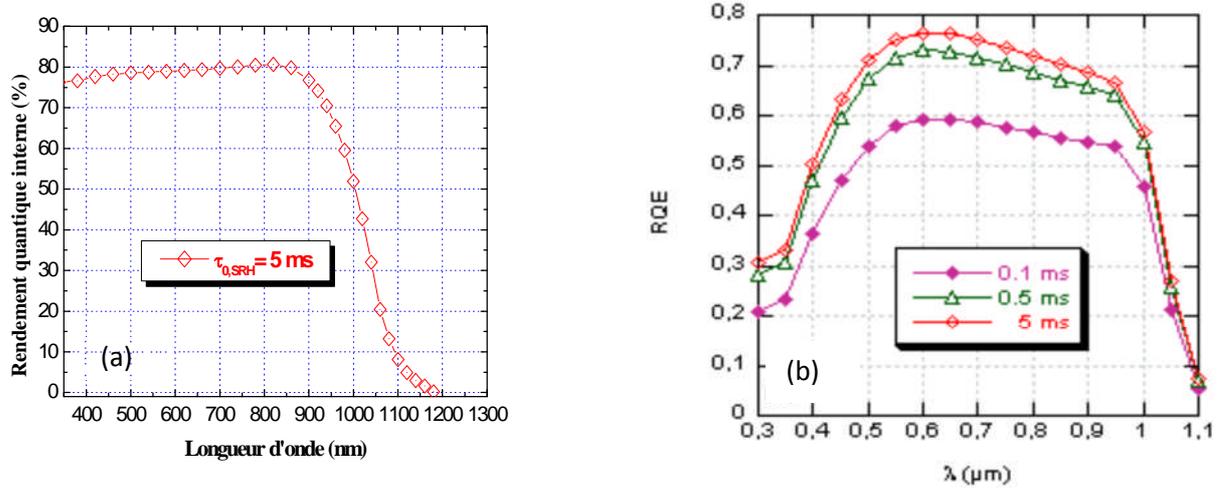


Figure IV-13. Variation du rendement quantique pour une cellule solaire IBC-SiHJ pour une durée de vie de 5ms.(a) simulée ; (b) littérature [21]

❖ Interprétation des résultats

La simulation a été élaborée seulement pour une durée de vie de 1ms. Nous avons remarqué que les résultats sur l'évolution des rendements quantiques externes simulés (a) et ceux trouvés dans la littérature (b) se rapprochent. Les caractéristiques des rendements quantiques présentés sur la figure IV-13 (a et b) sont améliorées pour des durées de vie plus élevées. Ce résultat confirme aussi qu'une bonne qualité de substrat améliore l'absorption optique des photons et par conséquent augmente la collecte des porteurs et le rendement quantique externe RQE par l'amélioration de courants photogénérés. Dans la littérature, le rapport entre la longueur de diffusion des porteurs minoritaires L_d et l'épaisseur de substrat doit être entre 3 et 4 pour assurer une collection satisfaisante des porteurs produits sur la surface avant pour obtenir un rendement maximum. Nous devons noter que ceci n'est valide que par la technologie de la photolithographie. En effet, le rendement quantique externe est supérieur à 80% pour une durée de vie de 5ms. La cellule solaire absorbe des photons sur une large gamme de longueur d'onde. Sa réponse spectrale est un moyen de mesure pour caractériser les performances de la cellule IBC-SiHJ. Le rendement quantique externe est défini comme le rapport entre le nombre de paires électrons-trous collectées par les contacts sur le nombre de photons incidents.

4.3.3 Etude de l'influence de la longueur de diffusion sur le rendement d'une cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigués IBC-SiHJ

Sur la figure IV-14, nous avons représenté l'évolution de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires de la structure de référence simulée (a) en la comparant avec celle de la littérature (b) [21].

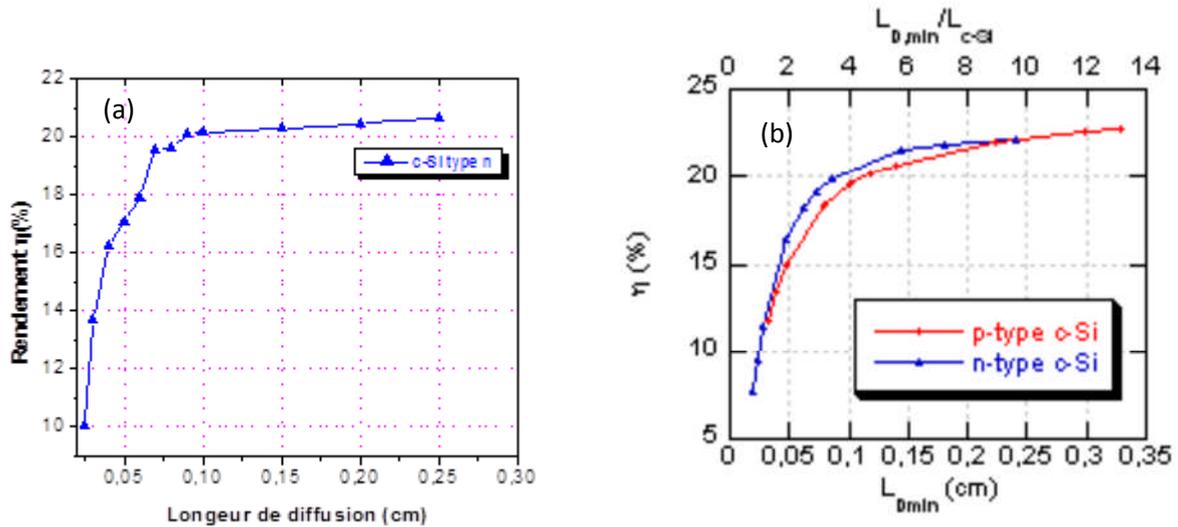


Figure IV-14. Variation du rendement électrique en fonction de la longueur de diffusion dans le substrat (c-Si type n), d'une cellule solaire à contacts arrière interdigués à hétérojonction. (a) simulée ; (b) littérature [21]

❖ Interprétation des résultats

Nous pouvons constater après une analyse des deux courbes, (a) simulée et (b) littérature [21] (voir figure IV-14), que la longueur de diffusion est un paramètre extrêmement influent sur le rendement des cellules solaires à hétérojonction à contacts arrière interdigués. Le rapport entre la longueur de diffusion (L_d) des porteurs de charges minoritaires dans le substrat et l'épaisseur du substrat (L_{c-Si}) sont des paramètres très importants dans l'évaluation d'une cellule IBC-SiHJ. Dans la littérature, un rapport ($L_{d \text{ min}} / L_{c-Si}$) compris entre 3 et 4 est largement suffisant pour assurer une collecte des porteurs des charges générées satisfaisantes au niveau de la surface avant, pour obtenir un rendement de conversion électrique maximale.

A partir de la figure IV-14, on voit que :

- Si le rapport $L_d/W=1$, le rendement est d'environ 12.75% pour
- pour un rapport $L_d/W=2$, le rendement de la cellule est entre 16% et 18% ;

- Avec un rapport L_d/W de 3 ou plus, le rendement de la cellule est entre 19% et 21% ainsi la courbe $\eta=f(L_d)$ commence à être saturée

4.3.4 Etude de l'influence de l'épaisseur du substrat sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ

Les cellules photovoltaïques à hétérojonctions à contacts arrière interdigués IBC-SiHJ sont connues par leurs coûts assez élevées de fabrication. Pour résoudre ce problème, tout en maintenant un haut rendement, les chercheurs ont travaillé largement sur les matériaux, autrement dit, l'épaisseur du substrat (c-Si). Cependant, cette solution est valable seulement si la réduction de l'épaisseur du substrat n'influe pas sur les performances de la cellule. L'épaisseur de silicium cristallin (c-Si) généralement utilisée est moins de 250 μm . Dans cette partie, nous allons étudier l'impact de la réduction de l'épaisseur du substrat cristallin (c-Si) sur les caractéristiques de sortie d'une cellule solaire IBC-SiHJ.

➤ Effet sur la tension en circuit ouvert V_{CO}

Sur la figure IV-15 (a), nous avons remarqué que la tension en circuit ouvert V_{CO} augmente pour des épaisseurs de substrats de silicium cristallin(c-Si) plus mince. Ainsi, un gain de 4 mV est obtenu d'un substrat de bonne qualité ($\tau_{0,SRH} = 5\text{ms}$) dans l'intervalle 50 μm à 250 μm tandis que pour les substrats de faible qualité ($\tau_{0,SRH} = 0,1\text{ms}$) le gain est de 2 mV. L'amélioration dans la tension en circuit ouvert est due à l'utilisation de plaquette mince de silicium cristallin (c-Si) qui est dû à une recombinaison plus faible.

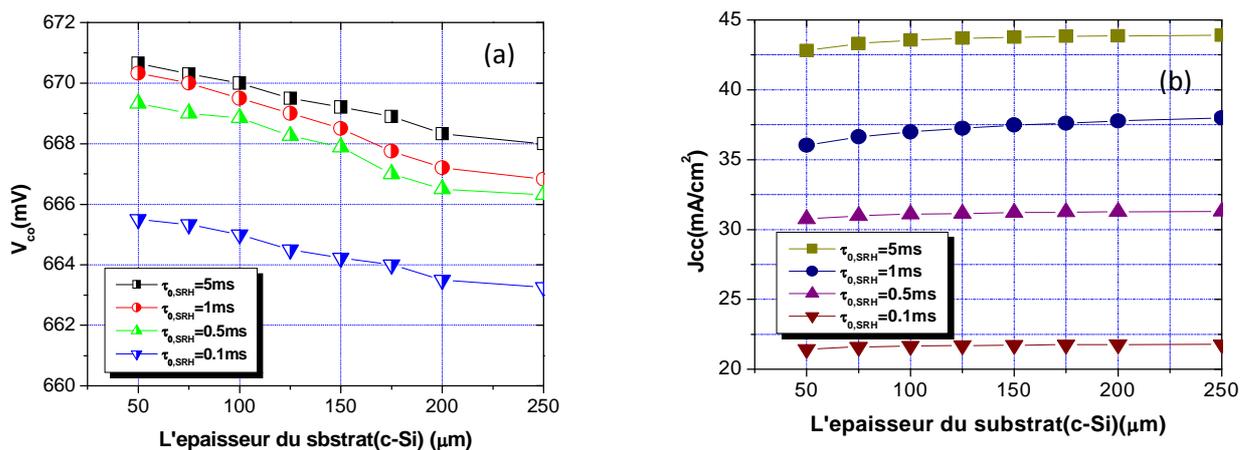


Figure IV-15. (a),(b) Evolution de V_{co} (a), du J_{cc} (b) de la cellule IBC-SiHJ en fonction de l'épaisseur du substrat

➤ *Effet sur la densité de courant en court-circuit J_{cc}*

Dans la figure IV-15 (b), nous avons représenté l'évolution de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction de l'épaisseur du substrat de silicium cristallin. En réduisant l'épaisseur du substrat (c-Si(n)), l'absorption des photons diminue, ainsi que la génération des paires électron-trou dans le substrat. Pour les substrats de bonne qualité ($\tau_0, SRH > 1 \text{ ms}$), les résultats montrent que la réduction d'épaisseur diminue l'absorption des photons de basse énergie. Donc J_{cc} se dégrade. Pour les substrats de faible qualité ($\tau_0, SRH < 1 \text{ ms}$), nous pouvons remarquer une amélioration de J_{cc} avec une épaisseur réduite (c-Si). Cette amélioration de J_{cc} s'explique par une diminution du taux de recombinaison. Pour des substrats de haute qualité, une réduction d'épaisseur doit être accomplie avec un piégeage de la lumière améliorée afin d'éviter la perte des paires électron-trou.

➤ *Effet sur le facteur de forme FF.*

Sur la figure IV-15 (c), nous pouvons remarquer une dégradation des valeurs de facteur de forme FF avec la réduction de l'épaisseur de silicium cristallin entre 250 et 50 μm , pour les différentes variations de durées de vie. Ainsi, pour avoir un meilleur facteur de forme, l'épaisseur doit au moins dépasser les 100 μm .

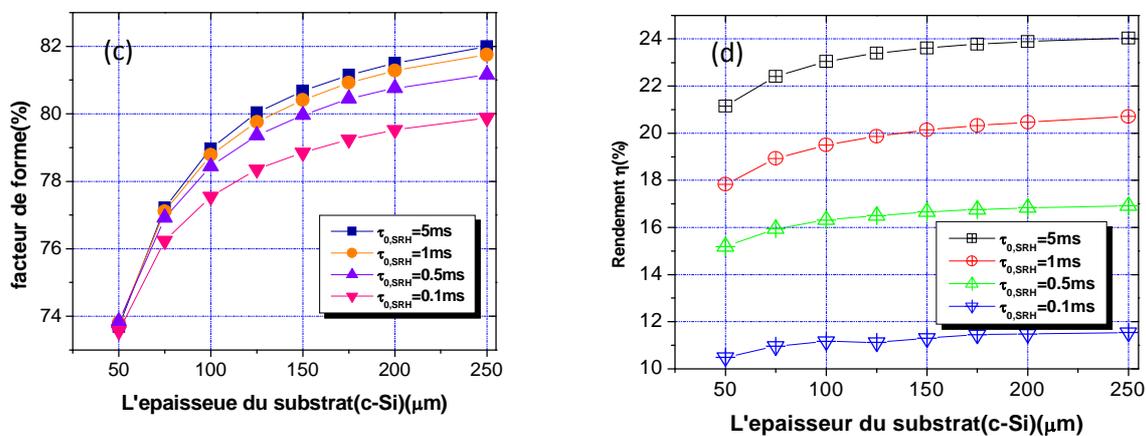


Figure IV-15. (c),(d) Evolution du facteur de forme(c) et du rendement(d) de la cellule IBC-SiHJ en fonction de l'épaisseur du substrat.

➤ *Effet sur le rendement de conversion électrique η*

Dans la figure IV-15 (d), nous avons montré l'évolution du rendement électrique en fonction de l'épaisseur de substrat (c-Si) pour différentes durées de vie des porteurs de charge minoritaires $\tau_{0,SRH}$. Nous avons remarqué qu'en réduisant l'épaisseur de substrat (L_{c-Si}) de 250 μm à 50 μm , nous observons une baisse de rendement pour les cellules solaires IBC-SiHJ avec différentes durées de vie, mais aussi une nette amélioration dans les performances pour les substrats de bonne qualité $\tau_{0,SRH} > 1\text{ms}$.

Ces résultats sont très intéressants en vue de la réduction des coûts de fabrication tout en maintenant un rendement maximum. Nous pouvons ainsi arriver à une solution optimale en faisant un compromis sur le rapport (coût de fabrication / performance) et ce, en utilisant un substrat de qualité moyenne de (durée de vie entre 0.5 et 1 ms). Ces résultats favorisent l'utilisation des couches minces du substrat de silicium cristallin (c-Si, d'épaisseur inférieure à 250 μm), aussi avec de bonnes propriétés de réflexion 90% presque totales sur la face arrière. Les photons de faible énergie peuvent contribuer à des générations des paires électron-trou, et cela se traduit par une amélioration de la densité de courant J_{cc} pour un substrat de silicium cristallin(c-Si) ayant une épaisseur plus faible.

4. 3.5 Etude de l'influence du dopage de substrat sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ

Dans cette partie nous essayerons de trouver l'influence du dopage sur les performances des cellules solaires à hétérojonction à contacts arrière interdigités. En supposant une bonne passivation au niveau d'interface (a-Si:H/c-Si) et une faible recombinaison sur les surfaces avant et arrière, la durée de vie sera déterminée par la recombinaison SRH et la recombinaison Auger, aussi la résistivité sera liée à la concentration du dopage par la relation suivante [43].

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n N_D} \quad (\text{IV-42})$$

Aussi la durée de vie est définie comme suit:

$$\frac{1}{\tau_{vol}} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{Aug}} \quad (\text{IV-43})$$

➤ Effet sur les densités de courants en court-circuit J_{cc}

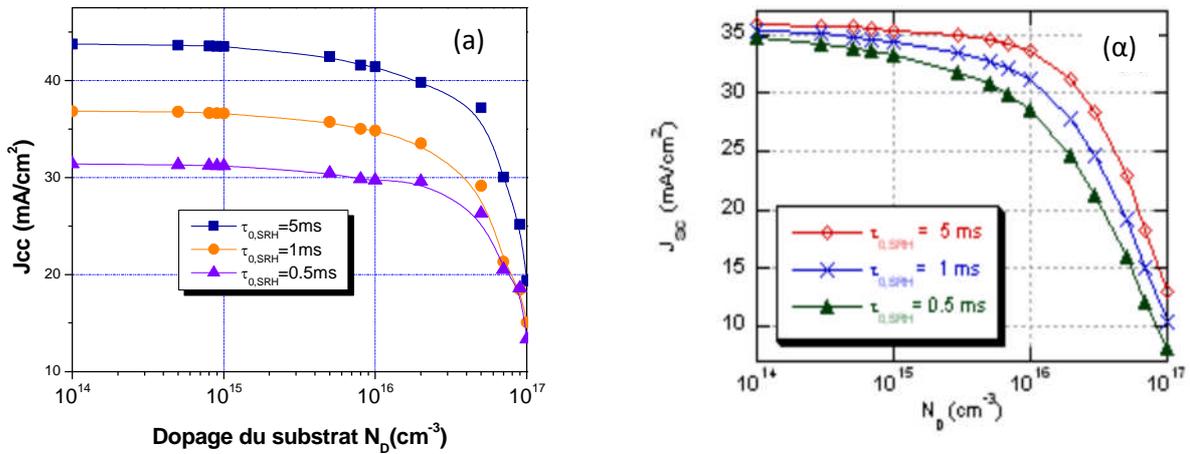


Figure IV-16. (a), (α) Variations du J_{cc} , en fonction de la concentration du dopage du substrat (c-Si). (a) pour la cellule de référence de type n et (α) pour la cellule de littérature[21], avec différentes durées de vie. Pas de défauts à l'interface a-Si: H/c-Si.

❖ Interprétation des résultats

La densité de courant de court-circuit diminue avec l'augmentation de la concentration de dopage voir figure IV-16 (a), une concentration de dopage plus élevée qui fera diminuer la mobilité des porteurs de charge et par conséquent la durée de vie des porteurs d'où la diminution de J_{cc} avec l'augmentation de la concentration du dopage. Reste à noter que cette diminution sera plus importante avec un substrat de qualité moyenne, à une durée de vie des porteurs inférieure à 1ms.

➤ Effet sur les tensions en circuit ouvert V_{co}

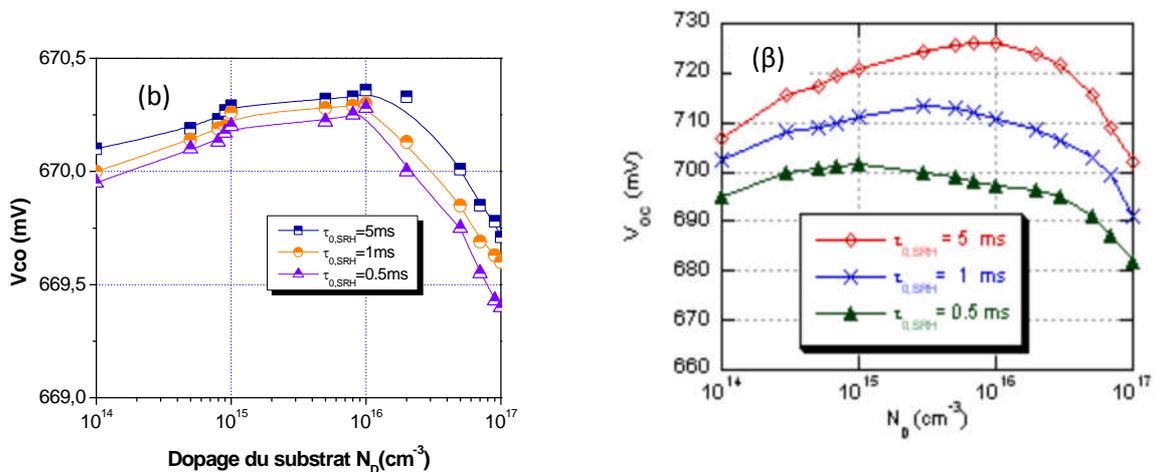


Figure IV-16. (b), (β) Variations de V_{co} , en fonction de la concentration du dopage du substrat (c-Si). (b) pour la cellule de référence de type n et (β) pour la cellule de littérature[21], avec différentes durées de vie. Pas de défauts à l'interface a-Si: H/c-Si.

❖ Interprétation des résultats

Nous remarquons que la tension en circuit ouvert accroît avec l'augmentation de la concentration de dopage. Mais à un moment donné, la recombinaison (Auger et SRH) devient domination ce qui conduit à une diminution de la tension en circuit ouvert V_{co} . Donc il existe une valeur optimale, (voir la figure IV-16 (b)). Dans un substrat de silicium cristallin c-Si de type n, l'optimum est à $N_D=10^{16} \text{cm}^{-3}$. Nous remarquons aussi que la variation de la tension en circuit ouvert V_{co} en fonction du dopage est moins importante lorsqu'on utilise des substrats de moyenne qualité (inférieure à 1ms).

➤ Effet sur les facteurs de formes FF

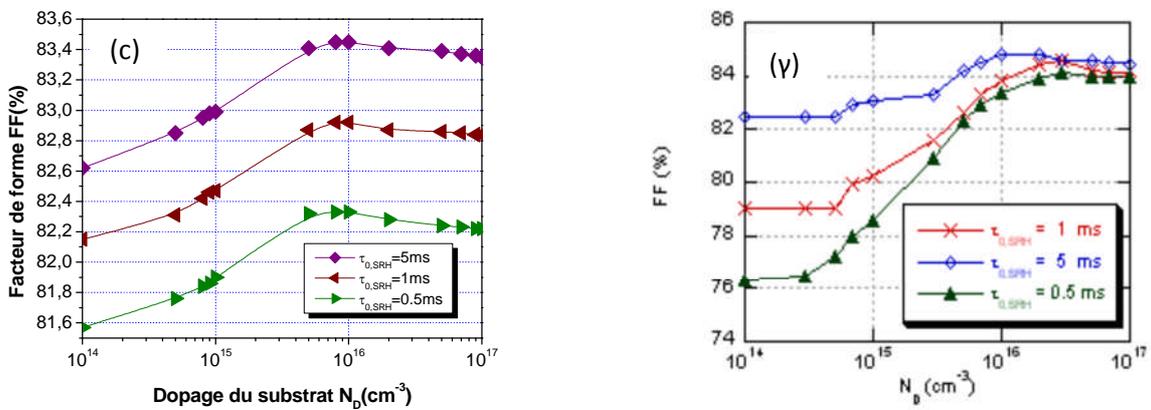


Figure IV-16. (c), (γ) Variations du FF, en fonction de la concentration du dopage du substrat (c-Si). (c) pour la cellule de référence de type n et (γ) pour la cellule de littérature [21], avec différentes durée de vie .

❖ Interprétation des résultats

En augmentant la concentration de dopage (N_D) dans le substrat, nous remarquons une amélioration du facteur de forme, voir figure IV-16 (c). Cette amélioration est liée à la résistivité du substrat cristallin (voir la relation IV-41). En effet, lorsqu'on augmente la concentration de dopage, la résistivité dans le substrat diminue, ce qui améliore les propriétés de conduction dans le substrat de silicium cristallin c-Si et aussi, le facteur de forme. Les simulations ont été réalisées sans tenir compte de la résistance série aux contacts, ce qui explique les très bonnes valeurs obtenues.

Remarque :

La tension en circuit ouvert V_{co} , la densité de courant J_{cc} et le facteur de forme FF n'évoluent pas dans le même sens lorsque la concentration de dopage augmente. Ces divers changements se traduisent par l'existence d'un optimum de concentration de dopage qui

correspond au rendement maximal de la cellule solaire IBC-SiHJ, comme le montre la figure IV-15(d). Avec l'augmentation du dopage du substrat, la durée de vie des porteurs et la mobilité se dégradent et les taux de recombinaison Shockley-Read-Hall et Auger augmentent. Cela entraîne une décroissance importante du rendement et de J_{CC} dans le cas de substrats fortement dopés.

➤ *Effet sur le rendement électrique η*

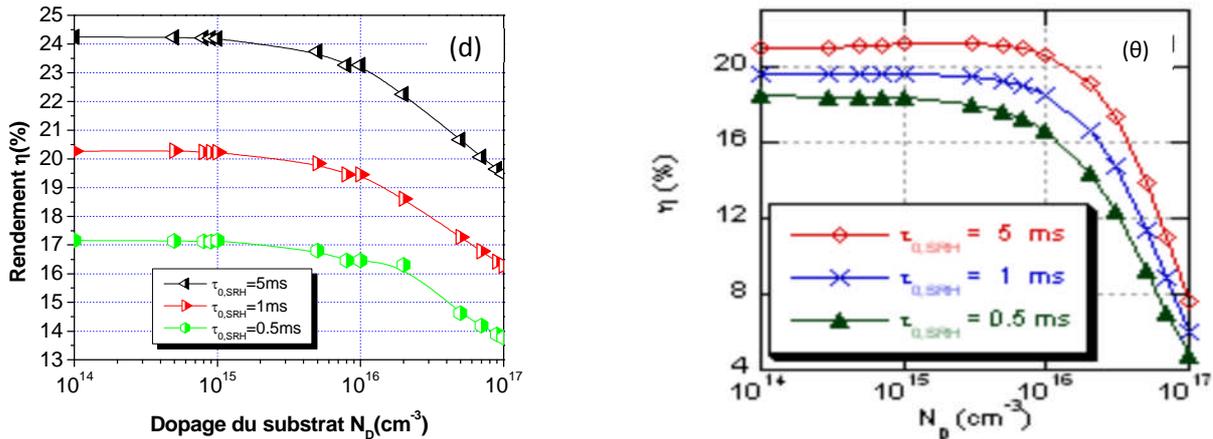


Figure IV-16. (d), (θ) Variations du rendement électrique η (%), en fonction de la concentration du dopage du substrat (c-Si). (d) pour la cellule de référence de type n et (θ) pour la cellule de littérature[21], avec différentes durées de vie.

❖ *Interprétation des résultats*

Pour notre cas, l'optimum de dopage est $N_D = 1 * 10^{15} cm^{-3}$ ($\rho = 5.68 \Omega \cdot cm$) pour $\tau_{0,SSR} = 5ms$ tend à diminuer avec une dégradation de la qualité du substrat ($\tau_{0,SSR} < 5ms$). Cependant, nous notons aussi que le rendement varie très peu sur un intervalle autour de cet optimum. On constate aussi que la plage optimale correspond à des niveaux inférieurs à $10^{16} cm^{-3}$. Alors, il est nécessaire d'utiliser des substrats de silicium cristallin (c-Si) ayant des résistivités appropriées pour avoir une meilleure performance dans la cellule IBC-SiHJ. L'intervalle qui contient la valeur de la résistivité optimale et qui correspond à une concentration de dopage bien déterminée a été définie pour les deux cellules de référence IBC-SiHJ simulée et celle de la littérature. Ces plages optimales dépendent souvent de la géométrie de la face arrière, basée sur la technologie d'alignement. Reste à noter que les dimensions de la structure de littérature sont obtenues avec la technologie d'alignement à faible coût tel que la sérigraphie.

4.4 Etude de l'impact des densités d'états d'interface silicium amorphe /silicium cristallin dans une IBC-SiHJ (cas d'une structure sans couche intrinsèque)

Dans cette partie, nous étudions notre structure mais sans couche intrinsèque afin d'étudier l'interface silicium amorphe/silicium cristallin

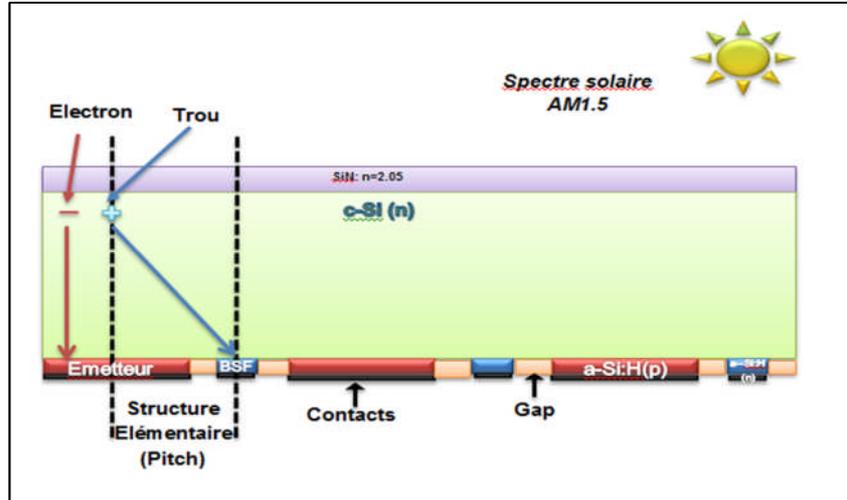


Figure IV-17. Structure d'une cellule solaire à hétérojonction à contacts arrière interdiguée avec couche intrinsèque

4.4.1 Défauts d'interface silicium cristallin / silicium amorphe (c-Si/ a-Si: H)

L'étude précédente du substrat été basée sur un cas idéal d'une structure IBC-SiHJ c-à-d sans défaut à l'interface entre le silicium cristallin /silicium amorphe. Ce qui n'est pas réel, car logiquement, il reste toujours des défauts qui peuvent être des centres de recombinaison pour les porteurs de charges libres aux interfaces surtout dans le cas des hétérojonctions. L'équation suivante (IV.44) décrit le taux de recombinaison des défauts d'interface :

$$R_{int,SRH} = \int_{E_v}^{E_c} \frac{\sigma_n \sigma_p v_{th} (np - n_i^2)}{\sigma_n (n + n_i \exp(\frac{E - E_i}{k_B T})) + \sigma_p (p + n_i \exp(\frac{E_i - E}{k_B T}))} N_{int}(E) dE \quad (IV-44)$$

Où $N_{int}(E)$ Densité d'états d'interface situés à un niveau E

σ_p et σ_n sont les sections de capture respectivement des électrons et des trous. [36][37][38]

L'équation (IV-44) simplifiée en:

- Cas des trous

$$R_{int,SRH} = \sigma_p \cdot p \cdot v_{th} \cdot N_{SS} \quad (IV-45)$$

- Cas des electrons

$$R_{int,SRH} = \sigma_n \cdot p \cdot v_{th} \cdot N_{SS} \quad (IV-46)$$

Tout d'abord, nous allons analyser l'influence des défauts situés à l'interface entre le silicium cristallin type (n) et l'émetteur type (p), nous commençons par un cas idéal où il

n'existe pas de défauts, ensuite nous introduisons des défauts à l'interface. Puis nous allons reprendre la même étude mais cette fois sur l'interface silicium cristallin type (n) /BSF (silicium amorphe type (n)).

4.4.2 Influence des défauts d'interface c-Si/émetteur sur les performances d'une cellule IBC-SiHJ

Nous avons introduit des défauts à l'interface uniquement au niveau de l'hétéro interface entre le silicium cristallin de type n et le silicium amorphe (émetteur) type (p), tandis que l'interface entre le substrat type (n) et le BSF type (n) est considérée comme parfaite (sans défauts). Les sections de capture respectivement d'électrons et de trous sont fixés à $\sigma = \sigma_n = \sigma_p = 10^{-16} \text{cm}^2$. Sur les figures IV-18(a), (b),(c) et (d), nous avons représenté la variation de la tension en circuit ouvert, le facteur de forme et la densité de courant en court-circuit en fonction de la densité d'état d'interface N_{SS} , aussi, nous avons comparé nos résultats avec ceux trouvés dans la littérature [21].

➤ Effet sur les tensions en circuit ouvert V_{oc}

Nous avons remarqué une dégradation remarquable dans la tension en circuit ouvert V_{oc} pour les valeurs de la densité d'état d'interface N_{SS} au-dessus de 10^{11}cm^{-2} voir la figure IV-18 (a). Cette dégradation de V_{oc} est due à l'augmentation de recombinaison à l'interface (discontinuité entre les niveaux de bande. Comme on peut également le voir sur la figure IV-18 (a) de la littérature.

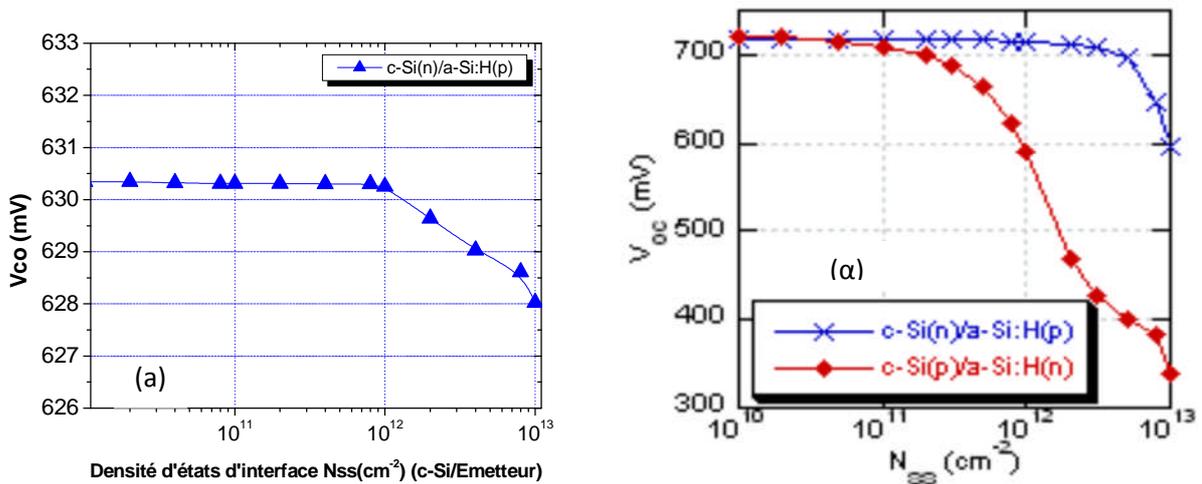


Figure IV-18. (a),(a) Variations de V_{oc} , en fonction de la densité d'états d'interface N_{SS} silicium cristallin type (n)/ émetteur (silicium amorphe.(a) pour la cellule de référence et(a) pour la cellule de littérature[21],(l'hétérojonction de BSF étant libre de défauts d'interface)

➤ Effet sur le facteur de forme FF

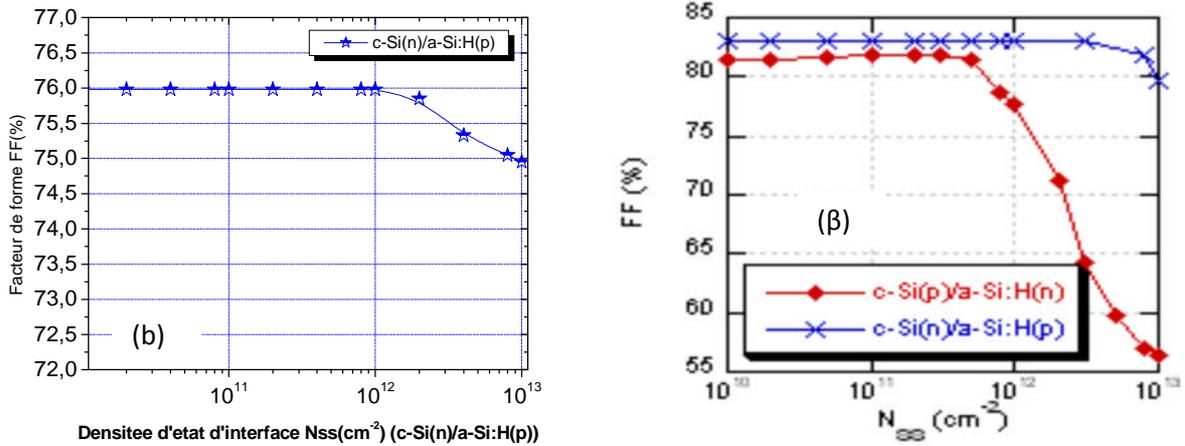


Figure IV-18. (b),(β) Variations du FF, en fonction de la densité d'états d'interface N_{ss} (silicium cristallin type (n)/ émetteur (silicium amorphe)). (b) pour la cellule de référence et (β) pour la cellule de littérature [21], (l'hétérojonction de BSF étant libre de défauts d'interface)

❖ Interprétation des résultats

Nous remarquons aussi que le facteur de forme suit la même tendance, et se dégrade aussi pour les densités d'états d'interface supérieures à 10^{12} (cm⁻²). De même pour la littérature

➤ Effet sur La densité en court-circuit J_{cc} et sur le rendement électrique η

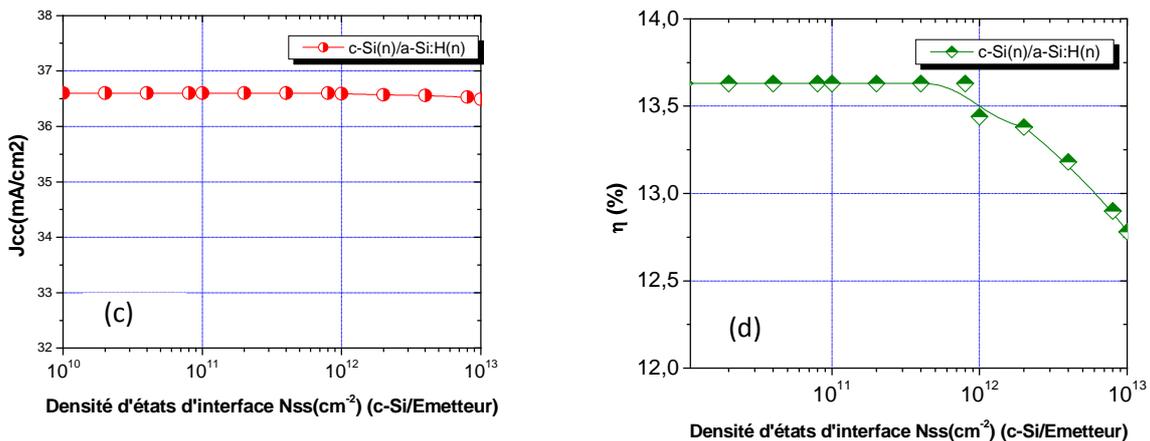


Figure IV-18. (c),(d) Variations de J_{cc} , et η en fonction de la densité d'états d'interface N_{ss} (silicium cristallin type (n)/ émetteur (silicium amorphe)), (l'hétérojonction de BSF étant libre de défauts d'interface)

❖ Interprétation des résultats

Nous remarquons que l'évolution de la densité en court-circuit en fonction de la densité d'état d'interface, N_{ss} reste constante (voir la figure IV-18 (c)). On peut conclure que la présence de défauts à l'interface entre le substrat et l'émetteur n'a pas d'influence sur la densité en court-circuit J_{cc} . Par contre, nous remarquons que le rendement de conversion électrique se dégrade avec la présence de défauts à l'interface c-Si(n)/émetteur(p) voir la figure IV-18 (d).

Synthèse

Finalement on peut conclure que la passivation de l'interface silicium cristallin type n/silicium amorphe (émetteur type p) est très importante pour réussir à augmenter la tension en court-circuit V_{co} (>600mV). Une grande densité de défauts à ces hétéro-interfaces augmente les recombinaisons à travers ces états, ce qui limite les performances de la cellule IBC-SiHJ.

4.4.3 Influence des défauts d'interface c-Si/BSF sur les performances d'une cellule IBC-SiHJ

Dans cette partie d'étude, nous avons introduit les défauts uniquement à l'interface entre le silicium cristallin et le silicium amorphe (c-Si(n)/BSF(n)).

Les hétéro-interfaces(c-Si(n)/émetteur(p)) sont considérées comme parfaites (sans défauts).

➤ Effet sur les tensions en circuit ouvert V_{co}

Une grande densité de défauts à cette interface se traduit par une dégradation des valeurs de V_{co} , comme nous pouvons remarquer sur la figure IV-19 (a). Cette dégradation est cependant beaucoup plus faible que dans le cas où les défauts sont introduits à l'interface silicium cristallin/émetteur (voir la figure IV-19 (a)).

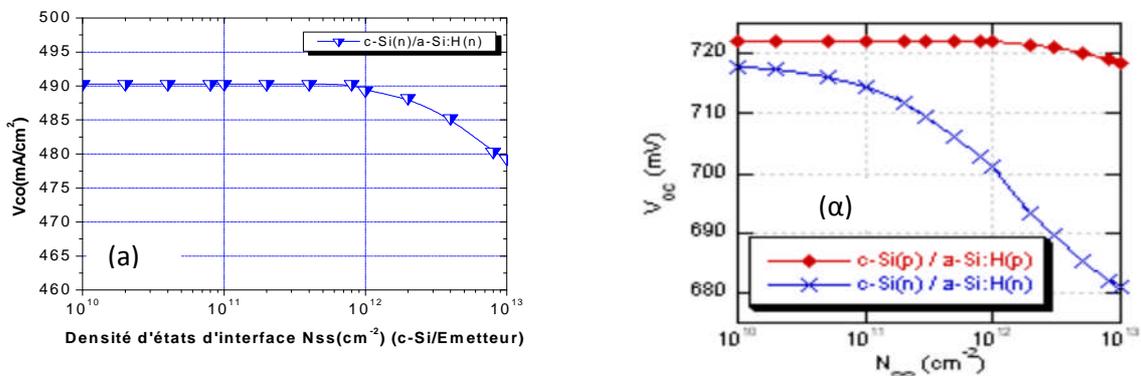


Figure IV-19. (a), (α) Variations de V_{co} , en fonction de la densité d'états d'interface N_{ss} silicium cristallin type (n)/ émetteur (silicium amorphe). (a) pour la cellule de référence et (a) pour la cellule de littérature[21], (l'hétérojonction d'émetteur étant libre de défauts d'interface défauts)

➤ Effet sur La densité en court –circuit J_{cc} et sur le rendement électrique η

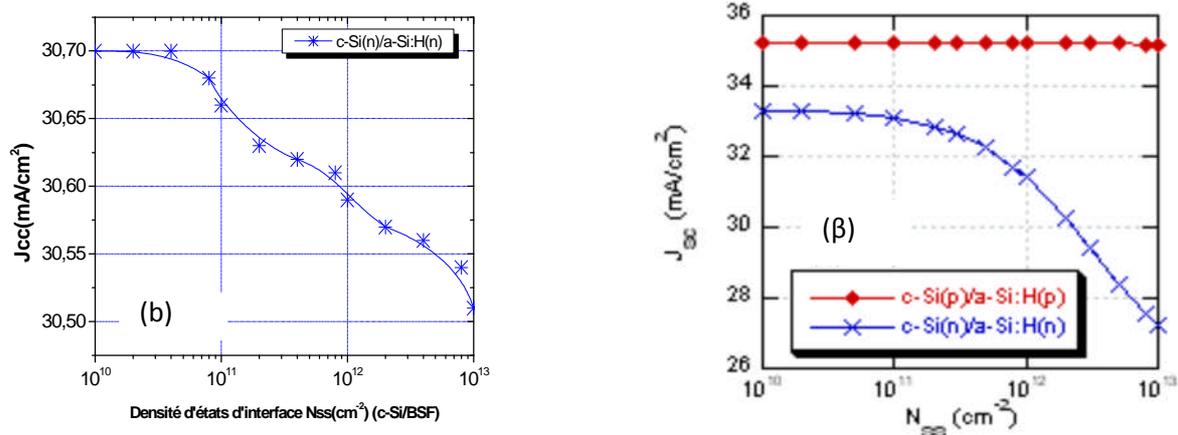


Figure IV-19. (b), (beta) Variations du FF, en fonction de la densité d'états d'interface N_{ss} (silicium cristallin type (n)/ émetteur (silicium amorphe). (b) pour la cellule de référence et (beta) pour la cellule de littérature [21], (l'hétérojonction de BSF étant libre de défauts d'interface)

❖ Interprétation des résultats

Nous notons également sur la figure IV-19 (b) que les défauts d'interface induisent la dégradation de J_{cc} . En comparant les deux types de structures, nous notons aussi que les défauts à l'interface entre le BSF et le silicium cristallin ont un impact plus important sur c-Si (n) car la bande de valence est décalée par rapport à de la bande de conduction.

➤ Effet sur le facteur de forme FF et sur le rendement électrique η

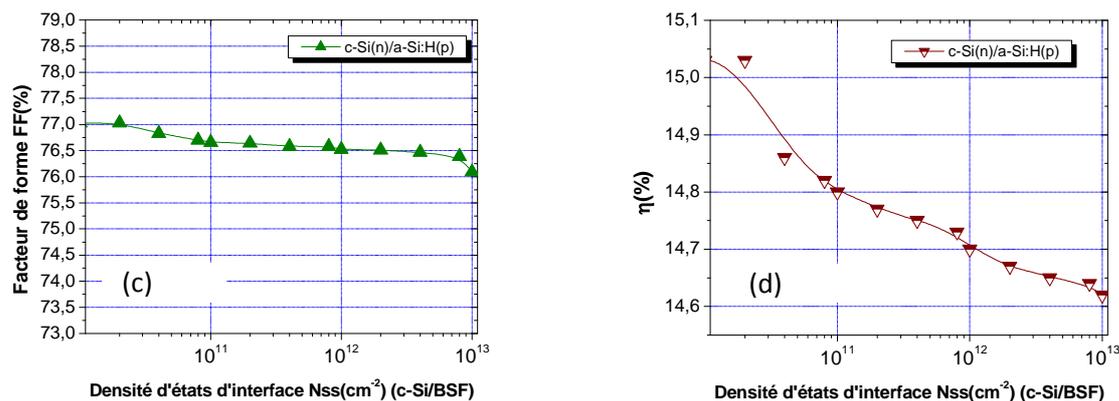


Figure IV-19. (c), (d) Variations de J_{cc} , et le rendement de conversion électrique η en fonction de la densité d'états d'interface N_{ss} (silicium cristallin type (n)/ émetteur (silicium amorphe), (l'hétérojonction de BSF étant libre de défauts d'interface).

La présence de défauts à l'interface entre le silicium cristallin et le BSF créent une dégradation sur le facteur de forme FF, représenté sur la figure IV-19 (c) même si son effet reste faible sur le facteur de forme FF. Cette dégradation atteint aussi le rendement de conversion électrique (voir la figure IV-19 (d)).

- Synthèse

Pour résumer l'effet des défauts d'interface entre le silicium cristallin type n / silicium amorphe type n (BSF), nous pouvons dire d'après l'analyse des résultats obtenus que toutes les performances d'une cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigités IBC-SiHJ (la densité de courant de court-circuit J_{cc} , tension en circuit ouvert V_{co} , facteur de forme FF et rendement de conversion électrique η se dégradent en présence d'une forte densité de défauts à l'interface (c-Si /BSF) hétéro-interface. C'est pourquoi intervient la nécessité d'une bonne passivation de toute l'interface (c-Si/a-Si: H) afin d'optimiser le rendement d'une cellule solaire IBC-SiHJ.

4.4.4 Influence des sections de capture des électrons σ_n , et des trous, σ_p

La recombinaison à l'interface silicium cristallin/silicium amorphe augmente par la présence des défauts, notamment de la présence des sections transversales de capture d'électrons (σ_n) ou des trous (σ_p), comme on peut le voir sur l'équation. (IV-45, IV-46) décrit plus haut.

4.4.4.1 Etude de l'influence σ_n et σ_p de l'interface substrat (n) / émetteur (p)

Pour cette étude, nous avons fixé les défauts à l'interface N_{ss} à $5 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$, tandis que l'interface substrat (n)/BSF(n) est considérée comme parfaite sans défauts. Puis nous allons faire varier σ_n ou σ_p de 10^{-16}cm^2 à 10^{-14}cm^2 , afin de comparer nos résultats avec ceux de la littérature [21] (σ_n ou σ_p , respectivement) étant fixés à 10^{-15}cm^2 . Cet intervalle correspond à la plupart des valeurs possibles de sections efficaces de capture trouvés dans la littérature [21]. La figure IV-20 (a),(α) montre la variation de V_{co} suivant cette approche.

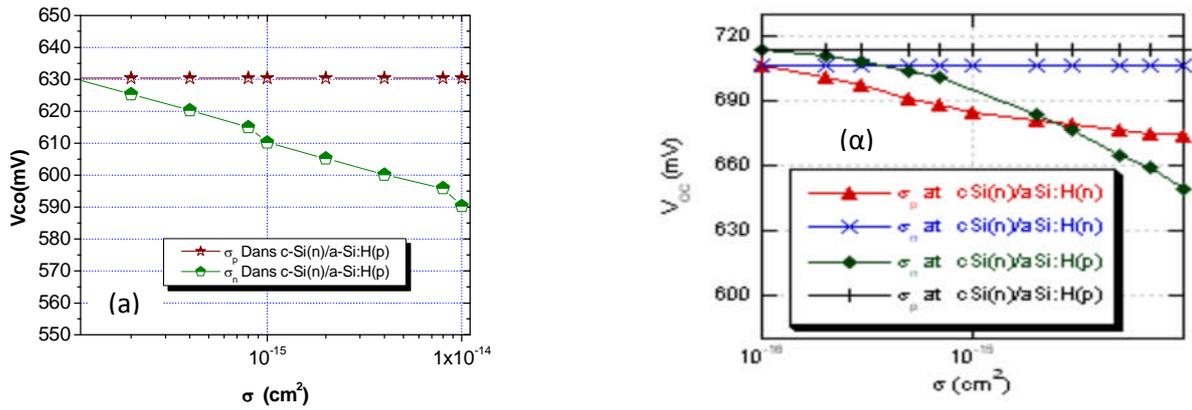


Figure IV-20. (a),(a) Evolution des V_{co} en fonction soit de la section efficace de capture des électrons, σ_n , ou la section efficace de capture des trous, σ_p , (l'autre section efficace de capture est fixé à 10^{-15} cm^2) de chaque hétéro-interface (a) de la cellule de référence de type n. Dans tous les cas, $N_{SS}=5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ à l'hétéro-interface indiquée. (a) littérature [21]

❖ Interprétation des résultats

Nous avons remarqué à l'interface c-Si (n) /a-Si:H(p) hétéro-interface, que σ_n a un effet sur la tension en circuit ouvert V_{co} tandis que σ_p n'a pas d'influence sur V_{co} ; elle reste constante. Nous avons une couche d'inversion forte à la surface du silicium cristallin c-Si. Plus σ_n est grande, plus elle provoque une augmentation de la recombinaison suggérée par l'équation. (IV-45 ; IV-46) expliquant la diminution observée sur V_{co} . [39][40]

4.4.4.2 Etude de l'influence σ_n et σ_p du l'interface substrat(n)/BSF(n)

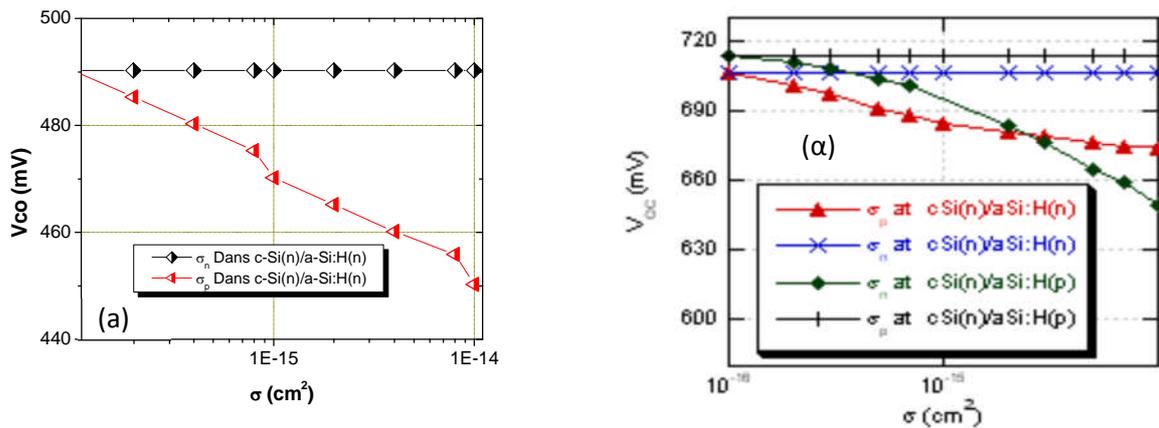


Figure IV-21 (a),(a). Evolution des V_{co} en fonction soit de la section efficace de capture des électrons, σ_n , ou la section efficace de capture des trous, σ_p , (l'autre section efficace de capture est fixé à 10^{-15} cm^2) de chaque hétéro-interface (a) de la cellule de référence de type n. (a) littérature [21]

❖ Interprétation des résultats

Au niveau de l'interface substrat(c-Si (n))/BSF (a-Si: H(n)) l'hétéro-interface, σ_p a un effet sur la tension en circuit ouvert V_{co} mais σ_n cette fois, elle n'a aucune influence sur V_{co} . Nous avons une accumulation d'électrons à l'hétéro-interface. Avec une grande σ_p , la recombinaison à des états d'interface qui augmentent comme le suggère les équations (IV-44 ; IV-45) de la diminution observée des V_{co} .

4.5 Optimisation géométrique et physique de la face arrière d'une cellule photovoltaïque (IBC-SiHJ) (structure IBC-SiHJ avec couche intrinsèque)

La géométrie de la face arrière est un paramètre très important dans l'étude d'une cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigitée (IBC-SiHJ). La géométrie arrière se compose d'une couche intrinsèque (i-a-Si: H) sur laquelle on a déposé l'émetteur (a-Si: H dopé p) et le BSF (a-Si: H dopé n) d'une façon interdigités. La largeur de l'émetteur ($L_{émetteur}$), et celle du BSF (L_{BSF}), sont séparées par un espacement appelé Gap (L_{Gap}), bien expliqué plus haut, au-dessous de tous ces paramètres (largeur, épaisseur) des différentes couches intrinsèques, émetteur et BSF peuvent avoir un impact sur les cellules solaires à contacts arrière interdigités (IBC-SiHJ) et c'est le but de l'étude de cette partie.

4.5.1 Etude de l'intérêt de la couche intrinsèque de la face arrière sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ

Pour vous faire voir la différence et pour vous montrer la forme 'S' localisée sur la courbe I(V) due à la présence de la couche intrinsèque, on a utilisé une couche intrinsèque de 50 nm tandis que dans notre étude sur la cellule de référence, l'épaisseur de la couche intrinsèque est de 10nm très fine et ce qui explique les bons résultats obtenus au cours de cette étude.

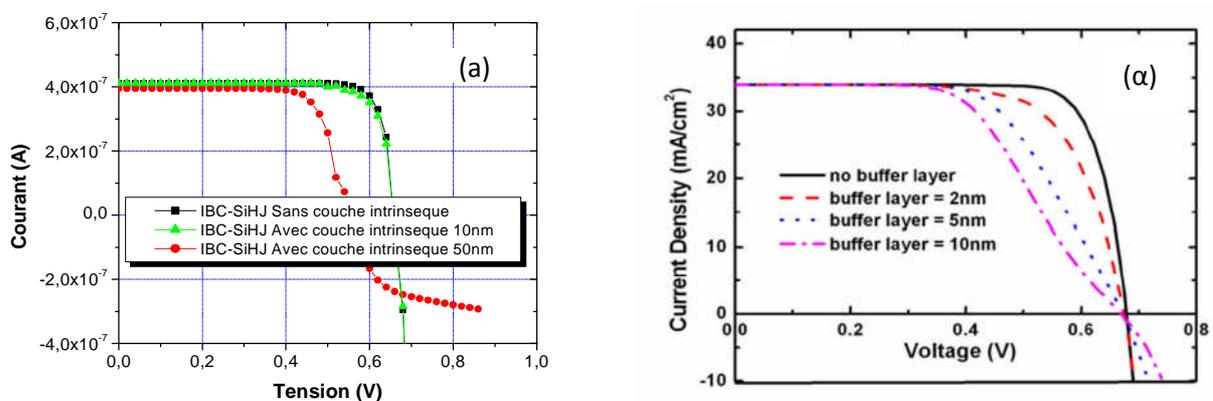
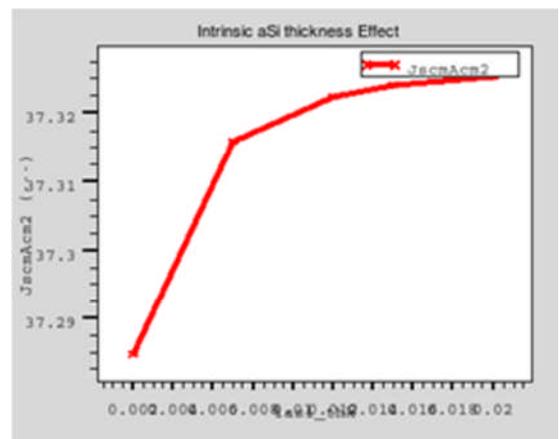
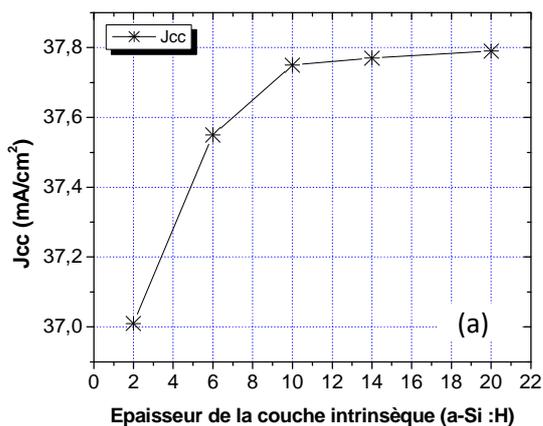


Figure IV-22. (a),(b) Caractéristiques I(V) d'une cellule IBC-SiHJ sans et avec couche intrinsèque ($E_{i-a-Si}=10nm$, $E_{i-a-Si}=50nm$)(a) ; littérature (α)[36]

❖ Interprétation des résultats

Le résultat expérimental extrait de la littérature [36] présenté sur la figure IV-22(α) montre que le dépôt d'une couche intrinsèque de silicium amorphe (a-Si :H), couche tampon sur toute la surface arrière de la cellule solaire à contacts arrière interdigués à hétérojonction (IBC-SHJ) et améliore la passivation de la surface arrière, ce qui conduit à une amélioration de tension en circuit ouvert V_{co} notamment dans la densité en court-circuit J_{cc} , à une seule condition que cette couche soit très fine quelques nm. Dans cette étude, nous avons pu déterminer numériquement des résultats similaires à ceux obtenus déjà expérimentalement (voir la figure IV-22(a)), la présence de la couche intrinsèque améliore la tension en circuit ouvert ainsi que la densité en court-circuit J_{cc} mais une augmentation dans l'épaisseur de la couche intrinsèque crée une dégradation dans le facteur de forme (FF), ce qui est démontré clairement sur les figures IV-23 (a ;b et c) pour la courbe qui caractérise la variation de rendement de conversion électrique à un optimum à l'épaisseur $E_{i-a-Si} = 10nm$ de 20.47% (voir la figure IV-23 (d)). Par conséquent, les simulations sont également effectuées pour guider les expériences afin d'améliorer le facteur de forme FF. Il a été constaté à partir du résultat expérimental une dégradation dans le facteur de forme FF avec une forme de "S" qui apparaît uniquement sur la courbe I(V) en présence de la couche de silicium amorphe intrinsèque i-a-Si épais d'où la seule solution est de diminuer l'épaisseur de la couche tampon.



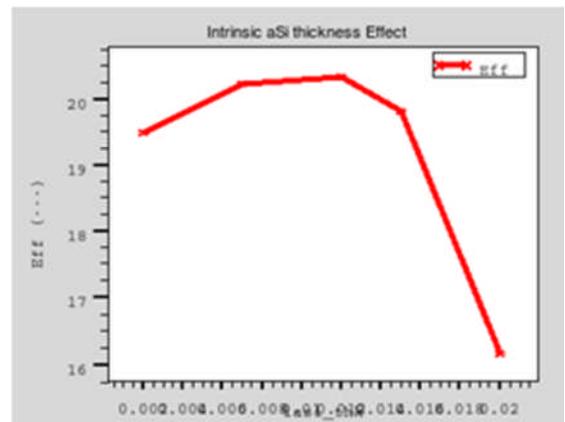
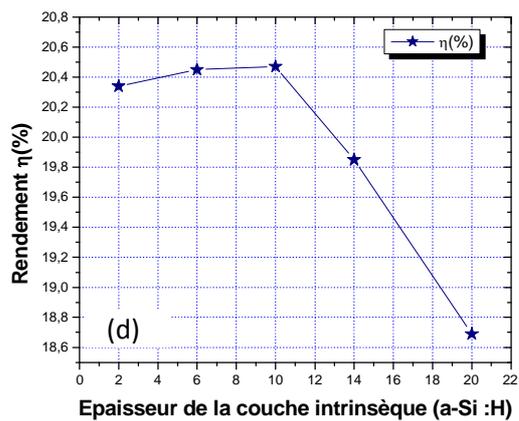
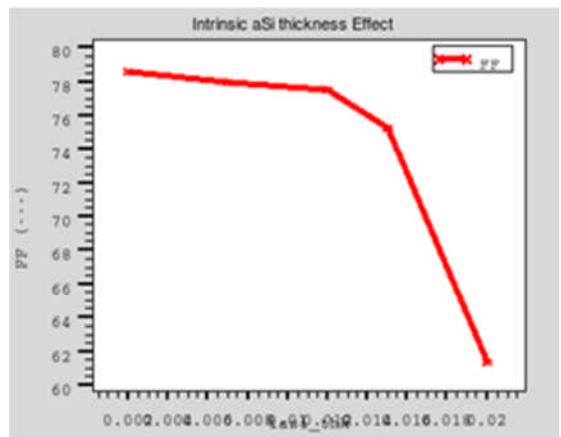
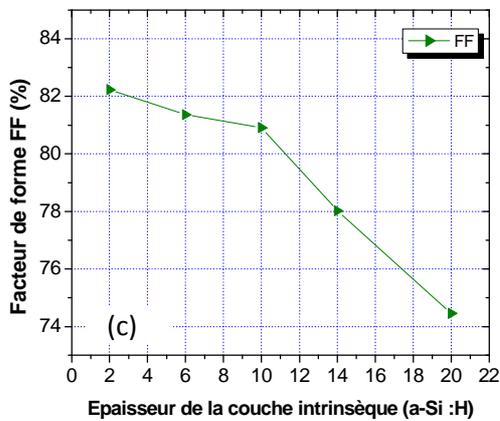
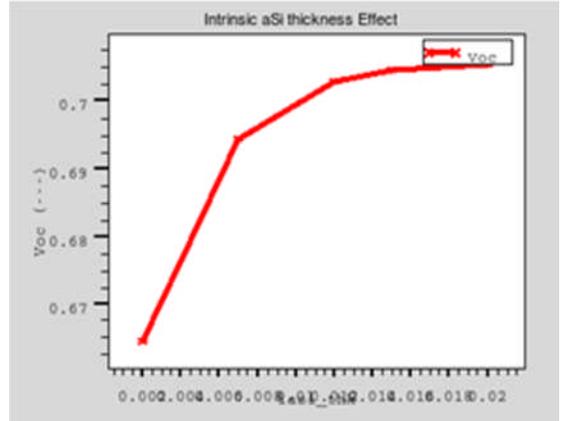
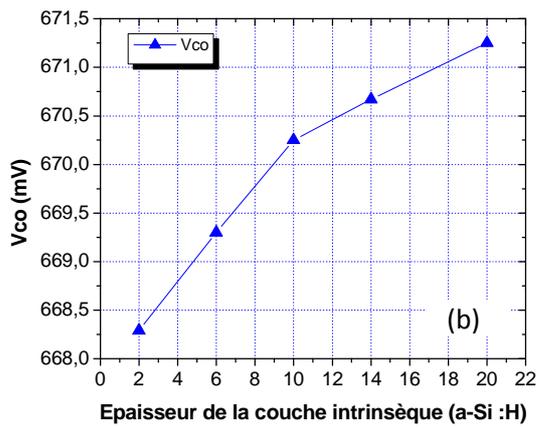


Figure IV-23. (a),(b) ,(c),(d) Evolution de V_{oc} (a), du J_{cc} (b), du FF (c) et du rendement η (d) de la cellule IBC-SiHJ en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque (i-a-Si), à gauche résultats de la littérature[20][21][41][42]

4.5.2. Etude de l'influence de l'épaisseur, de la largeur de l'émetteur (*a*-Si:H(p)) et du dopage de l'émetteur sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ

4.5.2.1 Variation de l'épaisseur de l'émetteur

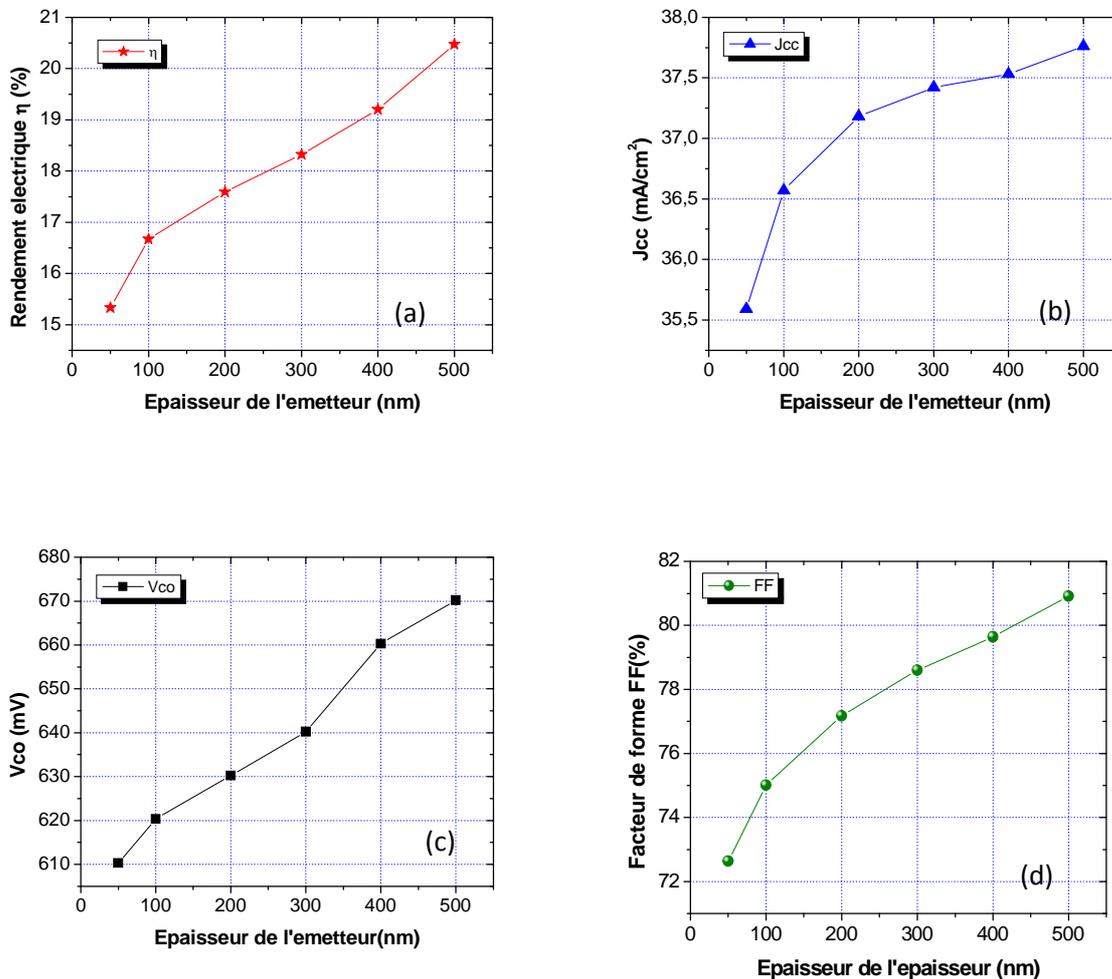


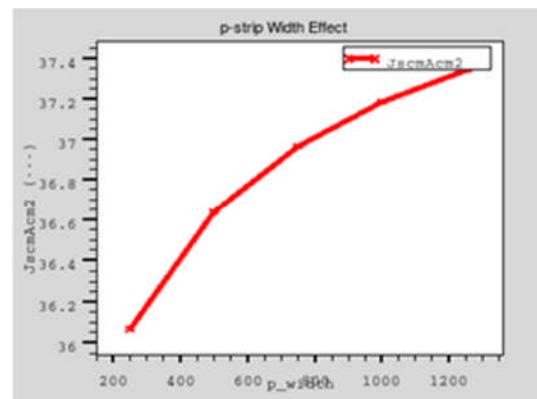
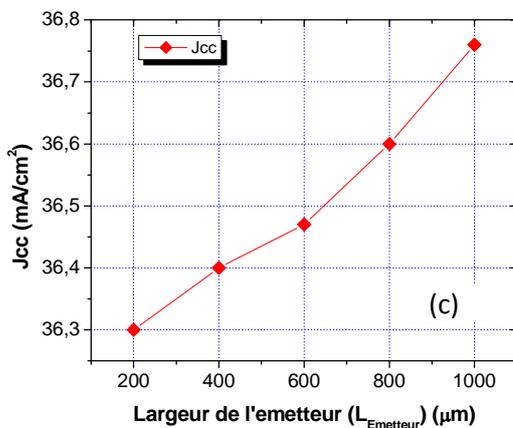
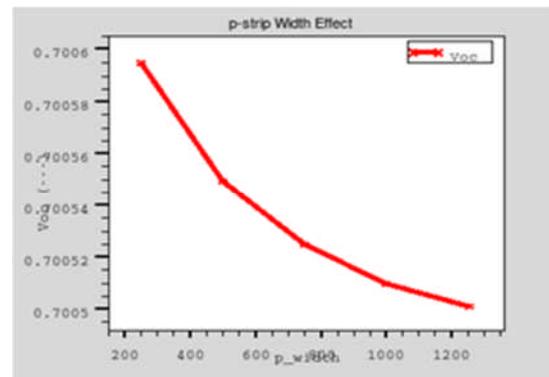
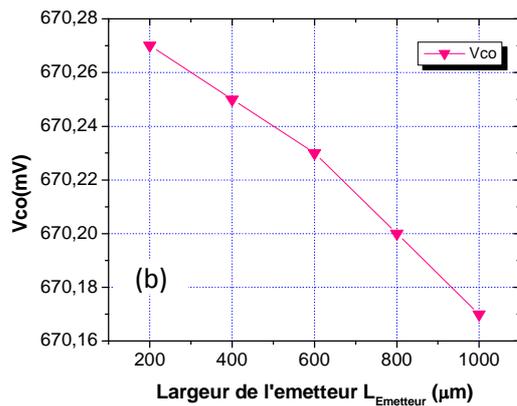
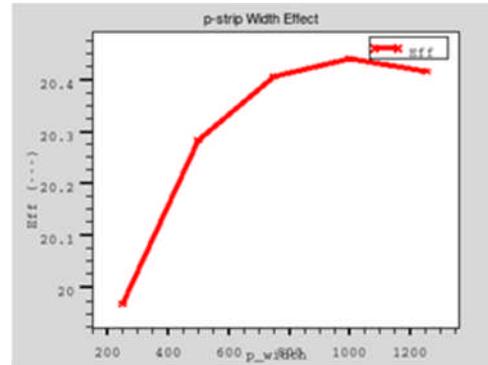
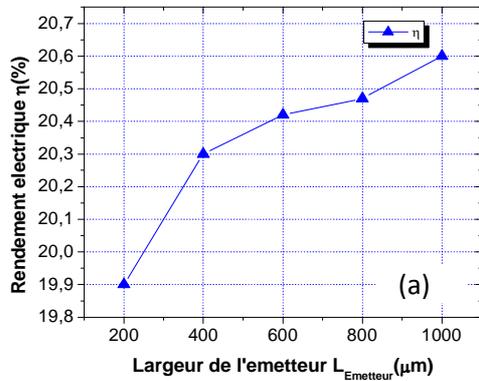
Figure IV-24. (a, b, c, d) Evolution du rendement(a), du J_{cc} (b), V_{co} (c) et de FF en fonction de l'épaisseur de l'émetteur pour un substrat (n-Si).

❖ Interprétations des résultats

Avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur, on observe une amélioration des caractéristiques de la cellule (pour une épaisseur de l'émetteur comprise entre 50nm et 500nm). De plus, la décroissance du rendement pour un émetteur peu profond a une corrélation avec la variation de V_{CO} . Par contre, pour un émetteur épais (>300nm), l'amélioration du rendement correspond à l'augmentation de J_{CC} . On peut constater également, que la dépendance avec I_{cc} de l'épaisseur de l'émetteur est assez faible.

4.5.2.2 Variation de la largeur de l'émetteur

Pour étudier l'influence de la largeur de l'émetteur, nous avons fait varier la largeur de cette dernière L_{emetteur} tout en maintenant constant l'écart entre les contacts émetteur et BSF ainsi que la largeur du BSF. La figure IV-25 représente les résultats de la simulation :



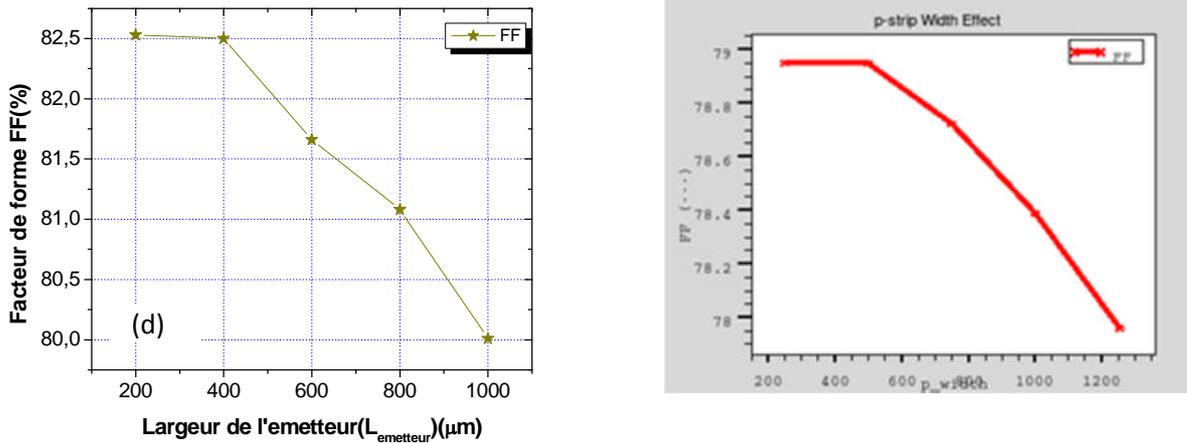


Figure IV-25. (a,b,c,d) Evolution courant de court-circuit J_{cc} (a), du facteur de forme FF (b), du rendement (c) et de la tension de circuit ouvert V_{co} (d) de la cellule IBC-SiHJ en fonction de la largeur de l'émetteur pour un substrat a-Si(n), à gauche les résultats de littérature [20][21][41][42]

❖ *Interprétations des résultats*

En augmentant la largeur de l'émetteur, nous avons remarqué que la variation de cette dernière n'a pas d'influence très importante sur le rendement (0.7%) de la cellule IBC-SiHJ au moment où l'émetteur est plus large que le BSF et que l'espacement entre les contacts se maintient petits (voir la figure IV-25 (a)). On observe aussi une tension de circuit ouvert qui reste constante (voir la figure IV-25 (b)). En même temps, le courant de court-circuit s'améliore (amélioration de la J_{cc}) avec l'augmentation de la largeur de l'émetteur, (voir la figure IV-25 (c)) car avec elle, les porteurs minoritaires photos générés dans le substrat cristallin (c-Si) situés au-dessus de l'émetteur n'ont aucune distance latérale supplémentaire à parcourir pour atteindre l'hétérojonction n-p. Au contraire, les porteurs majoritaires ont une distance latérale supplémentaire à voyager avant qu'ils ne puissent être collectés au contact de BSF. Nous avons pu observer aussi que le facteur de forme se dégrade avec l'augmentation de la largeur de l'émetteur (voir figure IV-25 (d)).

4.5.2.3 Variation du dopage de l'émetteur

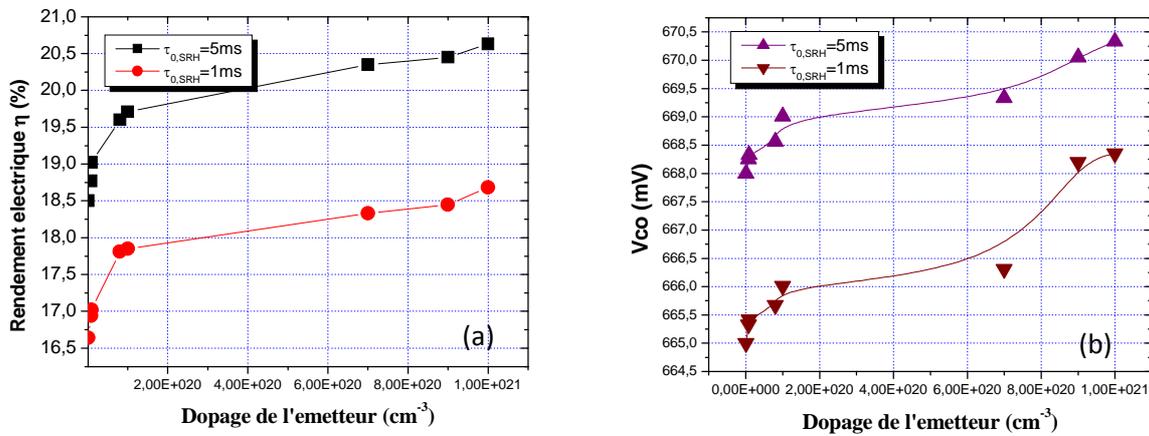


Figure IV-26 (a),(b) Evolution du rendement η (a) et de la tension de circuit ouvert de la cellule (b) en fonction du dopage de l'émetteur différentes durées de vie(5ms,1ms).

➤ *Interprétations des résultats*

Nous avons remarqué sur la figure IV-26 (a) que malgré le niveau de dopage de l'émetteur assez élevé il n'y a pas de dégradation du rendement de la cellule solaire de l'émetteur. L'emplacement de l'émetteur sur la face arrière de la cellule et de sa faible épaisseur (par rapport à l'épaisseur de la cellule). La densité de courant en court-circuit J_{cc} varie donc très peu en fonction du dopage de l'émetteur. Par contre, l'élévation du niveau de dopage de l'émetteur augmente la hauteur de la barrière de potentiel de l'hétérojonction n-p. Cela entraîne une augmentation de la tension en circuit ouvert V_{co} (voir la figure IV-26 (b)).

4.5.3 Etude de l'influence de l'épaisseur, de la largeur du BSF (a-Si:H(n)) et du

dopage du BSF sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ :

Nous avons réalisé la simulation de la cellule solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigités IBC-SiHJ afin d'analyser l'influence du BSF sur les caractéristiques de la cellule.

4.5.3.1 Variation de l'épaisseur du BSF

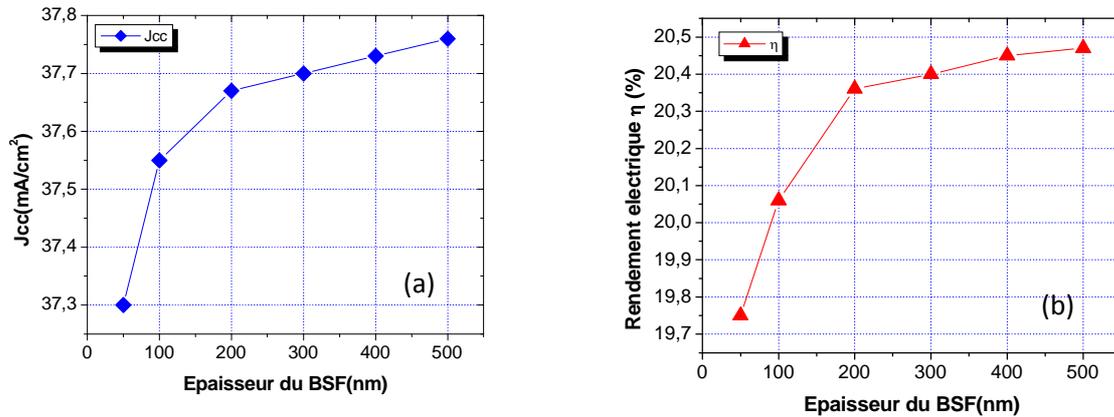


Figure IV-27. (a,b) Evolution du courant en court-circuit J_{cc} (a) et du rendement de conversion électrique (b) en fonction de l'épaisseur du BSF

❖ Interprétations des résultats

Avec l'augmentation de l'épaisseur du BSF, on observe une amélioration dans la densité de courant de court-circuit J_{cc} (voir la figure IV-27 (a)), notamment dans le rendement de conversion électrique η (voir la figure IV-27 (b)) (pour une épaisseur de l'émetteur comprise entre 50nm et 500nm).

4.5.3.2 Variation de la largeur du BSF

Pour étudier l'influence de la largeur de la BSF, nous avons fait varier la largeur du BSF (L_{BSF}) tout en maintenant constant l'espacement entre les contacts, et la largeur de l'émetteur. En augmentant la largeur de la BSF, on aura les courbes présentées sur les figures IV-28 (a,b,c,d)

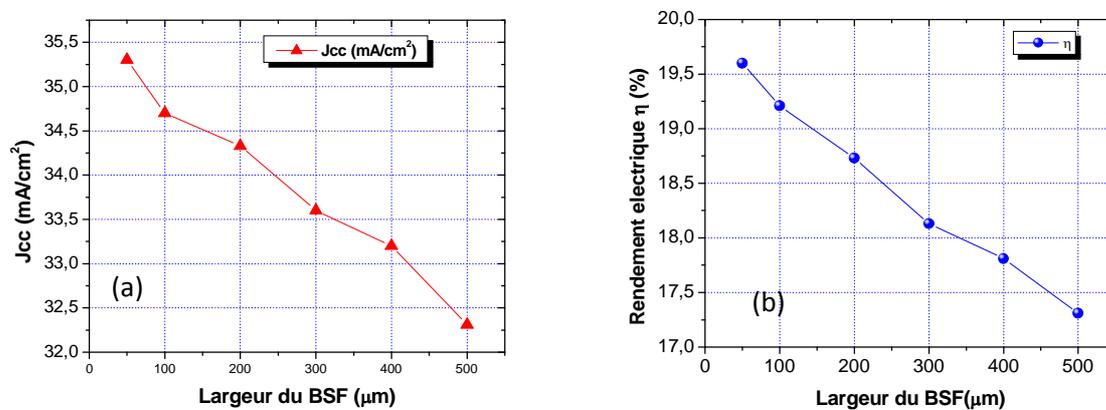


Figure IV-28. (a,b) Evolution du courant en court-circuit J_{cc} (a) et du rendement de conversion électrique (b) en fonction de la largeur du BSF

❖ *Interprétations des résultats*

L'augmentation de la largeur de BSF entraînera une diminution de la densité en court-circuit J_{cc} comme nous pouvons le voir sur la figure IV-28 (a) et cela est due aux porteurs minoritaires photos-générés et qui voyagent sur une distance plus grande avant d'atteindre l'hétérojonction n-p l'émetteur : ce qui augmentera la probabilité de recombinaison du BSF et devrait être aussi étroite que possible pour atteindre les meilleures valeurs de J_{cc} . Sur la courbe de la figure IV-28 (b), on voit la même tendance : décroissance du rendement pour une augmentation de la largeur du BSF car la région du BSF présente une surface de recombinaison pour les porteurs minoritaires.

4.5.3.3 Variation du dopage du BSF

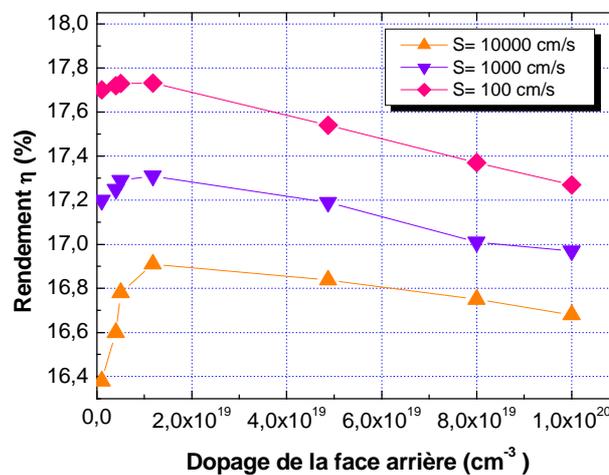


Figure IV-29. Evolution du rendement de conversion électrique en fonction du dopage du BSF, avec différentes vitesses de recombinaisons

❖ *Interprétations des résultats*

L'augmentation du niveau de dopage dans le BSF donne une amélioration importante de toutes les caractéristiques de la cellule IBC-SiHJ. Comme pour l'émetteur, avec une faible vitesse de recombinaison (100cm/s) dans le BSF, le rendement s'améliore et c'est le cas réellement de recombinaison vu l'emplacement du BSF et sur la face arrière de la cellule IBC-SiHJ. De plus, un BSF fortement dopé permet de réduire la recombinaison au niveau du contact métal semi-conducteur. Pour justifier cette conclusion, nous avons examiné l'évolution du rendement dans la cellule solaire interdiguée IBC-SiHJ en fonction du dopage (voir la figure IV-29). Nous avons remarqué que dans le cas d'un «fort» BSF (région fortement dopée) tous les électrons sont pratiquement repoussés par le BSF du contact au

substrat. Par contre, dans le cas du «faible» BSF (région faiblement dopée), les électrons générés au-dessus du contact du substrat rentrent dans le contact p⁺ et non dans l'émetteur. Aussi avec une recombinaison plus importante sur la face arrière (BSF) à cause de la distance latérale supplémentaire que les porteurs minoritaires traversent (voir la figure IV-29).

4.5.4 Influence de l'espacement entre les contacts (émetteur et le BSF) (Gap) sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ :

Dans ce cas, nous avons fixé l'épaisseur du substrat, de l'émetteur et celle du BSF puis nous avons fait varier la largeur de l'espace qui sépare les contacts interdigités souvent appelés par le terme «Gap ». Comme dans le cas précédent, nous avons recalculé le courant de court-circuit pour tenir compte de la variation de la largeur totale de la cellule.

Ces simulations avec différentes « gap » ont été réalisées pour étudier la possibilité d'améliorer la densité de courant Jcc lorsque l'écart entre contacts est réduit dans la structure IBC-SHJ. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV-13. En outre l'influence de l'écart est illustrée sur la figure IV-30 par la caractéristique de sortie I(V). Plus détaillée, l'influence du gap sur la tension en circuit ouvert Vco, la densité de courant Jcc, le facteur de forme, enfin le rendement de conversion électrique η (voir le tableau IV-13) ainsi que la figure IV-31.

Tableau IV-13 Résultats de la variation de la distance entre l'émetteur et BSF (Gap)

Pitch1125	Voc(mV)	Icc(A)	Jcc(mA/cm²)	FF(%)	η(%)
Gap75	670.25	4.249*10⁻⁷	37.76	80.91	20.47
Gap150	670.27	4.245*10 ⁻⁷	37.73	79.88	20.20
Gap 225	670.32	4.241*10 ⁻⁷	37.70	79.32	20.04
Gap 300	671.28	4.238*10 ⁻⁷	37.67	78.64	19.88
Gap 375	674.16	4.235*10 ⁻⁷	37.64	77.52	19.67
Gap 450	676.85	4.233*10 ⁻⁷	37.62	76.75	19.53

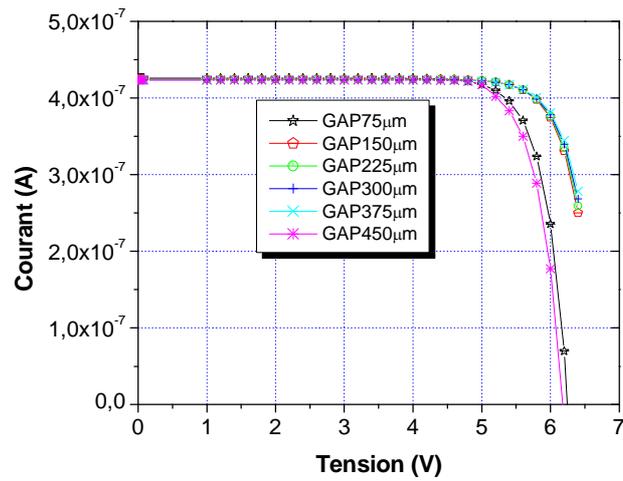
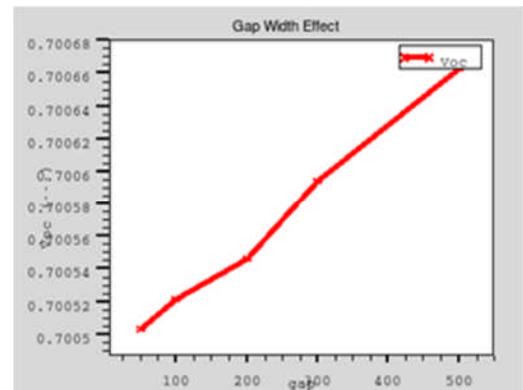
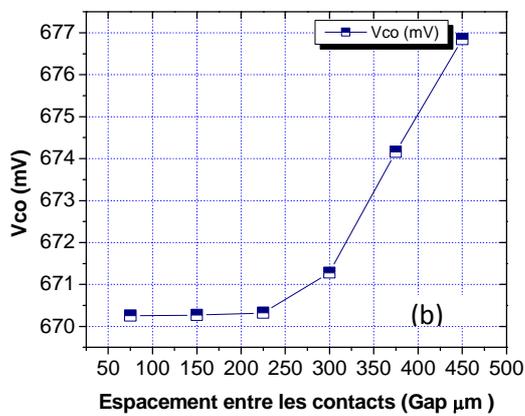
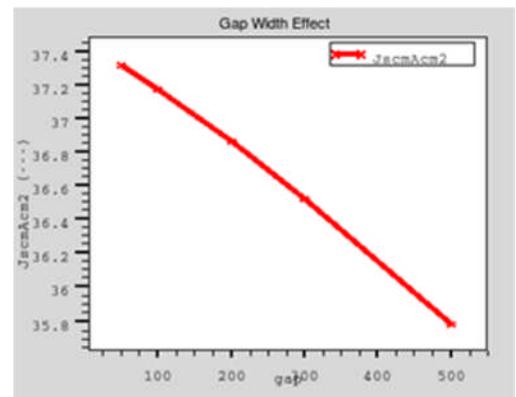
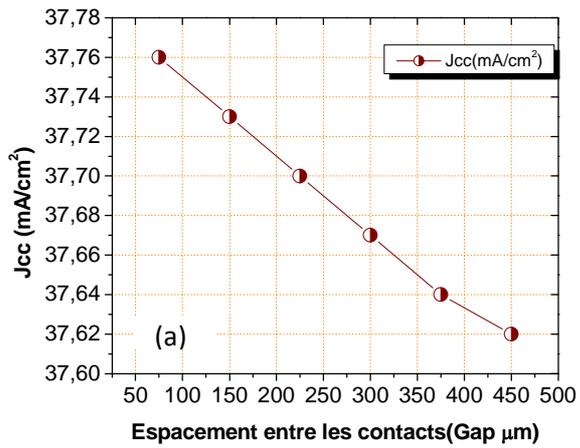


Figure IV-30. Caractéristiques $I(V)$ d'une cellule IBC-SiHJ pour différents Gap



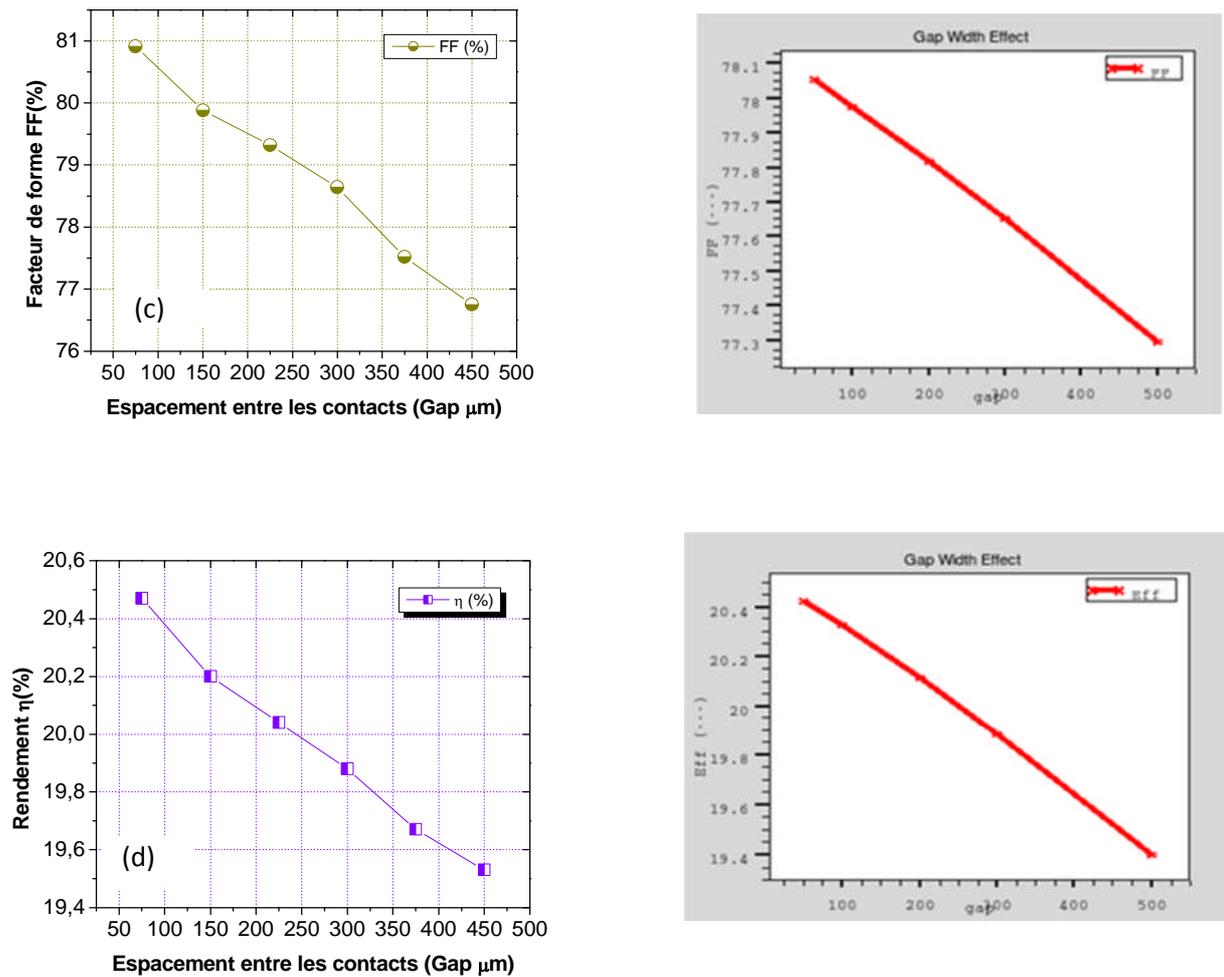


Figure IV-31. Evolution de la tension de circuit ouvert(a), du courant de court-circuit(b), facteur de forme(c) et du rendement de la cellule IBC-SiHJ(d) en fonction de l'espacement entre les contacts(Gap).à gauche résultats de la littérature[20],[21]

➤ *Effet sur la tension en circuit ouvert V_{co}*

Sur la figure IV-31 (a), nous remarquons que la tension en circuit ouvert V_{co} varie légèrement au début (670-670.5mV) avec l'augmentation de la distance entre l'émetteur et le BSF mais au-delà de 250 μm; l'augmentation de V_{co} devient notable. Nous pouvons donc conclure que l'espacement entre les contacts a une influence importante sur V_{CO} .

➤ *Effet sur la densité de courant en court-circuit J_{cc}*

Tandis que sur la figure IV-31 (b), nous avons constaté que la densité de courant (J_{cc}) diminue de 37,76 à 37,60 mA/cm² avec l'augmentation de l'espacement entre les contacts.

➤ *Effet sur le facteur de forme FF*

La figure IV-31 (c), démontre que le facteur de forme FF diminue de 80,91% à 75,76% lorsque l'espacement augmente de 75 à 500 μ m. Nous concluons donc, que la largeur entre le BSF et l'émetteur ont une influence significative sur la valeur du facteur de forme.

➤ *Effet sur le rendement de conversion électrique η*

Sur la figure IV-31 (d), l'influence de l'espacement entre les contacts a une influence notable sur le rendement électrique, une décroissance du rendement pour une augmentation de la largeur du BSF ou de l'espacement entre les contacts. Le rendement atteint une valeur maximale de 20,47% seulement si l'écart est aussi fin que possible. La région (espacement entre les contacts) présente une surface recombinante pour les porteurs minoritaires. En augmentant la largeur de cette région, on a une recombinaison plus importante sur la face arrière. De plus, ils représentent une distance latérale supplémentaire à traverser pour les porteurs minoritaires. Alors, la largeur de l'espacement entre les contacts doit être la moins large possible et l'allure de cette caractéristique se rapproche de celle trouvée dans la littérature [22].

4.5.5 Synthèse de cette partie

Pour conclure cette étude de modélisation, plusieurs aspects importants sont à considérer dans l'optimisation de la face arrière d'une cellule IBC Si-HJ :

Il apparaît d'abord que la géométrie du contact sur le BSF joue un rôle limité et ce, quel que soit le dopage du a-Si:H (n) utilisé. Il est donc possible de laisser une grande partie de cette zone sans contact.

Le rôle du BSF étant de collecter les électrons (porteurs majoritaires), il peut être aidé par le substrat pour remplir cette fonction.

L'émetteur doit collecter les porteurs minoritaires sans l'appui du substrat c-Si. Si l'émetteur a-Si:H (p) est contacté localement, il doit être fortement dopé pour éviter les pertes résistives, mais également les pertes en courant. Un émetteur faiblement dopé, comme c'est le cas, il doit être recouvert quasi-totalement par son contact [22]. Une mauvaise conception de l'émetteur entraîne des pertes importantes à la fois sur la valeur du J_{cc} mais également sur celle du facteur de forme FF des cellules IBC- Si-HJ.

4.6 Etude de l'influence du coefficient de réflexion sur les performances d'une cellule photovoltaïque IBC-SiHJ :

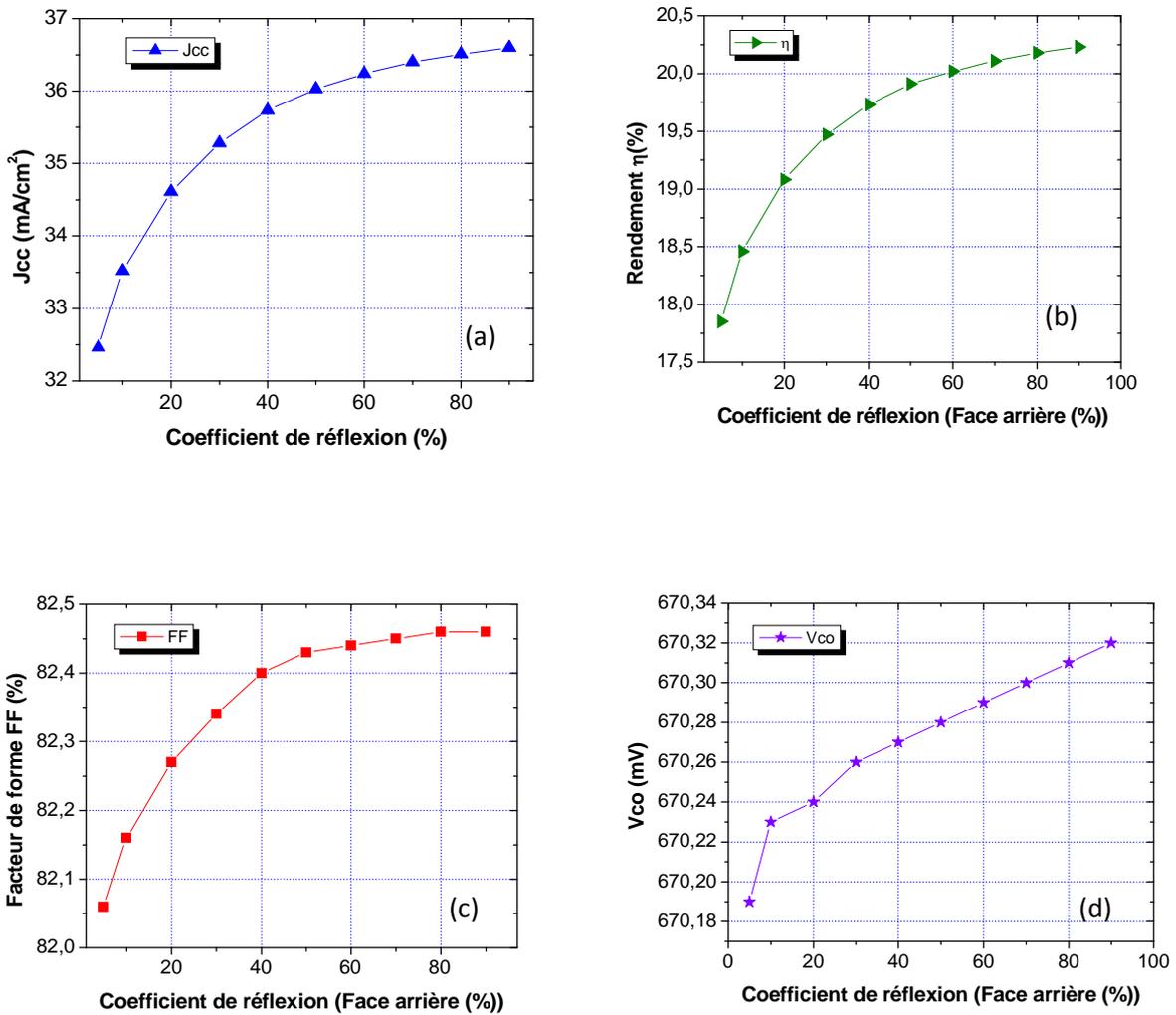


Figure IV-32. (a), (b), (c), (d) Evolution du J_{cc} (a), η (b), de FF (c) et de V_{co} (d), de la cellule IBC-SiHJ en fonction du coefficient de réflexion en face arrière.

❖ Interprétations des résultats

L'évolution du coefficient de réflexion en face arrière entraîne une augmentation de la densité en court-circuit J_{cc} comme nous pouvons le voir sur la figure IV-32 (a) : cette augmentation du coefficient de réflexion en face arrière diminue les pertes par réflexion, ce qui augmente la densité de porteurs de charges qui vont participer à la conduction électrique. Sur la courbe de la figure IV-32 (b), on voit la même tendance : une amélioration du rendement pour une augmentation du coefficient de réflexion. L'amélioration atteint aussi le

facteur de forme (voir la figure IV-32 (c)) mais l'influence sur la tension en circuit ouvert reste légère autour de 670mV (voir la figure IV-32 (d)).

Donc on pourra conclure que le coefficient de réflexion en face arrière a une influence notable sur les performances d'une cellule IBC-SiHJ.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'influence des différents paramètres d'une cellule solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigités sur les performances de la cellule IBC-SiHJ (tension en circuit ouverts V_{co} , densité de courant en court-circuit J_{cc} , facteur de forme FF et rendement de conversion électrique η) à l'aide de la simulation numérique en deux dimensions 2D (Atlas/Silvaco). Nous réalisons une optimisation des différents paramètres géométriques et physiques afin d'atteindre un rendement maximum.

Dans une première partie, l'étude a permis de démontrer l'importance de choix de la largeur de la structure élémentaire (pitch) ainsi que l'espacement entre contacts (gap) où on a pu trouver un optimum dans le rendement de conversion électrique η pour un pitch de 1125 μ m et un gap de 75 μ m. C'est un résultat réalisable expérimentalement par sérigraphie donc cela exprime la réalité technologique en tenant compte des limites imposées par la technique de sérigraphie.

La simulation numérique montre dans une deuxième partie que la structure à hétérojonction à contacts arrière interdigités IBC-SiHJ nécessite l'utilisation d'un substrat de bonne qualité électronique où la durée de vie des porteurs minoritaires doit être supérieure à 1ms et une épaisseur inférieure à 250 μ m. Et suite à ces simulations, nous avons étudié l'influence du rapport de longueur de diffusion sur l'épaisseur du substrat. L'utilisation d'un rapport L_d/W supérieur ou égal à 2 permet d'augmenter le rendement de la cellule IBC-SiHJ. A cause de l'emplacement des contacts ohmiques sur la face arrière de la cellule solaire IBC-SiHJ, la plupart des porteurs photo-générés doivent traverser tout le substrat pour être collectés. Dans la troisième partie, nous avons étudié la face avant de la cellule en fonction des différents paramètres de la structure où nous avons démontré que les cellules solaires IBC-SiHJ sont beaucoup plus sensibles à la recombinaison en face avant. L'étude de la simulation montre que le rôle du FSF est important. A travers des tests, nous avons constaté qu'en absence du FSF, la vitesse de combinaison devient extrêmement cruciale sur le rendement de conversion. La recombinaison en surface et la longueur de diffusion sont donc l'un des paramètres clés pour l'optimisation de la cellule solaire IBC-SiHJ. Nous nous sommes aussi intéressés à l'influence de la face avant en utilisant une double couche antireflet

qui permet d'obtenir des meilleurs résultats de rendement de conversion. Par conséquent, une bonne passivation de la surface avant que l'arrière sont nécessaires pour avoir un bon rendement. C'est le sujet de la quatrième partie où l'intégration d'une couche intrinsèque à l'arrière de la cellule entre le substrat (c-Si) et l'émetteur (silicium amorphe (a-Si(p))) ainsi que le BSF (silicium amorphe (a-Si(n))). Elle assure la passivation mais cette couche doit être d'ordre de 10nm afin que son influence sur le facteur de forme soit négligeable. Dans la cinquième partie, nous avons essayé d'optimiser la géométrie de la face arrière, celle de l'émetteur, par une étude de la variation de sa largeur, son épaisseur et le dopage. Ensuite, nous avons repris cette même étude pour le BSF. La largeur de l'émetteur doit être plus grande que celle du BSF. Finalement nous avons étudié l'influence de coefficient de réflexion. Nous déduisons ainsi les conditions optimales pour atteindre des rendements de conversion satisfaisants ($> 20.47\%$).

Références Bibliographiques du chapitre IV

- [1] User's manual for ATLAS from Silvaco International, version 5. 12.1
- [2] D. Krulic. « **Techniques électro analytiques à potentiel imposé** ». université pierre et marie curie . Laboratoire liquides ioniques et interfaces chargées – LI2C Pôle électrochimie Paris, (2005).
- [3] Sze S.M. Semiconductor Devices. New York : John Wiley, 1981, 867 p.
- [4] <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/quay/node41.html>
- [5] D.B.M. Klaassen, « **A Unified Mobility Model for Device Simulation - II. Temperature Dependence of Carrier Mobility and Lifetime** ». Solid-State Elect , Vol. 35, No7 p. 961-967, (1992).
- [6] D. W. Kazi-Tani « **modélisation des structures photovoltaïques: aspects fondamentaux et appliqués**», université abou-bakr-belkaide Tlemcen (2010).
- [7] J. G. Fossum, D. S. Lee. « **A physical model for the dependence of carrier lifetime on doping density in nondegenerate Silicon**». Solid State Electronics, Vol. 25, N° 8, pp. 741-747., 3. (1982)
- [8] J. G. Fossum, R. P. Mertens, D. S. Lee, and J. F. Nijs. « **Carrier recombination and lifetime in highly doped Silicon. Solid State Electronics**», 1983, Vol. 26, N° 6, pp. 569-576.
- [9] L. Huldt, N. G. Nilsson, K. G. Svantesson. « **The temperature dependence of band-to-band Auger recombination in silicon**», Appl. Phys. Letters, Vol. 35, N° 10, 1979, pp. 776 .(1979)
- [10] W. Lochmann and A. Haug. « **Phonon-assisted Auger recombination in Si with direct calculation of the overlap integrals**», Solid State Communications, Vol. 35, pp. 553-556. (1980)
- [11] R. Häcker and A. Hangleiter. « **Intrinsic upper limits of the carrier lifetime in silicon**». Journal of Applied Physics, Vol. 75, pp. 7570-7572., 6. (1994)
- [12] A. Al-Juffal and J. E. Parrot. « **Optimal design of back contact solar cells**». 9th EC PVSEC, Freiburg (Germany), pp. 447-450. (1989).
- [13] Sze S.M. Semiconductor Devices. New York : John Wiley, 867 p. (1981)
- [14] C. Canali, G. Majni, R. Minder, and G. Ottaviani. « **Electron and hole drift velocity measurements in Silicon and their empirical relation to electric field and temperature**». IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-22, pp. 1045-1047. (1975)
- [15] F.A. Lindholm, S.S. li and C.tsah, « **Fundamental limitations imposed by high doping on the performance of PN junction silicon solar cells**», 11th IEEE Photovoltage specialists conference, pp. 3-12, (1975)
- [16] J. Del Alamo, R.M. Swanson and S. Swirhun, « **Measuring and modelling minority carrier transport in heavily doped silicon**» Solod-state electronics, Vol.28 N°12, , PP. 47-54, (1985)
- [17] H.S. Bennett and C.L. Wilson, « **Statistical comparisons of data on band-gap narrowing in heavily doped Silicon: Electrical and Optical measurements**», J. Appl. Phys. Vol 55, No. 10: 3582-3587 , (1984).
- [18] A. G. Aberle, G. Heiser, and M. A. Green: « **Two-dimensional numerical optimization study of the rear contact geometry of high-efficiency silicon solar cells**», J. Appl. Phys. 75_ 5391-5405, (1994).
- [19] G. Galbiati , V. D. Mihailetchi , A. Halm , R. Roescu , R. Kopecek. « **Results on n-type IBC solar cells using industrial optimized techniques in the fabrication processing** ». Freiburg, Germany; International Solar Energy Research Center - ISC Konstanz, Rudolf-Diesel Str.15 , D-78467 Konstanz, Germany. SiliconPV, (April 2011)

- [20] M. Lu, al « **Optimizaion of interdigitated back contact silicon solar cells by two-dimensional numerical simulation** », IEEE (2009).
- [21] D.Diouf, J-P. Kleider, and C. Longeaud, « **Two-Dimensional simulations of interdigitated back contacts silicon heterojunctions solar cells** », Chapter15 of the book “Physics and technology of amorphous-crystalline silicon heterostructure solar cells » ,(Springer 2011).
- [22] N. Oleksiy «**Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités**», Thèse de doctorat. N° d’ordre 2005ISAL0028 , (2005).
- [23] D.L. Kendall, and D.B. Vries, «**Diffusion in silicon**». In: Haberecht, R.R. (ed.) Semiconductor Silicon, p. 358. The Electrochemical Society, New York (1969).
- [24] M.E. Law, E. Salley, M. Long, D.E. Burk, «**Self-Consistent Model of Minority-Carrier Lifetime, Diffusion Length, and Mobility**». IEEE Elect. Dev. Lett. 12, 401–403 (1991).
- [25] P.E. Gruenbaum, R.R. King, R.M. Swanson, «**Photoinjected hot-electron damage in silicon point-contact solar cells**». J. Appl. Phys. 66, 6110–6114 (1989)
- [26] T. Desrues, P.-J. Ribeyron, A. Vandeneynde, A.-S. Ozanne, , F. Souche, , Y.Veschetti, , A.Bettinelli, , P.R. Cabarrocas, M. Labrune, D. Diouf, , J.-P. Kleider, M. Lemiti, « **New process integration for interdigitated back contact (IBC) a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells** ». In: Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valence, Spain, pp. 1673–1676 (2008)
- [27] P. Lolgen. « **Surface and volume recombination in silicon solar cells** », Thèse de doctorat, Universiteit Utrecht, The Netherlands, 152 p, (1995).
- [28] R.M. Swanson, S.K. Beckwith, R.A. Crane, W.D. Evides, , Y.O. Wark, R.A. Sinton, , S.E. Swiiwiun, « **Point contact silicon solar cells**». IEEE Trans. Elect. Dev. 31,661–664 (1984).
- [29] S. Taira, , Y. Yoshimine,, T. Baba, M. Taguchi, H. Kanno, T. Kinoshita, H.Sakata,, E. Maruyama, M. Tanaka: « **Our approaches for achieving HIT solar cellswithmorethan 23 % efficiency**». In: Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milano, Italy, pp. 932–935 (2007).
- [30] J.Y. Lee, S.W. Glunz. «**Investigation of various surface passivation schemes for silicon solar cells**». Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol.90, pp.82-92,(2006).
- [31] R. Hezel and R. Schörner «**Plasma Si nitride – A promising dielectric to achieve high – quality silicon MIS/IL**». Solar cells. Journal of AppliedPhysics,Vol.52, n°4, pp.3076-3079 (1981,).
- [32] O.S. Chultz, M. Hofmann, S.W. Glunz , al. «**Silicon oxide /silicon nitride stack system for 20% efficient silicon solar cells** ». 31 st IEEE PVSC Orlando, Florida, , pp. 872-876, (2005).
- [33] C. Leguit , al. «**Low temperature surface passivation for silicon solar cells** ». Solar Energy Materials and Solar Cells., Vol.40, pp.297-345 (1996).
- [34] I. Jozwik, P. Papet, A. Kaminski, E. Fourmond, F. Calmon, M. Lemiti : «**Interdigitated back contact solar cells with SiO₂ and SiN back surface passivation** ». Journal of Non-Crystalline Solids 354 4341–4344, (2008).
- [35] T. Jana, S .Mukhopadhyay and S . Ray. «**low temperature silicon oxyde and nitride for surface passivation of silicon solar cells**». Solar Energy Materials and Solar Cells. Vol.71, pp.191-211, (2002)
- [36] M. Lu, S. Bowden, U. Das, R. Birkmire,: « **Interdigitated back contact silicon heterojunction solar cell and the effect of front surface passivation**». Appl. Phys. Lett. 91, 063507 (2007)
- [37] G.J . Wilfried, H.M. Sark· L. Korte , F. Roca, Djicknoum. «**Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells**». Chapter 15«Two-

- Dimensional Simulations of Interdigitated Back Contact Silicon Heterojunctions Solar Cells». (Springer 2011).
- [38] D.Diouf, J-P. Kleider, and C. Longeaud : «**résultats solarex18**». Laboratoire de Génie Electrique de Paris,CNRS UMR8507, CNRS UMR8507; SUPELEC;Univ Paris-Sud; UPMC Univ Paris 06; 11 rue Joliot-Curie, Plateau de Moulon, F-91192 Gif-sur-Yvette Cedex, France.
- [39] S. Martinuzzi, , O. Palais, M. Pasquinelli, F.Ferrazza,: «**N-type multi crystalline silicon wafers and rear junction solar cells**». Eur. Phys. J. Appl. Phys. 32, 187–192 (2005)
- [40] J.A.Cooper, R.J.Schwartz,: « **Electrical characteristics of the SiO₂-Si interface near mid gap and in weak inversion**». Solid-State Electron. 17, 641–654, 44, 45 (1974).
- [41] D.Munos , al., « **Key features of highly efficient a-Si:Hc-Si heterojunction solar cells**» INES-CEA . 7th Workshop on the future Direction of Photovoltaics)by JSPS 175th committee), (march, 2011) .
- [42] <http://www.silvaco.com/examples/tcad/section45/example18/index.html>
- [43] M.J. Kerr,: «**Surface, emitter and bulk recombination in silicon and development of silicon nitride passivated solar cells**». PhD Thesis, (June 2002)



Conclusion et perspectives

Conclusion Générale et perspectives

Conclusion Générale

La géométrie des cellules solaires à hétérojonction à contacts arrière interdigités et leurs procédés de fabrication sont intimement liés. La géométrie des cellules Si-HJ IBC fabriquées dans cette étude doit être à la fois optimisée et simplifiée afin de réduire le nombre d'étapes de fabrication. Ces optimisations sont focalisées sur les aspects 2D (Atlas /Silvaco) du fonctionnement des cellules solaires IBC-SiHJ. Ils prennent en effet une importance croissante dans le rendement de conversion électrique ($\approx 21.47\%$).

La première partie de cette thèse développe les connaissances physiques concernant le matériau le plus utilisé dans l'industrie des cellules photovoltaïques « le silicium ». Ce dernier est très abondant sur la croûte terrestre, non toxique et possède une technologie maîtrisable grâce à l'industrie micro-électronique. Cette technologie qui existe depuis environ 50 ans engendre actuellement plus de 80% des ventes au niveau mondial.

Le premier chapitre est dédié aux bases indispensables à la compréhension de la suite de notre travail. Nous avons rappelé quelques notions préliminaires sur le rayonnement solaire et son application dans le domaine photovoltaïque. Ensuite, nous avons expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques standards et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût.

Le second chapitre est destiné à faire une description générale des différentes technologies photovoltaïques. Dans une première partie, nous avons vu le principe de l'hétérojonction suivant le principe d'Anderson, ensuite, nous avons entamé l'étude théorique de l'hétérojonction (silicium amorphe/ silicium cristallin (c-Si et a-Si:H)). Puis, nous avons présenté la technologie silicium à hétérojonctions et la technologie à contacts arrière (RCC). Nous concluons ce chapitre se conclut par une brève présentation de la structure combinant ces deux technologies qui suscite un intérêt progressif concernant la conversion photovoltaïque. Dans la deuxième partie, nous avons aussi rappelé quelques techniques de caractérisation.

Le troisième chapitre présente la théorie des différentes technologies des cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités (IBC classique et IBC-SiHJ) rapportés dans la littérature. Nous avons montré aussi l'intérêt de cette technologie par la présentation des trois procédés utilisés, actuellement dans l'industrie. Nous avons aussi étudié les différents paramètres constituant ces structures, ainsi que les techniques de traitement pour atteindre des

rendements élevés. La passivation de la face avant, se fera avec un champ de surface avant FSF, afin de réduire la vitesse de recombinaison. Cette couche de FSF est combinée soit avec une couche antireflet du nitrure de silicium) ou à l'aide d'une couche mince de silicium amorphe intrinsèque. Pour l'arrière de la cellule IBC, la technologie et la conception des cellules à hétérojonction sont similaires aux cellules IBC classiques dans de nombreux aspects. La qualité de l'interface a-Si/c-Si influe largement sur le rendement de conversion des cellules solaires IBC.

Dans le quatrième chapitre : Nous avons effectué la simulation (2D) par Atlas /Silvaco afin de mieux comprendre le fonctionnement des cellules à hétérojonctions à contacts arrière interdigités. Nous avons cerné les conditions indispensables pour atteindre des hauts rendements. A ce titre nous avons étudié l'influence des différents paramètres sur les performances de la cellule IBC-SiHJ : tension en circuit ouverts V_{co} , densité de courant en court-circuit J_{cc} , facteur de forme FF et rendement de conversion électrique η . Nous avons optimisé les différents paramètres géométriques et physiques afin d'atteindre un rendement maximum. Dans une première partie, l'étude a permis de démontrer l'importance de choix de la largeur de la structure élémentaire (pitch) ainsi que l'espacement entre contacts (gap) où nous avons pu trouver un optimum dans le rendement de conversion électrique η pour un pitch de $1125\mu\text{m}$ et un gap de $75\mu\text{m}$. La simulation numérique montre dans une deuxième partie que la structure à hétérojonction à contacts arrière interdigités IBC-SiHJ nécessite l'utilisation d'un substrat de bonne qualité électronique où la durée de vie des porteurs minoritaires doit être supérieure à 1ms et une épaisseur inférieure à $250\mu\text{m}$. La recombinaison en surface et la longueur de diffusion sont donc des paramètres déterminants pour l'optimisation du rendement de la cellule solaire IBC-SiHJ. Nous déduisons ainsi les conditions optimales pour atteindre des rendements de conversion satisfaisants ($> 20.47\%$).

Perspectives

Quelques perspectives de recherche sur les cellules photovoltaïques à hétérojonction à contacts arrière interdigités permettront d'accroître leurs performances. Ces améliorations à apporter sont regroupées suivant leurs influences sur les éléments constituant la cellule.

1. La structure élémentaire

L'un des paramètres physiques très important dans la conception des cellules solaires IBC-SiHJ est la largeur de la structure élémentaire (pitch). Nous pouvons dire qu'un pitch de $1125\mu\text{m}$ optimise le rendement de conversion électrique η .

2. La face avant

○ *Couche antireflet*

L'utilisation d'un double couche antireflet SiN/SiO₂ déposée successivement sur le substrat; présente une excellente passivation de la face avant des structures à contacts arrière interdigités à hétérojonction et diminue la réflectivité.

○ *La couche FSF*

La passivation de la surface avant est très importante : elle repose sur la création d'un champ de surface face avant (FSF) par la création d'une couche fortement dopée d'un dopage similaire à celui du substrat, afin d'atteindre un rendement optimal. L'ajout d'un champ de surface avant fournira une protection électrique de la face avant, de telle sorte que la vitesse de recombinaison devienne moins sensible.

3. Le substrat

La qualité du substrat de silicium est un facteur déterminant sur les performances d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction à contacts arrière interdigités (IBC-SiHJ). Etant donné que l'émetteur soit placé sur l'arrière, les porteurs de charges photogénérés, dont la majorité sont créés à proximité de la surface d'avant, doivent couvrir un parcours jusqu'à l'arrière de la cellule. En outre, les porteurs doivent également se déplacer latéralement, pour atteindre soit l'émetteur soit le champ de la surface arrière BSF. Dans le cas où la qualité du substrat est moins bonne, les porteurs de charges vont se recombiner avant d'atteindre les jonctions arrière. Et c'est un phénomène néfaste pour la cellule qui influe sur la densité de courant en court-circuit J_{cc} et par conséquent sur le rendement de conversion. Alors une règle générale s'applique c'est que la longueur de diffusion des porteurs de charges minoritaires doit être de deux à trois fois l'épaisseur de la cellule. Aussi la réduction de l'épaisseur du substrat diminue sa qualité. C'est un compromis qui doit être résolu afin de maintenir un rendement maximal. L'augmentation du dopage du substrat devrait permettre de diminuer la vitesse de recombinaison au niveau du BSF et ainsi permettre une amélioration du V_{co} . De plus, les problèmes de résistance série engendrées par les porteurs majoritaires lors de l'utilisation de substrats fins seront moins pénalisants, car le substrat est plus conducteur.

▪ Avantage d'un substrat de type n

✓ La plupart des impuretés ont une section efficace de capture d'électrons, plus grande par rapport à celles des trous ; ce qui rend le substrat de type n moins sensible aux impuretés courantes, telles celles du fer.

- ✓ Avec l'utilisation du silicium CZ de type n on aura moins de complexité créée par le bore dans le cas de silicium CZ de type p et qui peut causer une dégradation dans les performances des cellules solaires après l'illumination.

4. La face arrière

- *La couche intrinsèque*

le dépôt d'une couche intrinsèque de silicium amorphe (a-Si :H), couche tampon sur toute la surface arrière de la cellule solaire à hétérojonction à contacts arrière interdigités à hétérojonction (IBC-SHJ) améliore la passivation de la surface arrière, ce qui conduit à une amélioration de tension en circuit ouvert V_{oc} ($\approx 671.25\text{mV}$) notamment dans la densité en court-circuit J_{cc} ($\approx 37.8\text{mA/cm}^2$), à une seule condition que cette couche soit très mince (quelques nm).

- *L'émetteur en face arrière*

La largeur de l'émetteur n'a pas d'influence très importante sur le rendement de la cellule si l'émetteur est plus large que le BSF et l'espacement entre les contacts.

- *BSF*

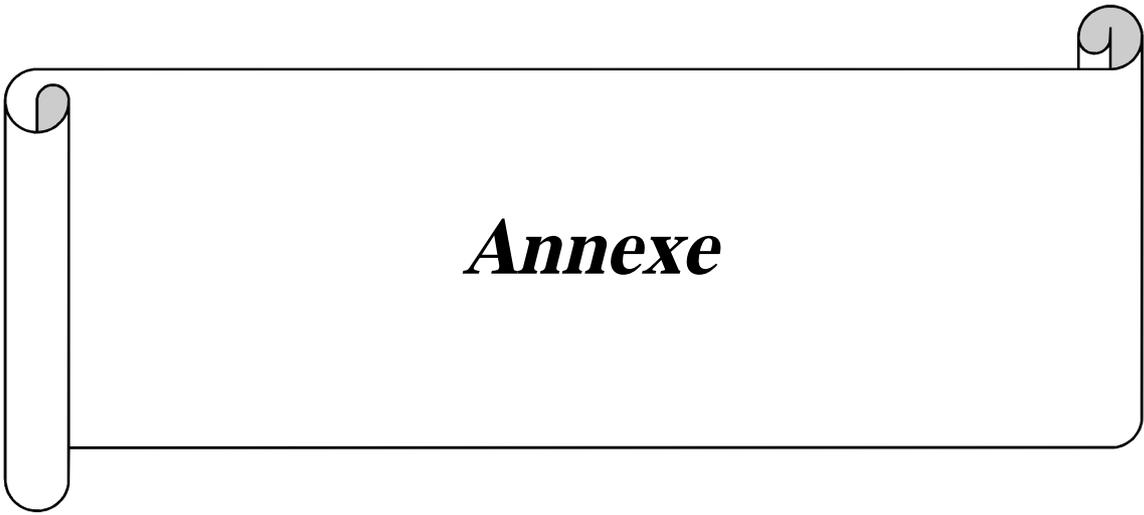
L'épaisseur du BSF doit être importante pour assurer une réduction de la recombinaison sur le contact au substrat. On peut voir, que dans le cas du «fort» BSF (fortement dopé), pratiquement tous les électrons sont repoussés par le BSF du contact au substrat. Aussi la largeur du BSF doit être la moins large possible.

- *Gap (espacement entre les contacts)*

Ces deux régions (BSF et Gap) présentent une surface recombinante pour les porteurs minoritaires. En augmentant la largeur de ces régions, on a une recombinaison plus importante sur la face arrière. De plus, ils représentent une distance latérale supplémentaire à traverser pour les porteurs minoritaires. Donc, la largeur du BSF et l'espacement entre les contacts doivent être les moins larges possibles.

- *La métallisation*

L'émetteur et la BSF doivent être recouverts quasi totalement par les électrodes de contact pour éviter les pertes dans les zones non contactées. Cet aspect est primordial pour augmenter la valeur de la densité du courant en court-circuit J_{cc} et améliorer le facteur de forme FF qui permet d'accroître les performances des cellules. Il serait intéressant de déterminer la surface optimum du contact émetteur-métal à réaliser afin d'obtenir le meilleur compromis entre la réflectivité/passivation en face arrière et la résistance de contact.



Annexe

Annexe

Logiciel de simulation Silvaco

Au cours de cette thèse, nous avons utilisé le logiciel numérique à deux dimensions, atlas de Silvaco (2D) pour modéliser les cellules photovoltaïques à hétérojonction à contacts arrière interdigués (IBC-SiHJ). Silvaco est un logiciel de simulation des dispositifs électroniques conçu par « la company americaine Silvaco-Tcad international ». Cette société est un fournisseur de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technology Computer Aided Design). Ces outils sont utilisés par les compagnies de microélectronique pour la recherche, le développement et la conception de dispositifs à base de semi-conducteur. Cette gamme d'outil de simulation constituant ce qu'on appelle la VWF (virtuelle wafer fabrication).

I. Présentation du paquet des programmes Silvaco VWF (*Virtual Wafer Fab*)

L'ensemble des outils de simulation et des outils interactifs permettant la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs semi-conducteurs s'appellent VWF (Virtual Wafer Fab) [1]. Les composants de base de VWF sont :

Ces outils sont divisés en trois catégories principales.

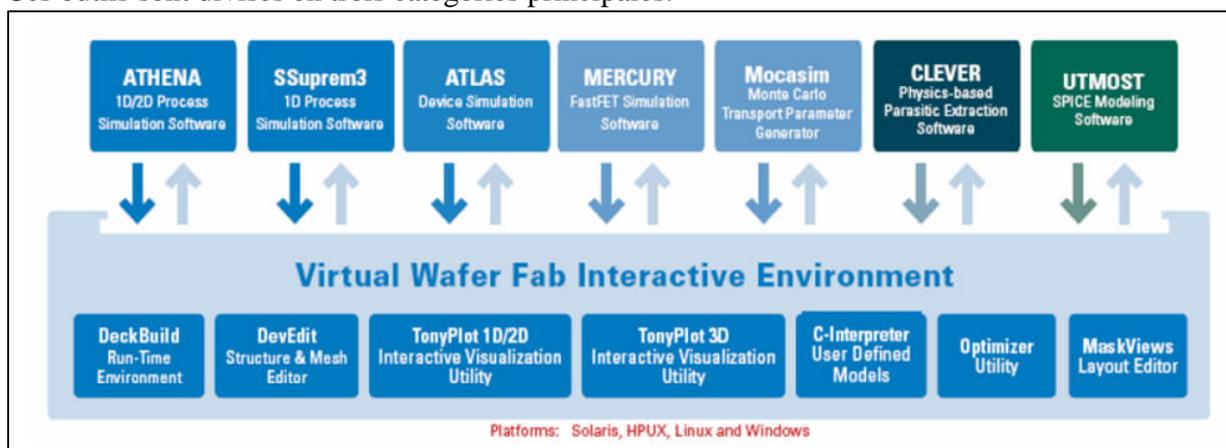


Figure 1. Organigramme de la structure VWF (*Virtual Wafer Fabrication*)
[1]

I-1 VWF (*core tools*)

Ces outils permettent de simuler les processus de fabrication ou les comportements électriques des dispositifs. Les outils de simulation sont [4]:

I-1-1 SSUPREM3 :

C'est un simulateur de procédé 1D (une seule dimension) avec prolongement simple de simulation des dispositifs

I-1-2 ATHENA :

C'est un simulateur à deux dimensions (2D) de procédés technologiques qui sert à la fabrication virtuelle autrement dit simuler les différentes étapes effectuées en Salles Blanches et ainsi obtenir la structure du dispositif électronique (dimensions, géométrie, couches constitutives) avec les profils de dopage. Il simule généralement en simultanéité avec Atlas.

I-1-3 ATLAS :

C'est un simulateur qui traite les dispositifs électroniques avec performance à base de deux ou trois dimensions (2D ou 3D), et prédit le comportement électrique des divers structures semi-conducteurs et permet d'obtenir leurs caractéristiques électriques. Il se compose d'une variété d'outils de simulation telle :

I-1-3-1 BLAZE :

C'est un simulateur (2D ou 3D) des dispositifs construit à partir des matériaux III-V, II-VI et de dispositifs à hétérojonctions. Ce module permet de définir les conditions de mise de deux matériaux différents. Blaze est applicable à une large gamme des dispositifs tels HBT (Heterojonction Bipolar Transistor), HEMT (High Electron Mobility Transistor), LED (Light Emitting Diode), cellules photovoltaïques à hétérojonctions et diodes à hétérojonction.

I-1-3-2 TFT :

Utile pour la simulation des matériaux désordonnés. « TFT », il nous permet de définir une distribution des états de défauts dans la bande interdite du semi-conducteur. Ce module nous aide à réaliser un bon traitement des propriétés électriques des matériaux désordonnés comme le silicium polycristallin ou le silicium amorphe.

I-1-3-3 LUMINOUS :

C'est un module utilisable pour faire des calculs sur les profils d'intensités optiques dans les dispositifs à base de semi-conducteur et les convertit en taux de photogénération. Cela souscrit une simulation des caractéristiques courant-tension I(V) et fait connaître les performances des cellules photovoltaïques.

I-1-3-4 S-PISCES :

Un programme de simulation des dispositifs en 2D ou 3D modélise les caractéristiques électriques des dispositifs à base de silicium en incluant des technologies MOS (Metal Oxide Semiconductor), SOI (Silicon On Insulator), EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) et des dispositifs de puissance. S-Piscès calcule les distributions internes des paramètres physiques et prévoit le comportement électrique des dispositifs à l'état d'équilibre, transitoire ou dans les conditions de courant alternatif de petit signal.

I-1-3-5 MIXEMODE :

Utilise des algorithmes numériques avancés robustes pour des simulations en courant continu, en régime transitoire ou en régime alternatif et de l'analyse de réseau de petits signaux. « ixedMode » est typiquement employé pour simuler des circuits qui contiennent des dispositifs à base de Semi-conducteur, la logique de programmation pour spécifier les circuits est de type spice.

I-1-3-6 NOISE :

Permet de simuler le bruit produit par les dispositifs électroniques. Le bruit électronique a comme conséquence une dégradation inévitable des performances d'un circuit. Il est important de comprendre les propriétés du bruit pour réduire au minimum son effet.

I-1-3-7 LASER :

Effectue une simulation couplée électrique et optique des lasers à base de semiconducteurs.

I-1-3-8 VCSEL «Vertical Cavity Surface Emitting Lasers»:

Permet la simulation électrique, thermique et optique des lasers d'émission surfacique de cavité verticale en utilisant des méthodes numériques robustes, et fiables avec des mailles non uniformes.

I-1-3-9 LED :

Fournit des possibilités générales pour la simulation des dispositifs de diode électroluminescente.

I-1-3-10 OTFT/OLED « OTFT » :

Simule les caractéristiques des dispositifs réalisés en matériaux organiques (caractéristiques électriques et optiques en courant continu ou transitoire de ceux-ci). « OLED » simule des densités d'excitation singlet et triplet.

I-1-3-11 THERMAL :

Résout l'équation de la chaleur à l'équilibre thermodynamique pour trouver la distribution de la température à l'équilibre en structures 3D planaires et non planaires.

Les modules utilisés pour l'étude des cellules photovoltaïques en silicium à hétérojonctions, sont Blaze, TFT et Luminous.

I-2 VWF interactive tools (outils interactifs)

VWF interactive tools sont créées pour être utilisées en mode interactif dans la construction d'un seul fichier d'entrée en étant basé sur une interface utilisateur qui est graphique (Graphical User Interface, GUI). Les outils interactifs peuvent être utilisés soit comme des composants intégrés dans l'environnement « VWF automation tools », ou en relation avec un ensemble de fichiers. Les outils interactifs sont [4] :

I-2-1 TonyPlot :

Un outil de visualisation et d'analyse graphique des résultats de simulations à une ou deux dimensions

I-2-2 Manager :

Un outil de gestion des fichiers créés et utilisés par VWF.

I-2-3 MaskViews :

Un outil de dessin des masques (*layouts*).

I-2-4 DeckBuild :

Un environnement d'exécution interactif utilisé pour la simulation des différents dispositifs électroniques. C'est une interface.

I-2-5 DevEdit :

Un outil qui permet de créer des nouvelles structures ou même de modifier des structures existantes. Cet outil permet de raffiner les maillages existants ou de définir de nouveaux maillages.

I-2-6 Optimiseur :

Un outil d'optimisation automatique

I-2-7 SPDB (Semiconductor Process Data Base)

C'est un produit séparé qui peut être utilisé avec DeckBuild. Il a été conçu pour stocker un grand nombre de profils de dopage mesurés expérimentalement avec les données décrivant les conditions expérimentales.

I-3 VWF automation tools (outils d'automatisation)

Ces outils permettent à l'utilisateur d'exécuter sur une grande échelle des études expérimentales pour créer des résultats afin de réaliser une analyse statistique ultérieure. Ces outils automatiques utilisent la technologie des bases de données et les méthodes des logiciels de transmissions entre processus.

II. Méthodes de programmation sous Silvaco/Atlas (Syntaxe d'un programme ATLAS)

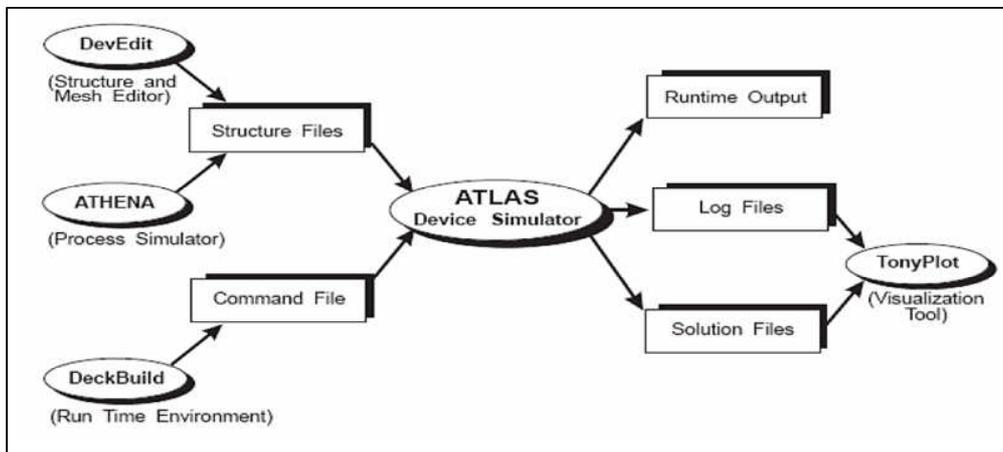


Figure 2. Les entres et les sorties de Atlas [1]

Pour la structure du programme ATLAS, il existe un ordre propre à la logique de programmation qu'il faut respecter. Le fichier d'entrée « *.in » peut être construit dans la fenêtre Deckbuild en utilisant éventuellement le menu **Deckbuild Commands**, il est constitué d'une succession de commandes qui seront exécutées par le simulateur. Une commande en ATLAS a la forme suivante :

<COMMANDE> <paramètre>=<valeur>

Exemple : **DOPING uniform p.type conc=1e16 num=1** (uniform et p.type étant des paramètres ayant une valeur logique)

L'enchaînement des commandes dans le fichier d'entrée est très important et il est indispensable pour permettre à ATLAS de prendre en compte correctement tous les modèles spécifiés. Il y a cinq groupes de commandes présentés dans la figure ci-dessous

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

Figure 3. Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas[1].

II-1 Spécification de la structure

Nous commençons toujours le fichier de commandes par la description de la structure qu'on veut simuler, c'est-à-dire : le maillage (MESH), l'emplacement de chaque matériau (REGION), les électrodes (ELECTRODE), le dopage (DOPING). Si le fichier de structure a été déjà créé avec ATHENA ou avec DEVEDIT, plusieurs commandes peuvent également être remplacées par une seule commande qui charge le maillage, la géométrie et les matériaux, la position des électrodes et le dopage :

II-1-1 MESH :

Définit un maillage à la structure simulée ou de faire appel à un maillage défini précédemment.

MESH INFILE=<fichier structure>

- NFILE: fichier avec grille enregistrée précédemment.
- OUTFILE : fichier de sortie
- SPACE.MULT : Facteur scaleur appliqué à tout l'espace de la grille spécifié .
- CYLINDRICAL, RECTANGULAR : décrit la symétrie de la grille
- NX, NY : nombre de nœuds le long de x et y direction. Ex : **Mesh nx=36 ny=30**
- X.MESH, Y.MESH: Instructions qui indiquent l'emplacement du quadrillage le long des axes x et y.
- NODE : spécifie l'index de la ligne de grille.
- LOCATION : spécifie l'emplacement de la ligne de la grille.
- RATIO : ratio à utiliser lors de lignes de la grille d'interpolation entre des lieux donnes.
- SPACING : Précise l'espacement du maillage à un endroit donné

Exemple : **x.mesh loc =0 spacing =35, x.mesh loc =350 spacing =0.5, x.mesh loc =355 spacing =5, x.mesh loc =425 spacing =0.5, x.mesh loc =430 spacing =43, x.mesh loc =1125 spacing =112.5**

- ELIMINATE statement:(Elimine)

Relève tous les points du maillage secondes dans une grille rectangulaire spécifiée par : X.MIN, X.MAX, Y.MIN and Y.MAX

- COLUMNS, ROWS : l'élimination des lignes et Colonnes, Exemple : **Eliminate x.min=0 x.max=4 y.min=0 y.max=3**

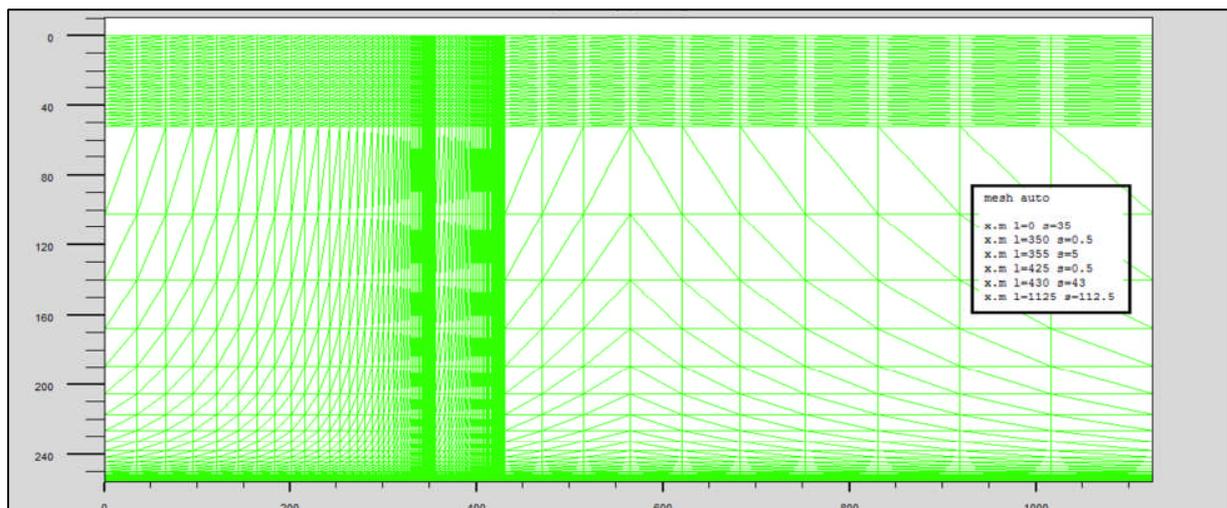


Figure 4. La structure dans Atlas

II-1-2 REGION (Régions) :

Avec cette commande, nous pouvons définir chaque région de la structure et indiquer le matériau se trouvant dans cette région donnée.

- Statement : Spécifie le nombre de région à laquelle décrits ci-dessus
- Parameters(Parametre) : Certains des paramètres les plus couramment utilisés sont : AFFINITY, EG300, MUN, MUP, NC300, NV300, Permittivite, TAUN0, TAUP0, VSATN, VSATP.

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

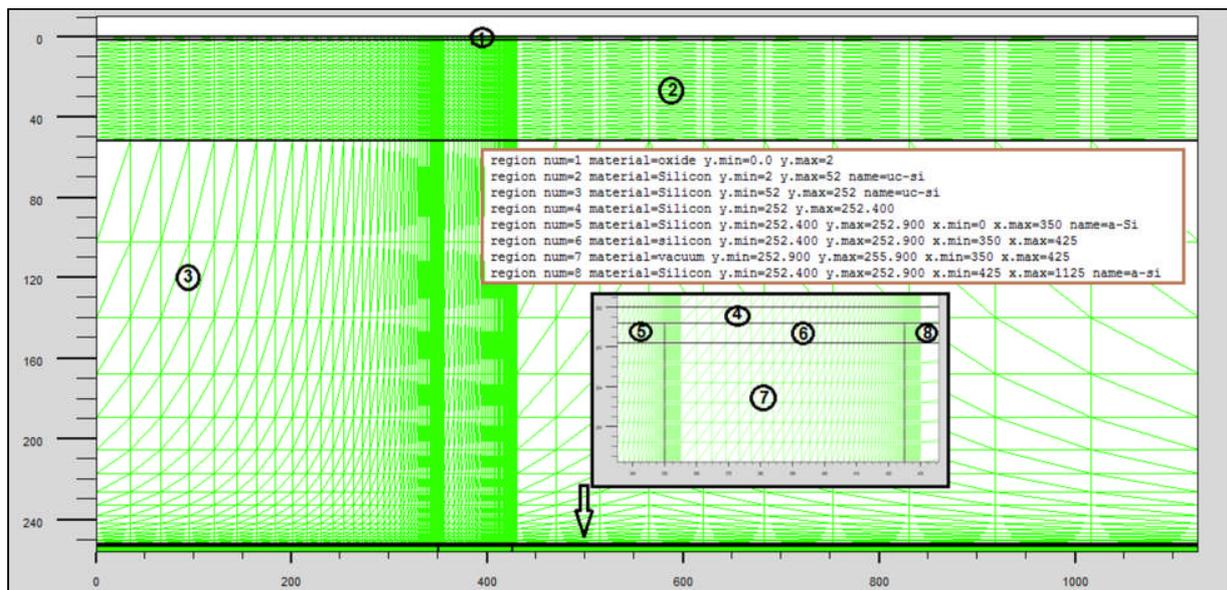


Figure 5. Présentation des régions de la structure dans Silvaco/Atlas [1,5]

- Number : désigne le numéro de la région
- Material : silicium, l'oxyde...etc
- Position : définit l'emplacement de la region.
Exemple : `region num=2 material=Silicon y.min=2 y.max=52 name=uc-si`

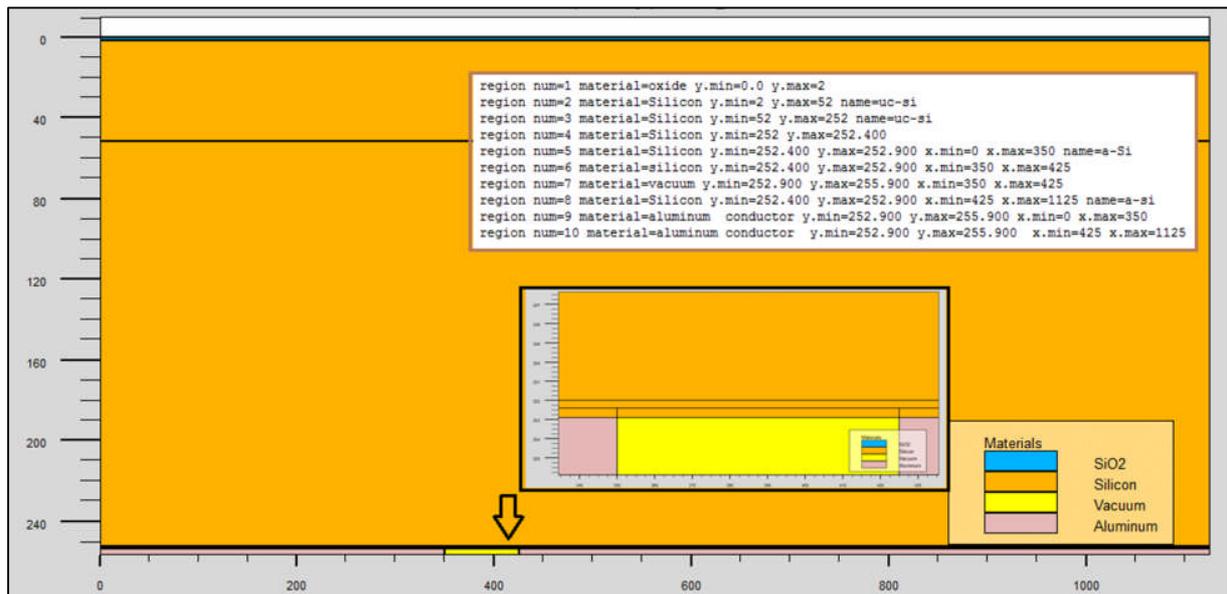


Figure 6. Présentation des matériaux et régions dans Atlas

II-1-3 ELECTRODE (Les électrodes) :

Permet de définir la position d'une électrode et éventuellement le matériau qui la forme. Nous devons préciser au moins une électrode au cours de la simulation.

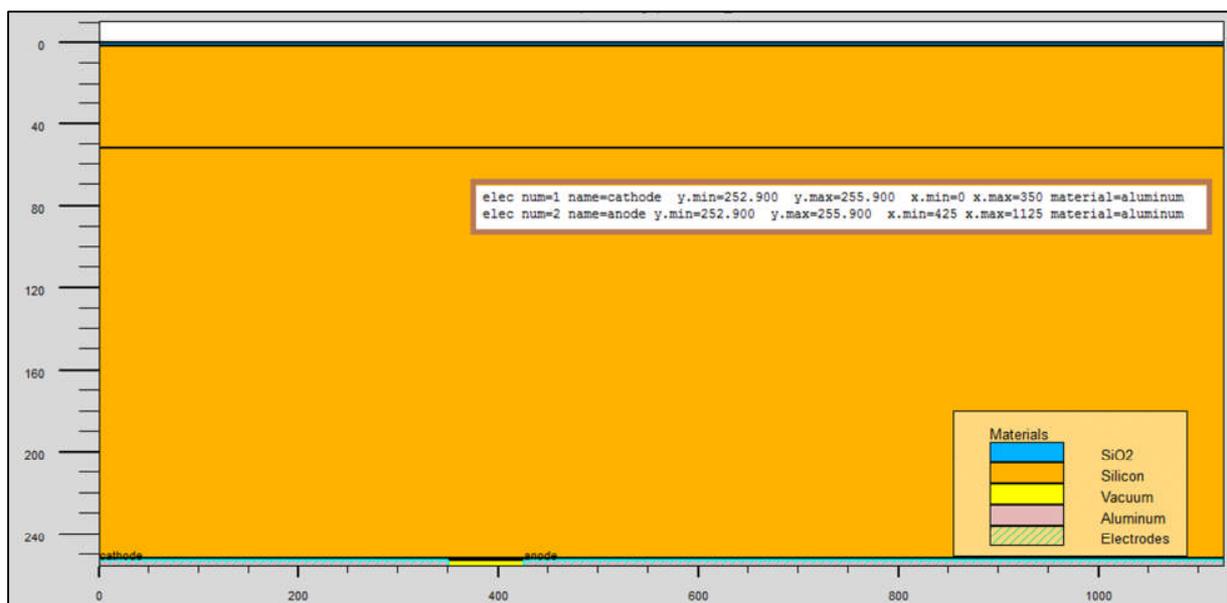


Figure 7. Présentation des électrodes dans Silvaco/Atlas

- Name : définit le nom de l'électrode: SOURCE, DRAIN, GATE
- position parameter : définit la position du paramètre ((BOTTOM(BAS), LEFT(GAUCHE), RIGHT(DROITE), TOP(HAUT), SUBSTRATE (substrat)).

II-1-4 DOPING (Le doping):

Permet de définir un type, une concentration et un profil de doping pour une région donnée de la structure.

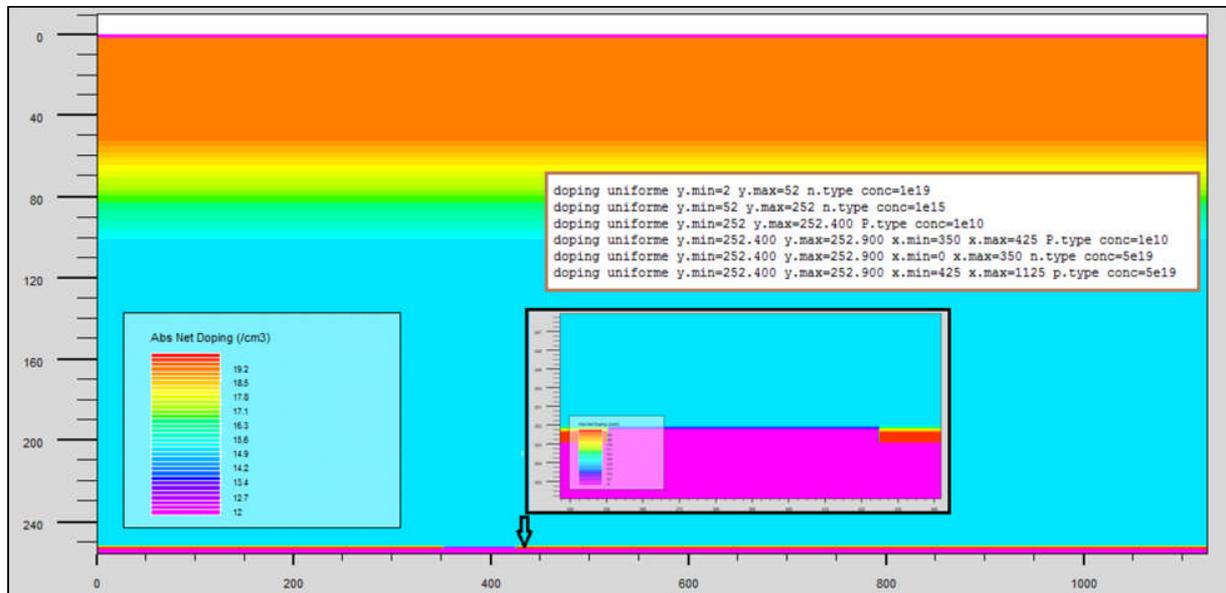


Figure 8. Présentation de doping avec Atlas

Le profil de doping est défini avec les paramètres suivants:

- Distribution type : UNIFORME, GAUSSIEN (type de la distribution).
- Doping type : Type n, type p (type de doping)
- Concentration : Spécifie le pic de la concentration pour le Profil Gaussien.
- Characteristic : Longueur caractéristique principale
- Peak : Spécifie la localisation du pic d'un profil gaussien.
- Position REGION : X.LEFT (GAUCHE), X.RIGHT (DROITE),

Exemple: **doping uniforme y.min=2 y.max=52 n.type region=2 conc=1e19**

Remarque :

La définition d'un bon maillage est une question cruciale dans les simulations des dispositifs électroniques.

II-1-5 REGRID statement (Les commandes):

C'est une instruction qui permet la création d'une grille fine dans les zones périphériques critiques. Cette instruction est utilisée après les instructions (MESH, REGION, LE MATERIEL, ELECTRODE, et DOPAGE). Il y a deux façons de (remaillage peut se faire: regrid sur DOPAGE, regrid en utilisant des variables : SOLUTION). Il y a plusieurs facteurs qui doivent être pris en compte lors de la position de la grille notant :

- Precision : grille fine est nécessaire pour résoudre correctement la structure
- Efficacite : pour terminer la simulation dans un délai raisonnable, nous utilisons moins de points de la grille, les zones critiques dans la grille sont: les régions de déplétion, les régions de champ électrique élevé, les interfaces Si/SiO₂ ; émetteur / base et les zones de recombinaison.

II-2 Spécifications de modèles de matériaux: (Materials models specification)

Par la suite, nous introduisons les modèles physiques qui vont être utilisés durant la simulation (commande MODELS) et qui doivent être spécifiés. Aussi nous pouvons introduire des valeurs à certains paramètres qui caractérisent les matériaux (commande MATERIAL), de même pour les contacts (commande CONTACT) et les interfaces (commande INTERFACE) [4].

II-2-1 MATERIAL :

Permet de définir des paramètres propres associés à chaque matériau telles que la bande interdite, la permittivité, la mobilité des porteurs. Dans ATLAS, les paramètres par défauts de plusieurs matériaux sont déjà implémentés. Atlas fournit également une liste par défauts des paramètres pour les propriétés du matériau utilisé dans la simulation, par exemple: affinité électronique, l'énergie de bande interdite, la densité d'états, la vitesse de saturation, la durée de vie des porteurs minoritaires, le coefficient d'ionisation par impact, etc

II-2-2 MODELS and IMPACT : statement : (instructions MODELE) :

Spécifie les modèles physiques utilisés et la température globale de la structure. Les modèles physiques qui sont spécifiés avec l'instruction modèles et IMPACT comprennent :

- Mobility model : CONMOB, ANALYTIC, ARORA, FLDMOB, TASCH, etc.
- Recombination models : SSR, CONSRH, AUGER, OPTR .
- Carrier statistics : statistiques des porteurs électriques (BOLTZMANN, FERMI, INCOMPLETE, IONIZ, BGN)
- Impact ionisation : CROWELL, SELB
- Tunneling model :(modèle d'effet tunnel) FNORD, BBT.STD (bande à bande -transitions directes) BBT.KL (directes et indirecte transitions) HEI and HHI (l'injection des électrons et trous chauds).
- Defects : active le modèle de défauts dans la bande interdite.

Remarque :

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

- NUMCARR : indique le nombre des porteurs, spécifie (électrons, trous ou les deux)
- MOS, BIPOLAR : modèle standard utilise pour les MOSFET et les bipolaires.

Exemple : **MODEL MATERIAL=silicon region num=3 models srh fermi ni.fermi conmob optr auger bgn FLDMOB EVSATMOD=1 ECRITN=6.0e3 CONMOB**

II-2-3 CONTACT :

Spécifie le type de contact. Par défaut le contact est ohmique. Un contact Schottky peut être défini aussi en spécifiant le travail de sortie du métal et en introduisant des modèles de recombinaison de surface adéquats.

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

II-2-4 INTERFACE statement :

L'instruction indique la densité de charge interrassiale et la vitesse de recombinaison à la surface pour les électrons et les trous (QF, Sn, Sp) et permet de définir les paramètres associés à l'interface de deux régions.

Exemple : **interface optical diffusive dispersion=45 specular=1 scattered=400 y.min=2 y.max=400 absorption=0 region=2, interface s.s y.min=2 y.max=250 s.n=1e5 s.p=1e5**

II-3 Les méthodes numériques

L'étape suivante consiste à choisir les méthodes numériques qui seront utilisées dans la simulation.

II-3-1METHOD statement :

Permet de choisir les méthodes numériques à employer pour résoudre les équations et aussi de choisir les paramètres liés à ces algorithmes utilisés dans la simulation par exemple :

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

Remarque :

Nous pouvons également modifier les paramètres pertinents pour la procédure de résolution numérique:

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

II-3-2 BEAM :

Indique un signal d'entrée optique sous forme d'un faisceau de lumière monochromatique ou polychromatique. Le faisceau ainsi défini est activé avec la commande SOLVE. BEAM est utilisé pour calculer des courants sous lumière ou des réponses spectrales.

II-4 Spécification des solutions

Pour obtenir les caractéristiques électriques, on utilise la commande SOLVE. Cette commande SOLVE permet d'imposer des conditions de polarisation sur les différentes électrodes et de calculer les courants à travers les électrodes suivant la polarisation. Les résultats de simulation (courant en fonction des polarisations) seront enregistrés dans des fichiers type « .log » et « .str », en utilisant respectivement les commandes LOG et SAVE. Les commandes les plus utilisées sont décrites ci-dessous [4]:

II-4-1 LOG :

Permet d'enregistrer toutes les caractéristiques électriques calculées par ATLAS dans un fichier de type « .log ». Suivant le régime (continu, alternatif ou transitoire), toutes les données générées par la commande SOLVE sont enregistrées dans ce fichier.

II-4-2 SOLVE :

Permet d'ordonner à ATLAS de trouver une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.

II-4-3 LOAD :

Charge des solutions antérieures qui vont ainsi servir comme valeur initiale pour trouver la solution d'autres points de polarisation.

II-4-4 SAVE :

Enregistre la structure et les grandeurs internes du dispositif pour tout point dans un fichier de sortie de type « .str ». Les informations sauveées correspondent à un état donné de la structure.

II-5 Analyse des résultats (Results analysis)**II-5-2 TONYPLOT :**

Permet de faire appel à l'outil de visualisation du même nom. Cet outil permet de représenter les fichiers « .str » et « .log ». ATLAS permet à quatre différents types de solutions à calculer: DC, AC, petit signal et les solutions transitoires.

II-5-2EXTRACT:

Permet d'extraire des valeurs numériques à partir des fichiers « .log »

II-5-2-1 Commandes des solutions DC (DC procédures solution and statements)

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

Trouver une bonne estimation initiale par la résolution de cas d'équilibre (estimation initiale est trouvée en fonction de la densité locale du dopage)

solve init

- Etape de la tension sur une électrode donnée pour une solution convergente:

solve vanode=0.0 name=anode vstep=0.02 vfinal=0.85

- Pour le résous des problèmes avec estimation initiale, on peut utiliser le

TRAP statement (instruction TRAP, ou MAXTRAPS) est le maximum autorise le nombre d'essais (valeur par défaut est 4)

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

**tonyplot -overlay ibccellpitch1125gap75-0.1ms_0.log -set ibccellpitch1125gap75-0.1ms_1.set
ibccellpitch1125gap75-0.5ms_0.log -set ibccellpitch1125gap75-0.5ms_1.set ibccellpitch1125gap75-
1ms_0.log -set ibccellpitch1125gap75-1ms_1.set ibccellpitch1125gap75-3ms_0.log -set
ibccellpitch1125gap75-3ms_1.set**

II-5-2-2 Commandes des solutions AC (AC solution procedures and statements)

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

Le résultat final de cette analyse est la conductance, la capacitance entre chaque paire d'électrodes. Les deux types de simulations sont [4]:

II-5-2-3 Commandes des solutions transitoires (Transient solution procedures and statements)

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

II-5-2-4 Les procédures des solutions avancées

- Obtention de solutions autour d'un point de rupture - utilise MAXTRAPS
- Utilisation de conditions aux limites actuelles Au lieu de tension, on peut également spécifier les conditions aux limites actuelles. Ceci est important, par exemple, lors de la simulation BJTs:
- Le paramètre de conformité :

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

- La courbe trace capacité : permet le traçage de courbes I-V complexes

III. Modélisation sous Atlas/Silvaco

La résolution numérique sous atlas se base principalement sur un système de trois équations différentielles partielles (l'équation de Poisson et les équations de continuités des trous et des électrons [2]. ATLAS produit les solutions numériques en calculant les valeurs des inconnues sur chaque point de maillage du dispositif donné. Une procédure interne de discrétisation convertit le modèle original continu en un système algébrique non linéaire discret. L'ensemble des équations différentielles partielles, le maillage et la procédure de discrétisation déterminent le problème algébrique à déterminer. La solution est obtenue si les critères de convergence sont exaucés. Sinon, les répétitions continuent et s'arrêtent après un nombre limité de répétitions définies au bout duquel le système est déclaré non convergent. Le procédé non linéaire de répétition commence à partir d'une première supposition. Les corrections sont calculées en résolvant des versions linéaires du problème [3]. Les différentes procédures de résolution montrent un comportement différent en ce qui concerne la convergence, l'exactitude, l'efficacité (le temps requis pour produire une solution), et la robustesse (la capacité de converger pour un éventail de structures en utilisant des mailles et des stratégies initiales de conjecture qui ne sont pas optimales). Les deux aspects principaux de la convergence sont l'obtention d'une solution et la rapidité de convergence.

III-1 Modélisation du silicium cristallin c-Si et du Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) matériaux dans une cellule IBC-SiHJ

La modélisation d'un matériau semi-conducteur, nécessite la spécification de ces paramètres électroniques (bande interdite E_g , la mobilité des électrons et des trous, la permittivité relative ϵ_r , la densité effective d'états dans la bande de conduction N_c , la densité effective d'états dans la bande de valence N_v , et l'affinité électronique χ). Aussi les propriétés optiques du semiconducteur sont prises en compte en introduisant un fichier texte comportant trois colonnes correspondant à la longueur d'onde λ , la partie réelle k_1 de l'indice de réfraction et la partie imaginaire k de l'indice de réfraction. Ce fichier permet de calculer la réflexion et l'absorption du semi-conducteur, de plus de la présentation des phénomènes de recombinaison qui sont conditionnés par la présence de distributions particulières d'états dans la bande interdite.

➤ *Le silicium cristallin c-Si*

Dans une cellule IBC-SiHJ, le silicium cristallin est modélisé en définissant ses paramètres électroniques, dont ils sont présentés avec la commande suivante :

```
material material=Si index.file=cSi.txt EG300=1.12 AFFINITY=4.05 PERMITTIVITY=11.9 NC300=2.8e19 NV300=1.04e19 AUGN=6.08e-30 AUGP=1.92e-30 TAUN0=0.001 TAUP0=0.001
```

Ou

- **EG300**: Représente la bande interdite du silicium cristallin, fixée à 1.12 eV à 300 K.
- **TAUN0** : nous pouvons ainsi définir la durée de vie des électrons.
- **TAUP0** : nous pouvons ainsi définir la durée de vie des trous.
- **AUGN et AUGP** : Les coefficients qui correspondent aux coefficients Auger C_n et C_p permettent de calculer le taux de recombinaison Auger.
- Avec la commande **MODELS**, nous pouvons définir les différents modèles physiques à appliquer pour les phénomènes de recombinaison pour prendre en compte notamment les dépendances par rapport aux concentrations de dopants.
- Les mobilités des porteurs peuvent aussi être définies directement ou en utilisant un modèle qui les calcule automatiquement [4].

➤ *Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H)*

Pour le cas de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), le modèle utilisé se base sur deux exponentielles décroissantes à partir des extrémités de la bande interdite, (les queues de bande respectivement de de valence et de conduction) et aussi sur deux gaussiennes au milieu de la bande interdite représentant les défauts profonds. Les paramètres du silicium amorphe hydrogéné dépendent des conditions du type de dopage. Suivant le type de dopage, la position énergétique, le maximum des deux gaussiennes et leur influence sur les propriétés finales de la couche de silicium amorphe (conductivité, énergie d'activation) sont différentes. Comme pour le silicium cristallin, nous définissons d'abord les paramètres électroniques associés au silicium amorphe :

```
Material material=poly index.file=aSi.txt EG300=1.7 AFFINITY=3.9 PERMITTIVITY=11.9 NC300=2e20 NV300=2e20 MUN=20 MUP=5 [4]
```

Reference bibliographique de l'annexe

- [1] ATLAS User's Manual (Copyright 2006) SILVACO International. Web: *www.silvaco.com*
- [2] M. Zeman, J. A. Willems, L.A. Vosteen, G. Tao and J. W. Metselaar, «**Solar Energy Materials and Solar Cells**» 46, 81 (1997).
- [3] *http://www.lgep.supelec.fr/index.php?page=scm-logiciels*
- [4] D. Diouf « **Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière** » thèse de doctorat université paris-sud 11, (2010)

Résumé :

Depuis la naissance de la première structure photovoltaïque à contact arrière interdigités en silicium (IBC), l'évolution de ce type de cellules ne cesse d'accroître (un rendement plus de 21 %). Sur cette structure aucun contact en métal n'est présent sur la face avant de la cellule solaire, les cellules IBC génère une densité de courant J_{cc} assez élevée. Autre avantage lié à l'intégration facile des cellules dans des modules. Une autre structure prometteuse c'est la cellule photovoltaïques à hétérojonction, où les jonctions sont réalisées par application d'une couche de silicium amorphe (a-Si :H) déposée sur un substrat en silicium monocristallin (a-Si), et qui améliore la valeur de la tension en circuit ouvert V_{co} ; et par conséquent le rendement de conversion η . La combinaison entre ces deux technologies nous a donné la cellule à contact arrière interdigités à hétérojonction (IBC-SiHJ). Sur la technologie IBC-SiHJ, beaucoup de paramètres ont été largement étudiés comme la qualité du substrat, la passivation extérieure avant et arrière, la conception de la jonction arrière aussi la conception de la structure de la métallisation. Ces dernières années les recherches sur les structure IBC ont été conçues pour développer cette structure et avoir le compromis haut rendement / bas coût et la solution été l'utilisation des couches minces de silicium. Au cours des dernières années, la recherche sur cette cellule photovoltaïque a augmenté de façon exponentielle que ce soit en termes d'investissements, de nombre de publications scientifiques, ou de nombre des laboratoires de recherches. Cet intérêt qui ouvre une nouvelle voie de recherche et une évolution rapide dans les rendements est prévu dans le futur proche. Nous étudions le fonctionnement des cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités par la simulation numérique à deux dimensions effectuées sous ATLAS/SILVACO

Mots clés : Energie solaire, Silicium, Cellule solaire standard, simulation numérique 2D, Cellule solaire à contact arrière interdigités IBC, Cellule solaire à contact arrière interdigités à hétérojonction IBC-SiHJ.

Abstract:

Since the birth of the first structure of interdigitated back contact silicon (IBC) solar cells, the evolution of this type are very promising in order to reach the highest efficiencies more 21%. Since no metal contacts are present on the front of the cell, IBC cells in general have a high generated current density (J_{sc}). Other favoris related to the easy integration of the cells in modules. Another promising structure they are the heterojunction solar cells, where the junctions are realized by application of intrinsic and doped amorphous silicon (a-Si) layers on high substrate quality mono-crystalline silicon c-Si material, and who clearly improves the value of open-circuit voltage V_{co} ; and consequently the efficiency η . The combination between these two technologies makes it possible to reaching a high efficiency with interdigitated back contact heterojunction silicon solar cell (IBC-SiHJ). On IBC-SiHJ technology, much of parameters were largely studied like the quality of the substrate, front and rear surface passivation, rear junction design and design and structure of the metallization. These last years' research on structure IBC was conceived to develop this structure and to have the compromise high efficiency / low cost and the solution are the use of the thin layers of silicon. During these last year the search and the development for this photovoltaic cell increased in an exponential way that it is in terms of investments, of a number of scientific publications, or a number of the research laboratories. This interest which opens news sees of research and a fast evolution in the outputs is envisaged in the immediate future. We investigate the optimal design of interdigitated rear contact silicon solar cells by using a two dimensions numerical simulation based on ATLAS /SILVACO software environment.

Keywords: Solar energy, Silicon, Standard solar cell, 2D numerical simulation, Interdigitated back contact silicon (IBC) solar cells, Interdigitated back contact heterojunction silicon solar cell (IBC-SiHJ).

المخلص:

منذ الظهور الاول للخلايا الشمسية ذات الاقطاب(interdigités) المعاكسة لأشعة الشمس المصنوعة عن طريق مادة السيلكون (IBC) حيث هذه الاخيرة لم تلبث في التطور و ذلك بتحصيل مردود يفوق 21%. يتميز هذا النوع من الخلايا بوجود كل من القطبين الموجب و السالب في الجهة المعاكسة لأشعة الشمس كما تتميز ايضا بتركيبها بشكل تسلسلي داخل الشبكة الكهربائية و ارتفاع التيار الكهربائي الناتج (J_{cc}). نوع اخر من الخلايا هي التي تتكون من دمج السلكون الغير بلوري(amorphe) و السلكون البلوري(cristalin) و التي تتميز بارتفاع تواترها (V_{co}) و بالتالي مردودها (η). الدمج بين هاتين التكنولوجيتين ساهم في ظهور الخلية (IBC-SiHJ) و الحصول على مردود اعلى. خلال دراسة هذا النوع تطرقنا الى جميع الاجزاء المكونة لهذه الخلية الفزيائية كما الى القياسات. في السنوات الاخيرة ارتفع الاهتمام بهذا النوع من الخلايا الشمسية بشكل ملحوظ حيث ارتفع عدد البحوث و المقالات المعالجة لهذا الموضوع و عدد المخابر التي تركز على تطوير هذا النوع من الخلايا و الذي يعول عليه في رفع مردوده في المستقبل القريب و ذلك عن طريق المحاكاة الرقمية ثنائية الابعاد المنجزة بواسطة (ATLAS/ SILVACO).

الكلمات المفتاحية : الطاقة الشمسية , السيلكون , الخلية الشمسية الاولى , المحاكاة الرقمية ثنائية الابعاد , الخلايا الشمسية ذات الاقطاب المعاكسة لأشعة الشمس المصنوعة عن طريق مادة السيلكون (IBC) والخلايا الشمسية ذات الاقطاب المعاكسة لأشعة الشمس المصنوعة عن طريق الدمج بين مادة السيلكون البلوري و الغير بلوري (IBC-SiHJ).