

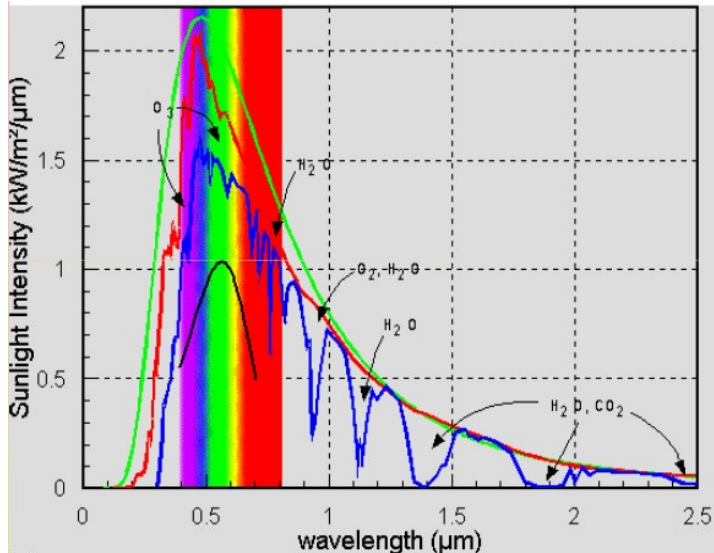
I- Introduction

Les cellules photovoltaïques (PV) ouvrent la possibilité de produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire, sans nécessiter ni pièces mobiles, ni production de chaleur et sans entraîner de pollution atmosphérique, locale ou globale. L'évolution technologique a été importante depuis les premières photopiles qui, en raison de leur coût très élevé et de leur faible rendement, étaient principalement destinées à des applications très spécifiques telles que l'alimentation énergétique des satellites. Les programmes initiés dans de nombreux pays à la suite des chocs pétroliers pour améliorer la productivité des cellules et diminuer leur coût, ont permis une progression sensible des performances où le prix moyen des cellules qui dépassait 100 \$/Wc (Watt Crête) au début des années 1970, a ainsi été ramené autour de 5 \$/Wc à la fin des années 1980 [1]. La production industrielle qui était limitée à quelques dizaines de kWc au début des années 1970, a été multipliée par un facteur mille en l'espace d'une dizaine d'années pour atteindre 10 MWc en 1982, puis 100 MWc en 1997.

La production photovoltaïque mondiale actuelle est à base de silicium cristallin (mono-Si 36,3% et mc-Si : 44%). En effet, cette filière reste la plus avancée sur le plan technologique et industriel, car la technologie du silicium est arrivée presque à sa maturité et le silicium est un matériau abondant sur terre, parfaitement stable et non toxique. Les programmes actuels de recherche et de développement de l'industrie photovoltaïque revêtent une extrême importance aux nouveaux procédés de croissance du silicium cristallin, à la réduction de l'épaisseur des cellules qui représente 60% du coût final du module photovoltaïque, à l'optimisation du concept des structures photovoltaïques et à la minimisation des étapes technologique de fabrication. Aussi, la réduction de la réflectivité de la face avant des cellules photovoltaïque au silicium multicristallin (mc-Si) est un des points essentiels à résoudre pour améliorer leur rendement de conversion solaire. La réduction de la réflectivité est obtenue en texturant la surface des cellules pour

assurer un confinement optique de la lumière et en recouvrant cette surface d'une couche antireflet.

II- Notions préliminaires sur le rayonnement solaire



La surface du Soleil peut être vue comme un corps noir d'une température d'environ 5800 K, conduisant à un pic d'émission autour de la longueur d'onde de 0.5 μm . Le rayonnement moyen hors atmosphère terrestre est d'environ 1.36 kW/m^2 [6]. La traversée de celle-ci engendre une diminution de l'intensité solaire à cause notamment des conditions climatiques, de la latitude, de la saison et de l'absorption par les molécules présentes dans les différentes couches de l'atmosphère (ozone, dioxyde de carbone, vapeur d'eau). Ces dernières absorbent les photons d'énergie proche de leur énergie de liaison, conduisant à des « trous » dans le spectre solaire visible au sol (Figure I-1). Les poussières et aérosols présents dans l'atmosphère induisent une baisse globale de la puissance incidente sur toute la gamme spectrale.

Figure I.1 : Irradiance spectrale pour une atmosphère peu polluée de type méditerranéen, (rouge) AM0, (bleu) AM1 [6].

Afin de définir une référence indépendante de la localisation sur Terre, la notion d'Air Masse (AM) est introduite : c'est la distance parcourue par la lumière à travers l'atmosphère normalisée par la plus petite distance possible (i.e. quand le soleil est au zénith). L'Air Masse donne la réduction de puissance due à la traversée de l'atmosphère. AM1 quand le soleil est au zénith et AM0 hors atmosphère.

Le spectre standard est AM1.5G, correspondant à un rayonnement d'environ 1 kW/m² (G pour global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses). La partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la Terre concerne le domaine du visible (390-780 nm) et du proche infrarouge.

III- Grandeurs liées à l'éclairement

a. Durée d'insolation

Les durées d'insolation sont mesurées avec des héliographes dont le seuil est de 120 W /m². On notera que le nombre théorique maximal est de 4380 h (12h/jour). Attention à ne pas confondre le nombre d'heures d'ensoleillement et le nombre d'heures équivalent plein soleil, dérivé de l'irradiation globale annuelle mesurée dans le plan horizontal.

b. Irradiation

Les résultats de mesures d'éclairement intégrées dans le temps, sont en général présentés sous forme de tableaux mensuels de relevés journaliers exprimés en kWh/m², en J/cm² ou en Langley .

c. Fraction solaire

C'est le paramètre représentatif des conditions de nébulosité du ciel. La nébulosité est le rapport entre la surface du ciel couverte par les nuages et la surface totale du ciel au-dessus du territoire correspondant. Cette notion n'étant que descriptive, on la relie à la fraction d'insolation qui est une grandeur mesurable dès qu'on connaît les durées d'insolation enregistrées par l'héliographe et qui s'en déduit par le rapport $s = S/S_0$ avec S = durée d'insolation mesurée et S_0 durée maximale d'insolation [4].

d. **Rayonnement global**

Le rayonnement solaire arrivant au sol a au moins deux composantes: une composante directe I et une composante diffuse D, le tout formant le rayonnement global G [4].

A) Rayonnement diffus : la composante diffuse provenant de toute la voûte céleste, elle n'a pas d'orientation privilégiée. Elle ne peut donc être concentrée par des instruments optiques. Le rayonnement diffus est plus riche en bleu que le rayonnement global. Les photopiles étant des détecteurs sélectifs, ce point a son importance.

B) Albédo : c'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol ou aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul. Il faudra tenir compte de l'albédo du sol pour montagne, sur l'eau (bouées de navigation), dans les zones désertiques, ou même sur le dimensionnement d'installations solaires installées sur une surface enneigée (refuges de toitures des immeubles. Bien distinguer l'éclairement direct de l'éclairement diffus ; toujours tenir compte de l'albédo pour calculer l'éclairement global.

IV-La cellule photovoltaïque en silicium multicristallin

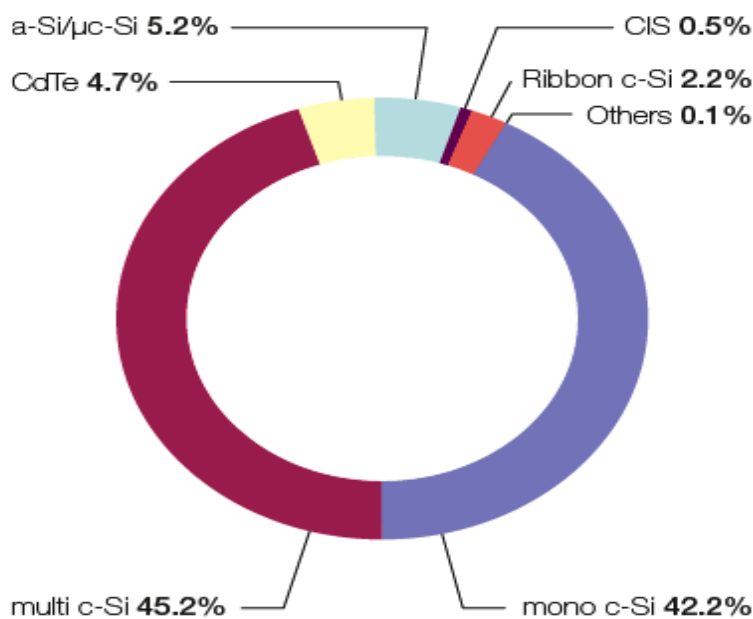
L'industrie photovoltaïque utilise aujourd'hui à près de 90% le silicium comme matériau de base pour les cellules photovoltaïques. Celui-ci présente l'avantage d'être abondant sur Terre et de s'extraire facilement de la silice (généralement sous forme de quartz).

Le silicium est un semiconducteur ayant une structure de bandes à gap indirect d'une valeur de 1,12 eV à température ambiante ce qui signifie qu'un photon d'une longueur d'onde inférieure à 1107 nm pourra générer une paire électron-trou. On parle de photo-génération.

Le silicium possède également un gap direct à 3,4 eV qui donnera lieu à des transitions radiatives pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm. Concrètement, ces deux gaps vont permettre l'absorption des photons incidents (création de paires électrons-trous) par le silicium dont l'efficacité dépendra de la longueur d'onde des photons incidents.

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

1. Le silicium comme matériau de base



Aujourd'hui, plus de 99 % des équipements photovoltaïques utilisent le silicium comme matériau de base. Ce dernier se présente sous différentes formes (Figure I.2), les plus répandues étant le silicium monocristallin, le silicium multicristallin et le silicium amorphe.

Figure I.2: répartition des différents matériaux sur le marché photovoltaïque [9]

Technologie	2004	2005	2006	2007	2008
sc-Si	528	666	1101	1806	3030
	31,5%	31,7%	43,4%	42,2%	38,3%
mc-Si	914	1100	1179	1934	3773
	54,5%	52,3%	46,5%	45,2%	47,7%
Ribbon	55	61	66	94	107
	3,3%	2,9%	2,6%	2,2%	1,3%
c-Si	1 498	1 826	2 346	3 834	6909
	89%	87%	93%	90%	87,3%

Figure I.3: production mondiale des cellules par technologie MW_c (2004-2008)

[9].

Une cellule photovoltaïque convertit directement le rayonnement solaire en électricité. L'illumination de la structure génère un courant ainsi qu'une tension, fournissant une puissance électrique au circuit extérieur. Le

matériau utilisé doit donc à la fois 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. De nombreux matériaux et procédés peuvent potentiellement satisfaire ces conditions pour donner une conversion photovoltaïque. En pratique, les matériaux semiconducteurs, et plus particulièrement le silicium, sont les plus utilisés, le plus souvent sous la forme d'une homojonction p-n [1].

2. Propriétés Photovoltaïque de silicium

Le silicium offre de nombreux avantages. Présent en abondance dans la croûte terrestre (20%), c'est un matériau non toxique. Outre ses propriétés semi-conductrices, le silicium présente un oxyde naturel SiO₂ qui trouve de nombreuses applications en micro-électronique. Enfin, il est aisé de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice cristalline des atomes dopants tels que le Bore (induisant un dopage de type P) ou le Phosphore (induisant un dopage de type N). D'un point de vue photovoltaïque, le seul inconvénient du silicium réside dans sa structure électronique qui présente un gap indirect, $E_g = 1.12$ eV à 300 K, correspondant à une longueur d'onde = 1107 nm – Fig I-4. Ainsi, une transition électronique entre les extrema des bandes de valence et de conduction est oblique : le vecteur d'onde de l'électron est modifié ne

correspondant donc pas exactement au maximum d'intensité du spectre solaire [1]. Par conséquent, l'absorption du rayonnement solaire par le silicium sera plus faible que celle d'un semi-conducteur à gap direct comme l'arséniure de gallium GaAs.

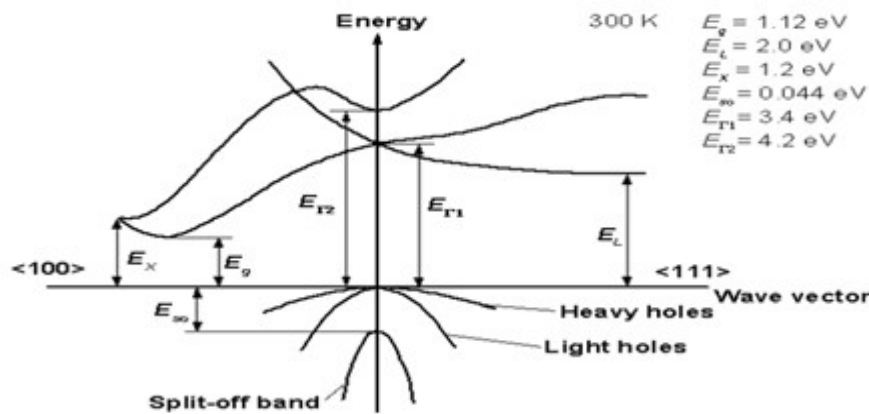


Figure I.4 : structure de bande du silicium [7]

Ainsi, si l'on considère les coefficients d'absorption des matériaux semiconducteurs, l'épaisseur de silicium nécessaire pour absorber 90% du spectre solaire doit être de 100 μm contre une épaisseur de 1 μm pour l'arséniure de gallium [11]. Le silicium utilisé pour les cellules photovoltaïques doit être d'une grande pureté, quelque soit sa forme.

Les différentes formes sous lesquelles est employé le silicium dans l'industrie photovoltaïque.

A. Le silicium monocristallin

La réalisation de nombreux dispositifs commence par la production d'une matière monocristalline de grande pureté. En particulier la fabrication de puces microélectroniques nécessite des substrats monocristallins semiconducteurs, par exemple du silicium, du germanium ou de l'arséniure de gallium. Dans le cas du Silicium, la fusion de zone et le tirage en creuset (méthode de Czochralski) sont les

deux méthodes utilisées couramment pour obtenir des lingots monocristallins de grande pureté longs de plusieurs mètres et d'un diamètre allant jusqu'à 300mm [13] [14]. On a des rendements photovoltaïques élevés, supérieurs à 15 %.

Le silicium monocristallin comporte peu de défauts recombinants et permet d'obtenir les meilleurs rendements. Cependant, son élaboration est très coûteuse, ce qui constitue un frein à son développement industriel pour les applications photovoltaïques.

B. Le silicium multicristallin

Une large partie de cette étude a été menée avec comme objectif les applications aux cellules photovoltaïques industrielles en silicium multicristallin. Nous abordons donc dans ce paragraphe quelques notions élémentaires relatives à ce matériau.

A fin de réduire les coûts de production, le silicium multicristallin, moins onéreux que le silicium monocristallin, a été introduit dans l'industrie photovoltaïque à partir des années 70. Il se présente une nouvelle fois sous forme de lingots de silicium, ce dernier étant constitué de grains d'une taille variant entre le millimètre et quelques centimètres. [3]

Les techniques de production du silicium multicristallin sont beaucoup plus simples que celle de monocristallin donc bien moins onéreuses à mettre en œuvre. Néanmoins, la qualité de ce matériau est moins bonne à cause de la présence de joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes de grains d'orientations cristallographiques différentes (Figure I.5) et contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ils ont pour effet de réduire la durée de vie globale des porteurs. En outre, ces joints de grains bloquent le flux de porteurs et sont une voie éventuelle d'un courant de fuite à travers la jonction.

On peut différencier deux types de défauts dans le silicium multicristallin : les défauts intra-granulaires, similaires à ceux rencontrés dans le silicium monocristallin, et les défauts inter-granulaires.



Figure 1.5 : photo d'un substrat de silicium multicristallin [1].

C. **Le silicium polycristallin**

Le silicium polycristallin quant à lui, on peut réaliser un lingot de grandes dimensions par refroidissement directionnel d'une masse de silicium en fusion. 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.

D. **Le silicium amorphe**

Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, vitreuse, mais il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieur au silicium cristallin. Une fine couche de $0,3 \mu\text{m}$ est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible [15]. Il est obtenu de façon simple par dépôt en phase vapeur sur des substrats économiques tels que le verre, le quartz ou l'aluminium. La décomposition en phase vapeur de silane SiH_4 à basse température (200 à 400°C) permet de déposer du silicium amorphe hydrogéné avec une vitesse avoisinant la dizaine de nanomètres par minute.

Cependant, la grande densité de défauts du silicium amorphe (liaisons pendantes, états d'interface, structure multi-cristallin) limite son rendement de conversion, entre 5 et 6 % et des problèmes de stabilité apparaissent rapidement quand on l'expose au soleil et aux intempéries (quelques centaines d'heures) [3].

3. Techniques de fabrication d'une cellule photovoltaïque conventionnelle en mc-Si

Nous allons présenter le procédé conventionnel de fabrication des cellules photovoltaïques en silicium multicristallin, qui est un compromis entre le coût de production et le rendement. Afin d'appréhender au mieux les contraintes liées au matériau, nous commençons par la méthode de fabrication du silicium multicristallin.

➤ Élaboration des lingots de silicium multicristallin

Il existe plusieurs procédés de production du silicium multicristallin, le procédé le plus utilisé est le POLIX développé par PHOTOWATT où le lingot est obtenu par cristallisation orientée dans un creuset fixe en graphite soumis à un écoulement de chaleur unidirectionnel.

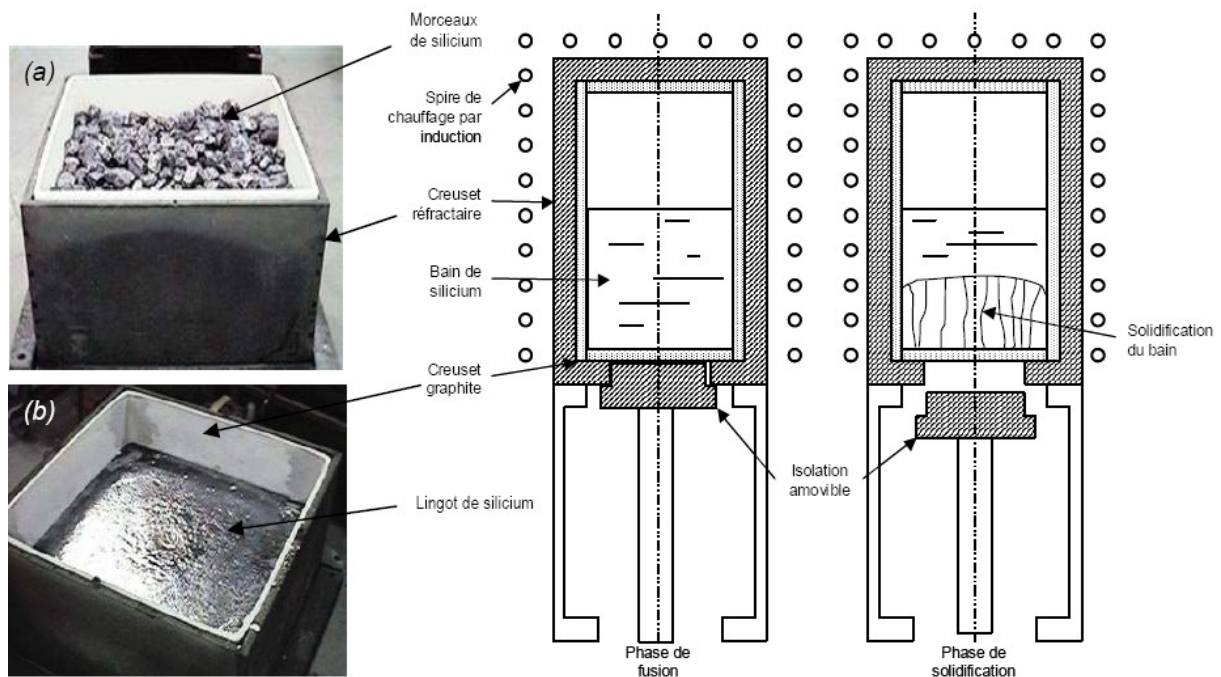


Figure I-6 : Schéma d'un four de croissance de lingot POLIX [3]. Les photos montrent le creuset avec (a) le matériau initial et (b) le lingot obtenu.

➤ **Découpe**

Le silicium se présente sous la forme de gros grains, allongés transversalement à la cellule. Cela accorde aux porteurs minoritaires une longueur de diffusion élevée. Ces lingots sont ensuite découpés en briques grâce à une scie à ruban, qui sont elles-mêmes sciées en plaques minces à l'aide d'une scie à fil.

➤ **Traitement de surface et texturisation**

L'étape de sciage entraîne des dommages en profondeur à la surface des wafers, de l'ordre du rayon du fil de la scie. Un fort décapage à la soude retire la zone perturbée. Puis l'étape de texturisation est entreprise sur les faces avant et

arrière à l'aide d'une solution acide ou basique, pour la formation des pyramides qui constituent des pièges pour le rayonnement incident, augmentant ainsi l'absorption.

➤ **Formation de la jonction pn**

Dans l'étape suivante, le substrat est placé dans un four de diffusion à environ 850°C pendant 20 minutes dans un mélange gazeux de N₂, O₂ et de POCl₃. Un verre de phosphore (P₂O₅) se forme sur tout le pourtour de la plaque, à partir duquel le phosphore va diffuser sur une profondeur moyenne de 0.5 μm. On obtient donc une structure n⁺/p/n⁺. On procède ensuite à la désoxydation, c'est-à-dire l'élimination du verre conducteur, par acide fluorhydrique (HF à 10%). Les substrats sont ensuite rincés à l'eau désionisée.

➤ **Ouverture de la jonction**

Les plaquettes sont superposées les unes sur les autres (~ 400 à la fois) et gravées latéralement par plasma ou laser. L'émetteur n'est ainsi plus en contact avec la face arrière de la cellule.

➤ **Couche antireflet et passivation de la face avant**

Le nitrure de silicium hydrogéné (SiN_x:H) est ensuite déposé par PECVD afin de faire office de couche antireflet et de passivation. On peut noter également que la couche de nitrure de silicium SiN joue le rôle de barrière de diffusion contre les impuretés, réduisant le risque d'introduction, pendant les étapes ultérieures, d'impuretés métalliques pouvant court-circuiter la jonction. De plus, les contacts métalliques lors de leur recuit pénètrent moins profondément dans l'émetteur. La technique PECVD permet d'obtenir des vitesses de dépôt relativement élevées à basse température (< 400°C).

➤ **Métallisation avant**

Les contacts avant sont déposés par sérigraphie avec une pâte à l'argent au travers d'une grille. Puis, ils sont séchés dans une étuve à air à 150°C pendant un quart d'heure.

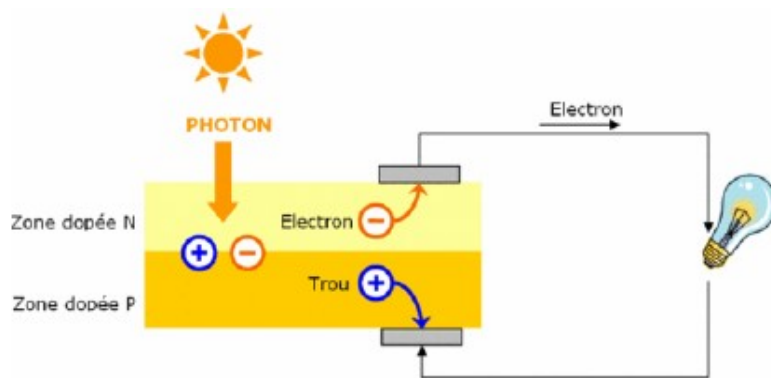
➤ **Métallisation arrière**

Une pâte en aluminium est ensuite déposée sur la quasi-totalité de la face arrière. De même, le métal est séché dans une étuve à air à 150°C pendant un quart d'heure.

- **Co-firing** : formation des contacts, passivation du volume et de la face arrière, la cuisson simultanée des contacts « co-firing » permet de combiner la formation des contacts avant (à travers le SiN) et arrière (BSF), ainsi que les effets getter (Al) et passivation par hydrogénation (SiN_x:H). Elle se fait par cuisson rapide sous air à environ 800°C pendant quelques secondes.
- **Soudures et test des cellules**

Les rubans de connexion sont ensuite soudés à température ambiante sur les faces avant et arrière. Finalement, les cellules sont testées et classées selon leurs performances.

4. Principe de fonctionnement de la cellule solaire en mc-Si



Le principe d'une cellule photovoltaïque est de transformer des photons absorbés par un semiconducteur en porteurs de charges électriques (électrons et trous). Cette création de charges va entraîner la création d'une différence de potentiel aux bornes d'électrodes et d'un courant électrique dans un circuit connecté aux électrodes. La Figure I.7 présente le principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque d'électricité.

Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

L'intérêt de l'utilisation des semiconducteurs pour la réalisation de cellules solaires tient à la possibilité de moduler dans le temps et dans l'espace la concentration interne des porteurs de charges. Cette faculté est elle même dépendante de la structure électronique fondamentale des semiconducteurs qui les différencie nettement des métaux et dans une moindre mesure des isolants [4].

L'optimisation de la conversion de l'énergie solaire en électricité requiert au moins que trois phénomènes physiques de base aient lieu quasi-simultanément:

- l'absorption du maximum possible de photons;
- la transformation de l'énergie ainsi absorbée en charges électriques libres;
- et la collecte sans perte de ces derniers dans un circuit électrique extérieur.

Une photopile solaire doit donc être constituée:

- d'un matériau absorbant dans la bande optique du spectre solaire, possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie, transformant l'énergie lumineuse sous forme potentielle et non thermique,
- et d'une structure de collecte de faible résistance électrique.

L'effet photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique utilisable de type continue.

La cellule solaire n'est sensible que dans un domaine de longueur d'onde particulier et seul un matériau semiconducteur dispose de la structure de bandes nécessaire à la génération des paires électrons/trous à partir du rayonnement solaire.

Dans un semiconducteur, la structure des bandes de conduction et de valence définissent un gap plus faible que dans le cas des isolants : 0,3 à 2 ou 3 [5]. Si le minimum de la bande de conduction coïncide avec le maximum de celle de valence le gap est dit direct, les transitions sont donc directes et radiatives.

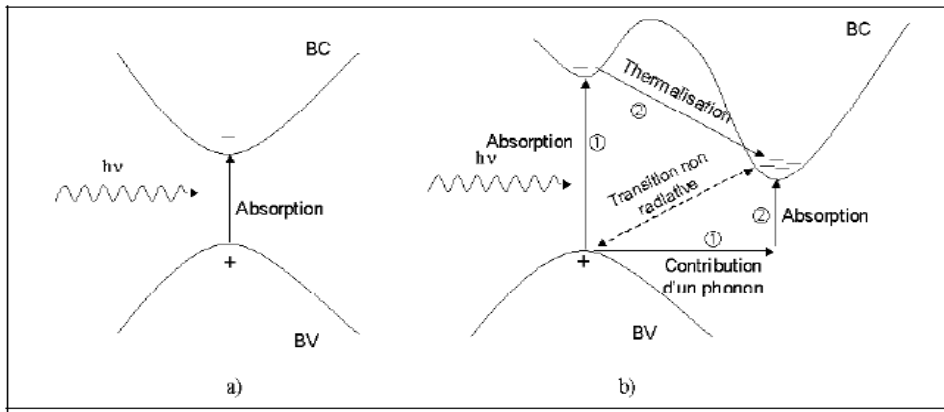
Dans le cas de silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques et par conséquent non radiatives puisqu'elles

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 l'absorption de photons de grande énergie pour que la transition s'effectue dans le gap indirect. Ainsi, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (figure I.8).

Le silicium est un semiconducteur ayant une structure de bandes à gap indirect d'une valeur de 1,12 eV à température ambiante, ce qui signifie qu'un photon d'une longueur d'onde inférieure à 1107 nm pourra générer une paire électron-trou. On parle de photogénération.

Le silicium possède également un gap direct à 3,4 eV qui donnera lieu à des transitions radiatives pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm. Concrètement, ces deux gaps vont permettre l'absorption des photons incidents (création de paires électrons-trous) par le silicium dont l'efficacité dépendra de la longueur d'onde des photons incidents (figure I.8).

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



a) **Gap direct**

b) **Gap indirect**

Figure I.8 : Transition inter-bande d'électrons dans un semi-conducteur.

Une cellule photovoltaïque comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électron, dites respectivement dopée n et dopée p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement et la zone initialement dopée p chargée négativement, il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous dans la zone p. Une jonction dite p-n a été formée.

En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie supérieures ou égale à la largeur de la bande interdite E_g (1,12 eV pour le silicium) communique leurs énergies aux atomes où chacun fait passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir. Ce dernier, engendre ainsi une paire électron/trou [5].

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule (figure I.9).

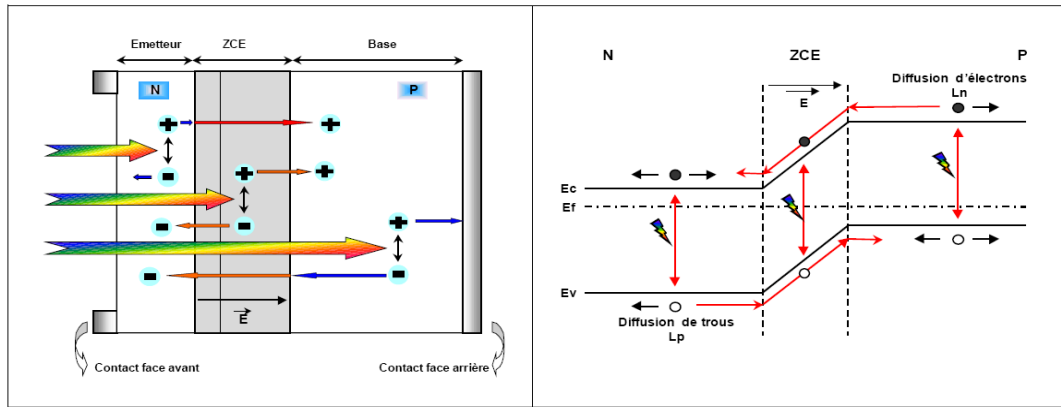


Figure I.9: Structure d'une cellule (à gauche) et son diagramme de bande (à droite) [5].

Schéma électrique équivalent

L'équation (I.1) ci-dessous 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. Ce modèle est représenté par le schéma électrique suivant (Figure I.10)

Figure I.10 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

L'équation du courant devient :

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 et l'émetteur. I_{01} est le courant de saturation dû à ce phénomène. I_2 est le courant de génération/recombinaison ou d'effet tunnel dans la zone de charge d'espace, avec I_{02} est le courant de saturation et n_2 le facteur d'idéalité de la seconde diode ($n_2 \approx 2$)[59].

5. **Les caractéristiques électriques**

La partie principale d'une cellule photovoltaïque est une jonction PN. C'est l'éclairement de cette jonction qui va générer des porteurs de charges et permettre de récupérer une puissance électrique. On distingue deux régimes de fonctionnement qui dépendent de la polarisation de la diode : la polarisation directe qui correspond au régime passant (si le potentiel appliqué est supérieur à celui de la barrière de potentiel V_0) et la polarisation inverse qui correspond au régime bloqué (figure I.11 : courbe sous obscurité). En régime passant, la barrière de potentiel est levée, les porteurs majoritaires peuvent traverser la jonction sans être bloqués, un courant apparaît. En régime bloqué, seuls les porteurs minoritaires peuvent créer un courant dans la diode car ils n'ont pas de barrière de potentiel qui les retiennent. Ce courant est le courant I_0 ou courant de saturation.

Sous éclairement :

Les photons incidents vont générer des paires électron/trou dont le comportement va différer selon la zone d'absorption :

- Dans la zone de charge d'espace (ZCE) engendrée par la jonction p-n, les paires électron/trou créées sont dissociées par le champ électrique. Les électrons sont accélérés puis injectés dans la zone n (émetteur) et les trous dans la zone p (base). Un courant photocourant de génération est créé ;
- Dans les zones de base et d'émetteur, les porteurs minoritaires générés (trous dans l'émetteur et électron dans la base) vont diffuser vers la ZCE. S'ils atteignent cette dernière avant de se recombiner, ils sont injectés dans la zone n pour les électrons et dans la zone p pour les trous et deviennent majoritaires. Un photocourant de diffusion est créé.

Ces deux contributions s'ajoutant pour donner le photocourant de porteurs minoritaires résultant I_{ph} . Il est proportionnel essentiellement à l'intensité lumineuse.

Sous obscurité :

Le courant dans une telle structure de type jonction p-n est appelé courant d'obscurité et il a la forme suivante :

$$(1.2)$$

Avec

q est la charge élémentaire ($q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C),

V est la tension aux bornes de la jonction,

k est la constante de Boltzmann ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹) et

T est la température (K)

Ce courant d'obscurité correspond au courant de diode (I_d), le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit alors :

$$(I.3)$$

Soit

$$(I.4)$$

Ainsi, dans une cellule solaire deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et le courant d'obscurité. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode tandis que sous éclairement la caractéristique à l'allure présentée sur la figure I.11.

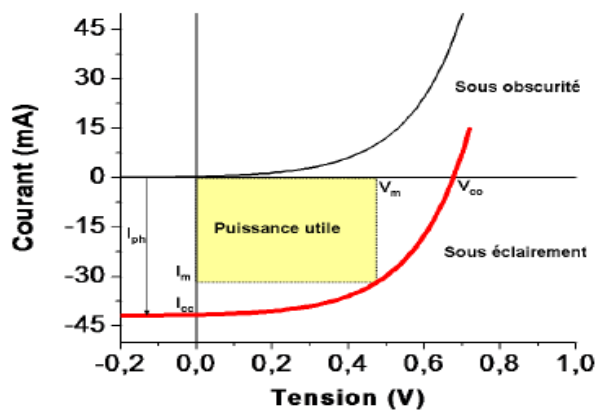


Figure I.11: Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairement et sous obscurité.

Plusieurs paramètres importants caractérisent la courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque :

- V_{co} : tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule sous éclairement et sans circuit de charge.
- I_{cc} : courant de court-circuit mesuré sous éclairement et en annulant la tension aux bornes de la cellule
- I_m et V_m : courant et tension qui correspondent à la puissance maximale P_m fournie par la cellule photovoltaïque avec :

(I.5)

➤ FF : facteur de forme qui détermine la qualité électrique de la cellule :

(I.6)

➤ η : rendement de la cellule qui correspond au rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance solaire incidente :

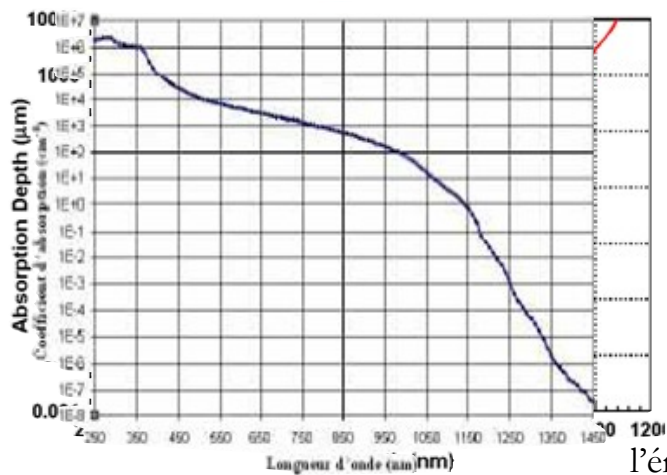
(I.7)

Réponse spectrale de la cellule photovoltaïque

La réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. La réponse spectrale RS est donnée par la relation :

(I.8)

Le rendement EQE (external quantum efficiency) représente le rendement quantique externe de la cellule, c'est-à-dire le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents. Pour une longueur d'onde donnée, le rendement quantique externe est égal à 1 si chaque photon génère une paire électron-trou. Si l'on prend en compte la réflectivité de la surface de la cellule photovoltaïque, on détermine son rendement quantique interne IQE.



On peut alors accéder au comportement et à l'efficacité de chaque région constitutive de la cellule. Ainsi, en raison de la variation du coefficient d'absorption du silicium en fonction de la longueur d'onde (Figure I.12.a), l'émetteur (en surface de la cellule)

collecte les photons de faible longueur d'onde alors que la base ne prend en compte que les photons de grande longueur d'onde.

(a) (b)

Figure I.12: (a) Coefficient d'absorption du silicium en fonction de la longueur d'onde. (b) la profondeur d'absorption de silicium.

2. Pertes physiques et technologiques

La base pour réaliser un rendement élevé est la réduction de la totalité des pertes. Les considérations et les calculs suivants sont basés exclusivement sur les cellules solaires faites à base de silicium cristallin. La Figure I.13 donne une vue d'ensemble et une classification des différents mécanismes des pertes. Ceux-ci peuvent être divisés principalement en deux secteurs soit aux restrictions purement physiques liées au matériau, soit aux limitations technologiques induites par le processus de fabrication. Cependant, des choix technologiques appropriés peuvent avoir des conséquences sur les limitations intrinsèques du matériau [1].

Figure I.13 : Mécanismes de perte dans une cellule solaire.

1. **Pertes physiques**

➤ *Pertes par les photons de grande longueur d'onde*

Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semiconducteur ($\lambda > \lambda_g$) ne peuvent générer de paire électron-trou et sont donc perdus. Les mécanismes d'absorption assistée par phonons permettent néanmoins de repousser la limite inférieure de l'énergie correspondante au gap du matériau (1.052 eV au lieu de 1.124 eV dans le cas d'une absorption assistée par un phonon dans le silicium [8]). Sous un éclairage d'AM1.5, ces pertes sont évaluées à 18.5% dans le cas du silicium [20].

➤ *Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons*

Un photon absorbé génère seulement une paire électron/trou. L'excès d'énergie, supérieur à la largeur de la bande interdite, est principalement dissipé sous forme de chaleur. Sous un éclairage de AM1.5, ces pertes sont évaluées à 47% de la puissance totale dans le cas du silicium [20].

➤ *Recombinaisons des porteurs générés*

On considère deux types de recombinaison, qui ne dépendent que de la qualité du matériau :

1/- Les recombinaisons de surface : elles sont dues aux défauts cristallographiques présents à la surface et à la contamination, tels que les liaisons pendantes, les zones écrouies induites par le sciage des lingots. Elles sont caractérisées par S : vitesse de recombinaison en surface des porteurs minoritaires, qui peut varier de 10 cm/sec pour des surfaces très bien passivées à 10^7 cm/sec pour des surfaces très recombinantes ;

2/- Les recombinaisons en volume : elles sont dues aux défauts cristallographiques du substrat, notamment à la présence d'impuretés et de dislocations au sein du matériau. Elles sont caractérisées par L_b : longueur de diffusion des minoritaires et par τ_b : durée de vie des porteurs minoritaires, ces deux grandeurs étant liées par la relation :

$$L_b =$$

D étant le coefficient de diffusion des porteurs considérés. L_b est proche de l'épaisseur de la cellule. Moins il y aura de recombinaisons en volume et plus le rendement de la cellule sera élevé [17].

➤ *facteur de tension*

Le facteur de tension est le rapport entre la tension de circuit ouvert (V_{oc}) par la tension de gap . La tension d'une cellule ne correspond qu'à une fraction de sa tension de gap notamment à cause des recombinaisons Auger ou encore de la température de la cellule [18].

➤ ***facteur de forme***

Ce facteur est lié à la forme de la caractéristique courant-tension de la cellule régit par les équations de Boltzmann. Du fait du caractère exponentiel de cette dernière, il lui est impossible d'être rectangulaire. Dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme vaudrait 0.89 [18].

2. **Pertes technologiques**

➤ ***Pertes de photons incidents***

Le silicium est un matériau faiblement absorbant, d'aspect métallique très réfléchissant : l'indice de réfraction du silicium étant environ 3.05, le coefficient de réflexion d'une interface air/Silicium est de l'ordre de 39%, ce qui représente les pertes directes de photons par réflexion sur la face avant, et son coefficient d'absorption diminue très vite au voisinage du gap, conduisant à des pertes par transmission dans le proche infra-rouge. Pour diminuer les réflexions face avant, une solution courante est le dépôt d'une couche très fine de $\text{SiN}_x:\text{H}$ de quelques dizaines de nanomètres dont l'indice de réfraction (varie entre 1.9 – 2.3) est inférieur à celui du Silicium, ou une double couche antireflet. Pour augmenter l'absorption dans le silicium, il faut augmenter le trajet optique des photons, c'est-à-dire les confiner dans l'épaisseur de la plaque [19].

➤ ***Pertes par ombrage de la surface active de la cellule.***

Le dépôt des contacts métalliques nécessaires pour collecter les charges photogénérées entraîne une zone d'ombrage sur la surface exposée de la cellule en face avant qui est « perdue » pour la conversion photovoltaïque. Dans le cas des cellules à contacts arrières (ou RCC pour Rear Contact Cell), le taux d'ombrage est nul [2].

➤ ***Pertes par absorption***

L'épaisseur finie des cellules peut limiter l'absorption de certains photons. Dans le cas du silicium, du fait de son gap indirect, les photons infrarouges sont particulièrement exposés à ce problème.

➤ ***pertes de collecte***

Le rendement de collecte correspond au rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés et le nombre total de charges photogénérés. Ce terme prend en compte les recombinaisons électrons-trous en volume et en surface de la cellule. Il dépend directement de la durée de vie des porteurs minoritaires et donc de leur longueur de diffusion L via la relation : $L = \sqrt{\tau D}$ avec D coefficient de diffusion. Pour le silicium multicristallin de type P, L est de l'ordre de la centaine de μm pour les électrons.

3. Limitation des pertes : le cas de la cellule en silicium cristallin conventionnelle

La recherche et les techniques actuelles ont permis de réduire, parfois significativement, les pertes de rendement. La figure I.14 représente la coupe d'une

cellule photovoltaïque en silicium qui comprend les optimisations industrielles les plus courantes :

➤ **L'émetteur et la base**

L'émetteur (dopage type N) est réalisé par dopage en surface d'un substrat de silicium de type P. La partie dopée P du substrat (c'est-à-dire la majeure partie de celui-ci sauf la surface) constitue la base. L'interface de ces deux zones est celle d'une jonction PN qui permet de dissocier les paires électron-trou créées. L'épaisseur totale de la cellule est actuellement proche de 200 μm . Les trous photogénérés ayant une longueur de diffusion (L_p) plus faible que celle des électrons (L_n). En pratique, on réalise un émetteur de faible épaisseur (0,2 - 0,3 μm) mais fortement dopé ($\approx 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) et une base de plus grande épaisseur faiblement dopée ($\approx 10^{15}$ à 10^{16} cm^{-3}) [2].

Le fort dopage de l'émetteur permet de limiter la résistance du contact métal-semiconducteur (créé par la connexion entre les contacts métalliques et l'émetteur) et de créer un champ électrique suffisant au niveau de la ZCE.

➤ **La texturisation de la surface**

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturisation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. Le relief créé permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides [1]. La texturisation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité. Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturisation : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturisation mécanique, plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 39 % à moins de 10 %.

➤ **Les contacts face avant et face arrière**

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photogénérés vers le circuit externe. Pour assurer efficacement cette tâche, les contacts doivent être ohmiques. De mauvais contacts, c'est à dire entraînant une forte résistance série, auront essentiellement une répercussion sur le facteur de forme de la cellule et sur le courant récupéré [2].

➤ **La passivation**

Sur les surfaces de la cellule, le réseau cristallin s'interrompt brutalement. Certaines liaisons électroniques du silicium sont pendantes et deviennent des centres de recombinaisons pour les porteurs de charges. A ces liaisons s'ajoutent les impuretés présentes dans le réseau cristallin et les défauts du cristal (dislocations. . .).

La passivation consiste à améliorer la qualité électronique en surface et en volume en neutralisant les sites actifs, sources de recombinaisons. Les deux mécanismes de passivation de la surface qui permettent de réduire les recombinaisons sont les suivants [2]:

A. Passivation par neutralisation des défauts d'interface

C'est une passivation chimique des défauts de l'interface par un matériau ayant une affinité chimique forte avec le substrat (SiN, SiO₂ thermique,...). Les atomes de ce matériau comblent les liaisons pendantes et induisent une diminution de la valeur de D_{it} (densité d'états d'interface).

B. Passivation par effet de champ.

La présence de charges dans certains matériaux déposés (comme dans le nitrure de silicium déposé par plasma) entraîne l'existence d'un potentiel de surface

et d'une courbure de bande au sein du silicium (on note Q_f la densité de charges fixes). Cette courbure réduit la concentration d'un des deux types de porteurs en surface et limite le taux de recombinaison entre eux. La passivation par effet de champ peut également être mise en place à l'aide d'un dopage supplémentaire. C'est ce qui est fait habituellement sur la face arrière des cellules : la barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et la face arrière tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base et à les éloigner du bord du cristal. Ce dopage est généralement réalisé grâce aux contacts arrière à base d'aluminium qui viennent former un alliage avec le silicium lors de leur recuit. Dans ce cas, il se forme une zone dopée P^+ sur l'ensemble de la face arrière de la cellule (on parle de BSF ou champ de surface arrière). Une bonne passivation impose d'avoir de faibles valeurs de D_{it} et de grandes valeurs de Q_f . La passivation en volume se fait essentiellement par diffusion d'hydrogène : soit par hydrogénation du substrat, soit par un recuit haute température d'une couche hydrogénée déposée au préalable ($SiN_x:H$).

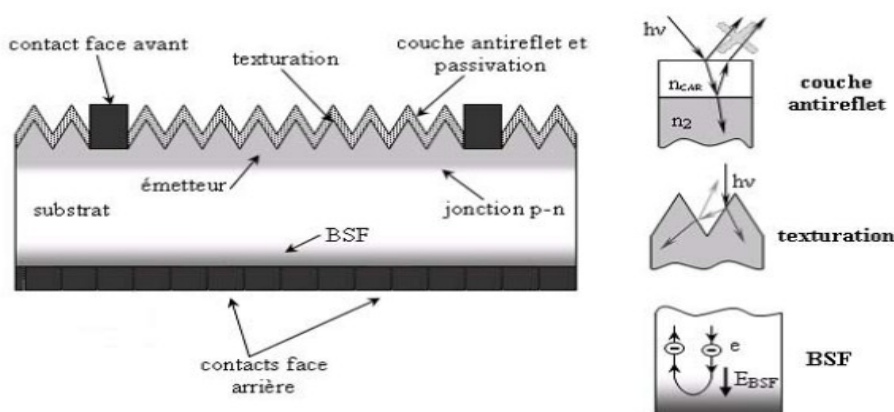


Figure I. 14: Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium [2].

4. **Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de synthétiser un état de l'art à partir d'une recherche bibliographique subtile sur le rayonnement solaire, l'effet photovoltaïque, les cellules solaires conventionnelles et la technologie de leurs élaborations. Plus loi,

cet état de l'art a mis en évidence un ensemble des aspects théoriques et technologiques des cellules photovoltaïques en silicium multicristallin nécessaires pour la compréhension de ce qui suivra dans ce manuscrit tout en se basant sur une explication des différents types de pertes rencontrés.

Bibliographie de chapitre I

[1] : **Jean-François LELIEVRE**. *Elaboration de $\text{SiN}_x:\text{H}$ par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques*. Thèse de doctorat. INSA de Lyon. 2007.

[2] : **Julien DUPUIS**. *Elaboration et caractérisation de couches de $\text{SiO}_x\text{N}_y:\text{H}$ et $\text{SiN}_x:\text{H}$ réalisées par méthode PECVD : application à la face arrière des cellules photovoltaïques en silicium*. 2009-ISAL-0085 Année 2009.

[3] : **S. Quoizola**, *Épitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût*. Thèse de doctorat. INSA de Lyon. 2003.

[4] : **Alain Ricaud**, *Convertisseurs photovoltaïques*. Nov. 2007

[5] : **Fatima ABDO**, *croissance des couches minces de silicium par épitaxie en phase liquide à basse température pour application photovoltaïques*. Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2007.

[6]: **HONSBURG C. and BOWDEN S.** *Photovoltaic: Devices, Systems and Applications* [CDROM]. Sydney, Australia: University of New South Wales, 1998.

[7]: <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/Si/bandstr.html>

[8]: **GREEN M.A.** *Silicon Solar Cells. Advanced Principles and Practice*. Sydney, Australia. Centre for photovoltaic devices and systems, UNSW, 1995, 366 p.

[9] : **Bernard FONTAINE** *La production photovoltaïque d'électricité* . CNRS. Juillet 2009.

[10]: **Goetzberger A, Hebling C.** *Photovoltaic materials*, past present, futur. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2000, vol.62, pp. 1-19.

[11]: **Goetzberger A, Hebling C, Schock H. W.** *Photovoltaic materials*, history, status and outlook. Material Science and Engineering R 40, 2003, pp. 1-46.

[13] : **P.H. Haumesser.** *Elaboration par croissance Czochralski, caractérisation spectroscopique et propriétés laser de monocristaux dopés par l'Ytterbium*. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie ,2000.

[14]: **G.C. Joyce, D.T.J. Hurle et Q.QA.E. Vaughan.** *Novel Development of the Weighing Method for Automatic Czochralski Crystal Growth of Semiconductors*. Journal of Crystal Growth 132, 1 (1993).

[15]: <http://membres.lycos.fr/energiesoltpe/principe.htm>.

[16] : **RICAUD A.** *Photopiles solaires*. Lausanne, Suisse : Presse polytechniques et universitaires romandes, 1997, 332 p.

[17] : **M. MADANI.** *Réalisation des couches antireflets dans des cellules solaires à couches mince*. Thèse de magistère en physique, université de Tlemcen, 2006, PP 96-97.

[18] : **SZLUFCHIK J., SIVOTHAMAN S. NLIS J.F. et al.** *Low-cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells*, Proceeding of the IEEE vol.85 (1997) n°5, pp. 711-729.

[19] **A. Ould Abbas-Bensaoula**, thèse de doctorat d'état 2003 LPM, Tlemcen.

[20] A. ZERGA « Modélisation, Simulation et Caractérisation des Cellules Solaires au silicium » Synthèse des travaux de recherche de l'habilitation universitaire présentée à l'Université de Tlemcen (2009).