République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE d'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER en PHYSIQUE des matériaux

Thème

Optimisation et simulation des réflecteurs arrière (BSR) en vue d'une application sur des cellules solaires en silicium cristallin

Soutenu le : Septembre 2015

Présenté par :	**Membres de jury** :
Melle : *Bentahar Merbouha*	**Président** :
	Dr : Dalil AHMED *(Univ. d'Adrar)*

Encadré par :	**Examinateurs :**
Mr : Sahouane Nordine MR (URER/MS. Adrar)	**Mr :** Barbaoui *brahim MR (URER/MS.Adrar)*

DEDICACE

Il existe dans le monde des êtres chers, à qui nous leurs devons presque tout, et qui compte beaucoup pour nous ; et rien ne être accompli pour leur rendre tout ce qu'ils nous ont apporté dans la vie.

Je dédis ce modeste travail scientifique

A…

- *Mes très chers parents, sources de toute joie, espoir et savoir;*
- *Mes frères et mes sœurs;*
- *Toute ma famille; et surtout Amira, Meriem, Anissa, Abbas, Ayoub, Fouâd, Mebrouk, maroi et yassine.*
- *Ainsi, Tous mes amis.*
- *Tous ceux qui m'ont en courage de pré renonce, qui m'ont aidé de prés ou du loin pour l'élaboration de projet, et à tous ce qui mon accompagné dans le chemin de Connaissance.*

Merbouha

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à m'incliner devant la majesté du TouT PUISSAN, lui seul pourra nous donné la force d'accomplir tant de chose. Louange à toi.

Je tiens d'abord à remercier tous ceux qui contribué de loin au de prés, à ce que ce cursus ce tiens des bonnes conditions.

Je remercié très sincèrement " M. SAHOUINE NOURDINE " Mon encadreur de ce travail, pour ses conseils pertinents et ses orientations judicieuses sa patience et diligence, et par ses suggestions et critiques à grandement facilités ce travail.

Je voudrais à cette occasion, remercie les membres du jury pour le temps qu'ils vont consacrer à l'examen de ce manuscrit.

J'exprime mes vifs remerciements aux Monsieur " OMARI BOUMEDIENE " et " GUENFOUD.MOHAMMED " professeurs à l'université d'Adrar.

Mes remerciements s'adressent également à " Mr MONGAR HOUCINE" à ***l'Unité de recherche en énergies renouvelables*** *Adrar.*

BENTAHAR MERBOUHA

La liste des figures

Figure N° **Page**

Figure I.1 : Distribution spectrale de l'éclairement solaire sous les conditions de masse d'air « air mass » A.M.1.5 ……..……..... 03

Figure I.2 : Structure d'une cellule photovoltaïque……..….. 04

Figure I.3 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle…….…..... 06

Figure I.4 : (a) Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairement et sous obscurité et (b) représentation conventionnelle de la courbe I(V)……... 07

Figure I.5 : Mécanismes de perte dans une cellule solaire……...…… 08

Figure I.6 : Coefficient d'absorption et profondeur de pénétration de la lumière dans le silicium cristallin en fonction de la longueur d'onde à 300K……... 09

Figure I.7 : Piégeage optique…….…... 10

Figure I.8 : Spectre en nombre de photons par seconde et par nanomètre de longueur d'onde absorbé par centimètre carré de cellules solaires de différentes configurations… 10

Figure I.9 : Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium……..... 14

Figure I.10 : Réflexions dans le système Air/CAR/Silicium……. 14

Figure I.11 : Réflexions dans le système silicium/BSR/AIR…… 15

Figure I.12 : Structure à 3 couches…… 15

Figure II.1 : Types et grades de pureté du silicium cristallin…… 17

Figure II.2 : Répartition des différents matériaux sur le marché photovoltaïque…….. 18

Figure II.3 : Modèle moléculaire d'une silice cristalline……..……. 18

Figure II.4 : Photos des déférents substrats de silicium……..……... 19

Figure II.5 : Structure cristalline du silicium……. 20

Figure II.6: Structure de bande du silicium……... 21

Figure II.7 : Structure de l'oxynitrure Si_2ON_2 …….. 21

Figure II.8 : Structure cristalline des configurations et du Si_3N_4 et du Si_2N_2O. Les plans rayés sont perpendiculaires à l'axe c…… 22

Figure II.9 : Coordination des tétraèdres dans la silice……. 23

Figure II.10 : Structure microscopique du nitrure de silicium…….. 25

Figure II.12 : Schématisation des procédés de fabrication de silicium purifié à partir d'un précurseur gazeux……... 26

Figure II.13 : Procédés de croissance de lingots de silicium classiques……... 27

Figure II.14 : La Structure d'un diélectrique……..……...……... 28

Figure II.15 : Simulation à l'aide du logiciel IMD (Bell Labs) de la réflectivité de la face arrière avec un diélectrique entre le métal et le silicium. Le schéma de droite représente la structure simulée……... 31
Figure III.1 : Courbe de l'irradiance solaire en fonction de la longueur d'onde……..….... 33
Figure III.2 : Transition inter-bande d'électrons dans un semi-conducteur……. 34
Figure III.3 : Les angles d'incidence de réflexion et de transmission……... 34
Figure III.4 : Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque…….. 35
Figure III.5 : La réflexion et la transmission d'une onde électromagnétique incidente sur l'interface d'un milieu semi-infini……..…… 37
Figure III.6 : Réflexion et transmission de lumière à l'interface entre 2 milieux d'indices de réfraction respectifs n_1 et n_2……..……...…… 37
Figure III.7 : 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……..... 40
Figure III.8 : L'amplitude du rayonnement à la traversée d'une couche……. 42
Figure III.9 : Les amplitudes à la traversée d'un empilement……. 43
Figure IV.1 : La réflexion au niveau de réflecteur……..…… 45
Figure IV.2 : Comparaison de la réflectivité simulée entre l'oxyde de silicium et le nitrure de silicium…….. 47
Figure VI.3 : Influence de l'épaisseur (d) et l'indice de réfraction (n) sur la réflectivité (R)….. 48
Figure IV.4 : Réflectivité et rendement quantique externe simulés respectivement par Matlab et par PC1D pour les couches BSR (a) l'oxyde de silicium et (b) le nitrure de silicium……... 52

La liste des tableaux

Tableau N° **Page**

Tableau II.1 : Les propriétés d'oxyde, d'oxynitrure…….…….. 30

Tableau IV.1 : Les paramètres optiques de la CAR……... 46

Tableau IV.2 : La réflectivité pour des valeurs d'épaisseur supérieur à 300 nm…….. 48

Tableau IV.3 : Les paramètres de la cellule sur PC1D…….. 50

Tableau VI.4 : Résultats de simulation de réflectivité (Matlab) et de courant de court-circuit(PC1D) pour un réflecteur dans le cas d'une cellule photovoltaïque……... 51

Nomenclature

Notation Latines

Symbole	Désignation	Unité
AR	Antireflection	[/]
IAD	Ion Assisted Deposition	[/]
RLVIP	Reactive Low Voltage Ion Plating	[/]
RF Radio	Frequency	[/]
RLVIP	Reactive Low Voltage Ion Plating	[/]
AM	Air Mass	[/]
ZCE	Zone de charge d'espace	[/]
c	Vitesse de propagation de la lumière dans le vide	[m. s^{-1}]
D	Coefficient de diffusion du matériau	[$m^2.s^{-1}$]
Eg	Énergie du photon	[eV]
EQE	Rendement quantique externe	[%]
FF	Facteur de forme de la cellule	[%]
G	Taux de génération optique	[m^{-3}. s^{-1}]
h	Constante de Planck	[eV]
Icc	Courant de court circuit de la diode	[A]
Im	Courant maximal	[A]
IQE	Rendement quantique interne	[%]
K	Constante de Boltzmann	[J. K^{-1}]
k	Coefficient d'extinction	[%]
LD	Longueur de diffusion	[m]
N	Indice complexe de réfraction	[/]
n	Indice de réfraction	[/]
R	Coefficient de réflexion du matériau	[%]
S	Surface de la cellule	[m^2]
SR	Réponse spectrale	[/]
Sp	Surface spécifique	[m^2/m^3]
T	La température du substrat	[° C]
T	Coefficient de transmission	[%]
Vm	Tension maximale	[Volt]
Voc	Tension de circuit ouvert	[Volt]

Caractères Grecs

Symbole	**Désignation Unité**	**Unité**
α	Coefficient d'absorption	[cm^{-1}]
ε	La permittivité complexe du matériau	[/]
ν	Vitesse de la lumière dans le milieu considéré	[$m.s^{-1}$]
η	Rendement	[%]
θ	Angle d'inclinaison	[degré]
λ	Longueur d'onde	[µm]
τ	Durée de vie des porteurs minoritaires	[s]

Sommaire

Sommaire

Introduction Générale……1

Chapitre I : État de l'art d'une cellule solaire

I.1. Introduction 3

I.2. Fonctionnement d'une cellule solaire 4

I.2.1. Le principe de fonctionnement……..4

I.2.2. Le schéma électrique d'une cellule solaire……...…5

I.2.3. Caractérisation électrique…….……6

I.3. Les pertes physiques et technologiques…….……8

I.3.1. Les pertes optiques…….....9

1. La réflexion……...10
2. Ombrage….....11
3. Radiation non absorbée……11

I.3.2. Les pertes électriques…….……..11

1. Pertes dues à la recombinaison……..…..…..…….…11
2. Pertes Ohmique .....……..……..……12

I.4. Les solutions techniques ……12

I.4.1. Au niveau émetteur/ base ……...12

I.4.2. La texturisation……13

I.4.3. Les contacts face avant et face arrière…….…..……..……..13

1. La passivation…….……..…….…...13

2. La couche antireflet….……..……....14

I.5. Conclusion……..…16

Chapitre II : Le silicium Et Les techniques d'élaboration

II.1. Introduction……18

II.2. Le silicium et ces composés……..19

II.2.1. La silice……..19

II.2.2. Comparaison entre les différentes formes de silicium ...…….…..20

II.2.3. Le silicium……..21

II.3. Les polymorphes de silice……..21

II.3.1. Les composés de type SiOx……...21

II.3.2. Les composés de type SiOxNy……..22

II.3.3. Les composés de type SiNy……...23

II.3.4. Les composés de type SiN_X:H……...24

II.4. Les amorphes du silicium ……24
II.4.1. Les amorphes du silicium de type Si-O_4……24
II.4.2. Les amorphes du silicium de type Si-N_4……....25
II.4.3. Les amorphes du silicium de type oxynitrures……..…25
II.5. Les procédés de production du silicium……...…26
II.5.1. La purification de silicium……..…26
II.5.2. Le procédé Czochralski……28
II.5.3. Le procédé de solidification directionnelle……28
II.6. Les diélectriques….……..29
II.6.1. Les oxydes, nitrure et oxynitride.……..…29
II.6.3. Le silicium poreux…….……31
II.6.4. Influence d'un diélectrique sur la réflectivité de la face arrière……32
II.7. Conclusion……..…..33
Chapitre III : Modélisation des BSR d'une cellule solaire
III.1. Introduction……..…….……..….34
III.2. Les paramètres optiques…….….…....34
III.2.1. L'absorption des rayonnements……34
III.2.2. La transmission……35
III.2.3. La réflectivité……36
III.3. La réflectivité et les constantes optiques……36
III.3.1. Réflectivité spectrale……...……36
III.3.2. Les constantes optiques……....37
III.4. Application à la couche antireflet (BSR)…….…40
III.4.1. Le rayonnement transmis……40
III.4.2. Simulation de la couche antireflet (BSR)…….…40
III.4.3. Étude des amplitudes des rayonnements à la traversée d'une couche……43
III.4.4. Étude des amplitudes des rayonnements à la traversée de l'empilement…..…….…....44
III.5. Conclusion……..……..45
Chapitre IV : Résultats et discussion
IV.1. Introduction…….…….……..47
IV.2. L'augmentation de la réflexion en utilisant un BSR pour applications photovoltaïques…....48
IV.3. Influence de l'épaisseur et l'indice de réfraction sur la réflectivité……....49
IV.4. Résultats de simulation de la réflectivité de BSR……51
IV.5. L'influence de la BSR sur le rendement de la cellule…...……53
IV.6. Conclusion……..……55
Conclusion Générale...……57

Introduction Générale

I- Introduction générale

❖ Généralités et Problématiques

Les énergies fossiles ne sont pas en reste, leurs réserves ne sont que de quelques dizaines d'années seulement au rythme de la consommation actuelle. Comme l'énergie utilisée dans le monde dépend à plus de 80 % de ces énergies fossiles, il est évident qu'un rééquilibrage énergétique s'impose en faveur des énergies renouvelables: il est impossible de continuer à faire croître la consommation d'énergie fossile sans aller vers une catastrophe humaine et écologique.

Partant du constat que la moitié de consommée est gaspillée, la plupart des pays s'accordent à faire des efforts importants sur l'efficacité des modes de production et de consommation, couplés à une certaine sobriété des comportements. Sur la part restante, les énergies renouvelables doivent tenir une place de plus importante car ce sont les seules qui permettent de répondre durablement à nos besoins en énergie sans épuiser la planète [1].

Pour la production d'électricité, le secteur photovoltaïque a un potentiel très important et pourrait devenir l'une des principales sources d'énergie à long terme. En effet, l'énergie que nous envoie le soleil représente une source inépuisable, équivalente à plus de 5000 fois l'énergie consommée sur terre qui est colossale (de l'ordre de 1000 W. m^{-2}) [2]. De plus, les systèmes photovoltaïques sont très avantageux de par leur fiabilité, leur facilité d'entretien, et par-dessus tout leur caractère propre, avec une faible émission de CO_2 émis comprise entre 25 et 35g/Wh (contre 980g/Wh pour le charbon ou 430 g/Wh dans le cas du gaz).

La technologie la plus largement utilisée actuellement pour la conversion photovoltaïque est celle des cellules solaires en silicium cristallin, et l'on conjecture que cela restera le cas dans les prochaines années à venir. Ces cellules solaires sont fabriquées à partir de plaquettes de silicium très purifié, d'une épaisseur de l'ordre de 200 µm. Cette filière bénéficie d'une maturité industrielle qui lui assure beaucoup de force. Afin de poursuivre et d'accélérer les baisses de coûts du photovoltaïque, il est nécessaire d'effectuer un saut technologique.

Beaucoup des recherches ont été effectuées pour améliorer les rendements de la conversion de photovoltaïque. Ces recherches ayant pour développer la structure des cellules. En plus, elles sont basées sur l'étude de modification de dopage lors de l'épitaxie de la couche active. Ainsi, la formation des émetteurs in-situ lors de l'épitaxie. Des structures de cellules de type n à émetteur en face arrière, ainsi que des variations de dopage de la base des cellules afin de générer un champ

interne. Dernièrement des autres études sont appliquées sur les deux faces avant et arrière pour réduire les pertes optiques à leurs niveaux [3].

Ce travail de mémoire a l'objectif d'étudier l'augmentation de la réflexion interne totale en ajoutant une couche supplémentaire entre les contacts afin de passiver la surface arrière dont le nitrure de silicium pourrait, en conjugaison avec ses propriétés passivantes, jouer le rôle de réflecteur arrière.

❖ Structure du Mémoire

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres répartis comme suit :

- Le premier chapitre, met en évidence la structure d'une cellule solaire photovoltaïque, les différentes pertes technologiques et techniques proposés pour améliorer son rendement.

- Le deuxième chapitre nous parlons sur le silicium et ces amorphes, leurs propriétés optiques et passivantes ainsi les procédés d'élaboration.

- Le troisième chapitre, nous présentons les différentes étapes d'élaboration du modèle utilisé pour simuler la réflectivité de la face arrière (BSR) d'une cellule solaire.

- Le quatrième chapitre est consacré à l'étude des résultats de simulation. nous optimisons l'indice et l'épaisseur de la BSR jusqu'à obtenir la réflectivité maximum. Ensuite, nous présentons les différentes solutions pour augmenter le rendement de conversion des cellules solaire.

Finalement, sur la base des résultats obtenus, ce travail sera clôturé par une conclusion où il sera mentionné les perspectives quant à sa continuation ultérieure.

La cellule solaire
Et
Les pertes optiques

I.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est issue de la conversion directe de la lumière venant du soleil, en électricité. Cette dernière est une forme d'énergie des plus pratiques car aisément exploitable pour de très nombreux usages. En tant qu'énergie solaire, elle bénéficie d'une source d'énergie permanente et qui est la plus abondante de toutes, fossiles ou renouvelables. Cette ressource est de plus suffisamment bien répartie pour que son utilisation soit viable en tout point de notre planète [2].

Le soleil envoie à la surface de la terre des rayonnements qui sont répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge dont la partie la plus importante du celui-ci concerne le domaine du visible (390-780 nm) et du proche infrarouge.

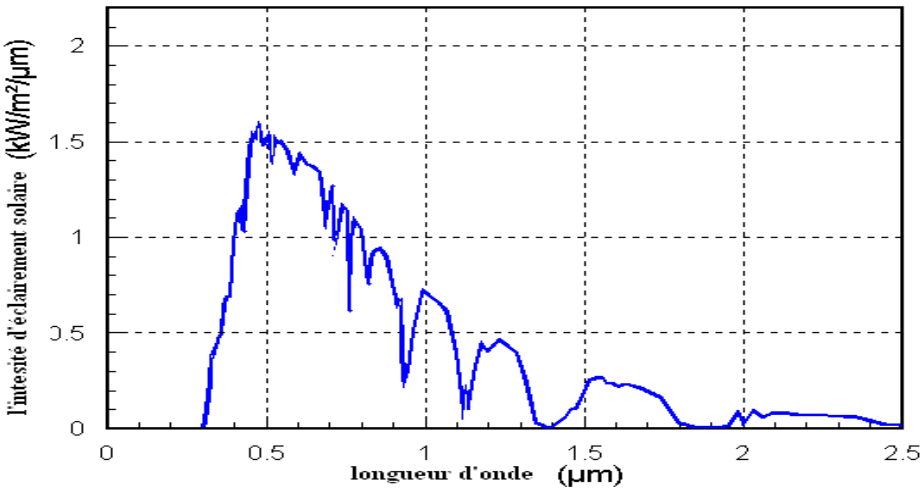


Figure I.1 : Distribution spectrale de l'éclairement solaire sous les conditions de masse d'air « air mass » A.M.1.5 [4].

Pour les longueurs d'onde inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbé dans les cent 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].

D'une part, La plupart des procédés actuels limite la réduction de l'épaisseur des cellules autour de 200 µm et une rupture technologique est devenue nécessaire pour atteindre 150, 120 voir moins de 100 µm d'épaisseur tout en assurant un rendement acceptable.

Le développement de nouvelles structures de cellules à haut rendement et toujours dans un souci de limitation des coûts, la mise en œuvre de techniques de métallisation innovantes capables

de rivaliser avec la sérigraphie est donc un enjeu essentiel. Une des étapes clé dans la fabrication des cellules photovoltaïques en silicium est la fabrication des contacts métalliques pour récupérer le maximum des rayonnements infrarouge est de cela l'augmentation de rendement des cellules.

I.2. Fonctionnement d'une cellule solaire

I.2.1. Le principe de fonctionnement

La cellule photovoltaïque homo-jonction est une jonction p-n de grande surface qui transforme le rayonnement solaire en électricité. La conversion photovoltaïque dans une cellule solaire repose sur (*i*) l'absorption de la lumière et la génération des paires électron-trous et (*ii*) la diffusion et la séparation des paires électron/trous créées et leur renvois par le champ électrique de la jonction, vers les régions où elles seront majoritaires (figure (I.2)) c.-à-d. les électrons vers l'émetteur (région type N) et les trous vers la base (région type P).

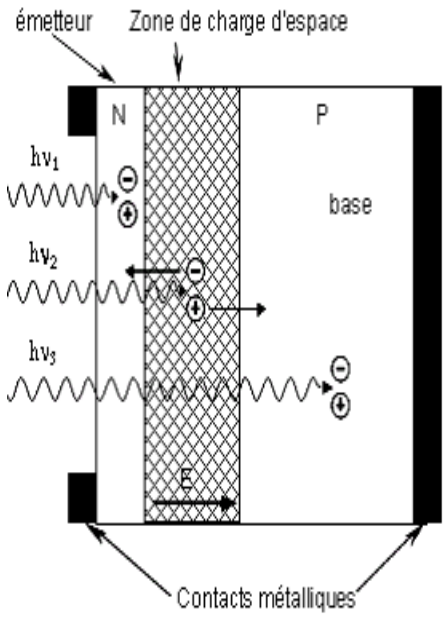


Figure I.2 : Structure d'une cellule photovoltaïque [4]

Dans les zones n ou p, les porteurs minoritaires photo-générés diffusent et ceux qui atteignent la ZCE (dépendant de la longueur de diffusion L_D de ces porteurs) sont propulsés vers la région dans laquelle ils deviennent majoritaires, où ils peuvent être collectés par les contacts ohmiques.

On a un photo-courant de diffusion. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner le photo-courant résultant I_{ph}. C'est un courant de porteurs minoritaires proportionnel à l'intensité lumineuse.

Ce courant s'oppose au courant de diode, appelé courant d'obscurité I_{obs}, qui résulte de la polarisation du composant. Le courant résultant I dans le cas idéal est :

$$I = I_{obs} - I_{ph} \tag{I.1}$$

Généralement, on représente le courant de diode sous la forme suivante :

$$I_{obs} = I_0 . (e^{\frac{qV}{nkT}} - 1) \tag{I.2}$$

Avec :

- **q :** charge élémentaire ($q = 1.6.10^{-19}$ C)
- **V :** tension aux bornes de la jonction
- **k :** constante de Boltzmann ($k = 1.38.10^{-23}$ $J.K^{-1}$)
- **T :** température (K)

I_0 est le courant de saturation en inverse de la diode. Le coefficient n est le facteur d'idéalité de la diode, fonction de la qualité de la jonction (égal à 1 si la diode est idéale et égal à 2 si la diode est entièrement gouvernée par la génération/recombinaison).

La longueur de diffusion des électrons photo générés est plus grande que celle des trous. La base présente une épaisseur relativement grande ($\approx$ 250-300μm) et elle est donc le plus souvent de type p : elle va fournir le plus 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 ($\approx$ 0.2μm) et fortement dopé (environ 10^{20} cm^{-3}) afin d'obtenir un champ électrique suffisant dans la ZCE ($\approx$ 0.3μm). L'épaisseur de la cellule doit être choisie de manière à ce qu'un maximum de photons soit absorbé par le silicium, tout en tenant compte des contraintes de découpe du matériau [3].

I.2.2. Le schéma électrique d'une cellule solaire

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.3).

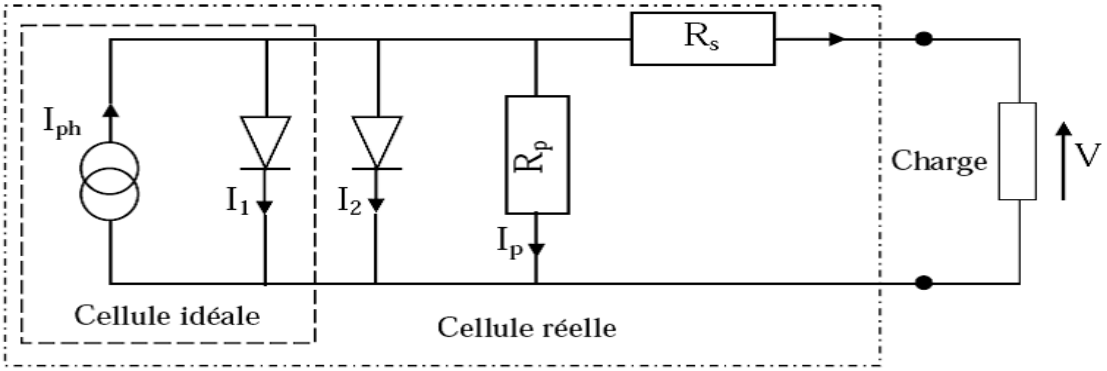


Figure I.3 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [3].

L'équation du courant devenant:

$$I = I_1 + I_2 + I_p - I_{ph}$$

$$I = I_{01}\left(\left(\exp\left(\frac{q(V-IRS)}{n1kT}\right)-1\right)\right) + I_{02}\left(\exp\left(\frac{q(V-IRS)}{n2kT}\right) - 1\right) + \frac{V-IRS}{RP} - I_{ph} \qquad (I.3)$$

Avec :

I_{01} et I_{02} : courant de saturation de la diode D1 et D2 en A;

n_1 et n_2 : facteur d'idéalité des diodes D1 et D2;

Rs : résistance série en Ω;

Rp : résistance parallèle en Ω.

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 photo-généré Iph. 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 ($n_2 \approx 2$)[5].

I.2.3. Caractérisation électrique

- **La caractérisation I(V) d'une cellule solaire :** est la superposition de celle de la diode sous obscurité et du courant photo-généré (voir figure (I.4.a)). L'éclairement de la structure a pour effet de déplacer la courbe I(V) de la diode vers les courants inverses.

$$I\,(V) = I_{ph} - I_{obs}\,(V) = I_{ph} - I_s\,(exp(\frac{qV}{kT}) - 1\ \ ) \qquad (I.4)$$

Avec :

I_{ph} : courant photo-généré en A

I_{obsc} : courant de la diode à l'obscurité en A

V : tension aux bornes de la diode en V

Is : courant de saturation de la diode en A

q = $1{,}602.10^{-19}$ C ; charge élémentaire d'un électron

k = $8{,}62.10^{-5}$ eV.K^{-1}; constante de Boltzmann

T : température en Kelvin

Puisque la photodiode est considérée comme un générateur, la convention est d'inverser l'axe des courants. Notions 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 impose le point de fonctionnement. Il est donc essentiel de choisir une charge telle que la puissance délivrée soit maximale [3].

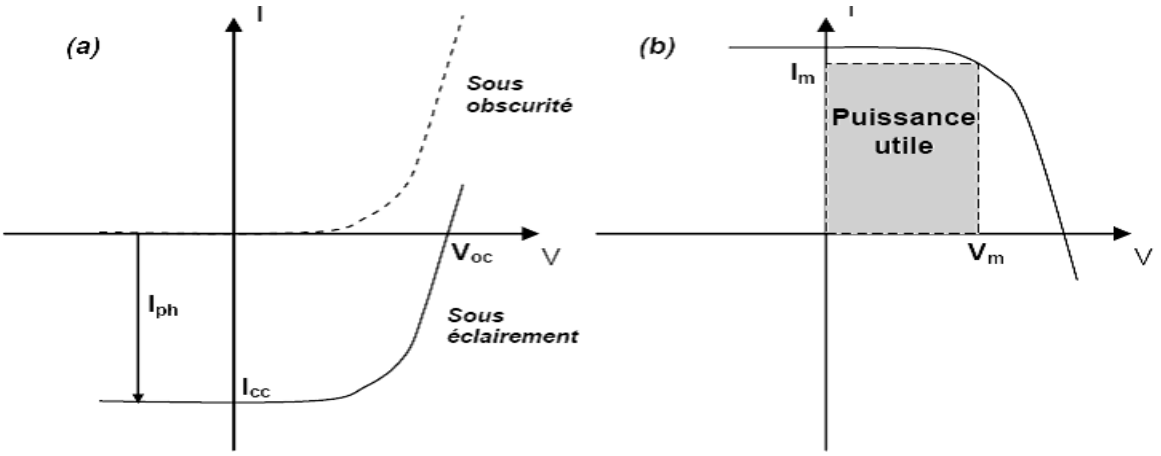


Figure I.4 : (a) Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairement et sous obscurité et (b) représentation conventionnelle de la courbe I(V) [7].

- **La tension de circuit ouvert Voc :** est la tension aux bornes de la cellule pour un courant nul.

$$V_{oc} = \frac{KT}{q}\ ln(\frac{Iph}{Is} + 1) \qquad (I.5)$$

Le courant Im et la tension Vm sont obtenus au point de puissance maximale de fonctionnement de la cellule.

- **Le facteur de forme FF** : il est caractérise l'idéalité de la cellule [8].

$$FF = \frac{Vm\ Im}{Voc\ Icc} \tag{I.6}$$

Un facteur d'idéalité élevé (n>1) de la cellule, traduisant une qualité médiocre de la jonction pn et la présence de recombinaisons, peut également avoir pour effet la dégradation du FF puisqu'il limite le Voc.

- **le rendement de conversion η :** il est possible de calculer le rendement de conversion η grâce à l'équation (I.7).

$$\eta = \frac{Vm\ Im}{Pi\ S} = \frac{FF\ Voc\ Icc}{Pi\ S} \tag{I.7}$$

Avec :

Pi : puissance incidente reçue par unité de surface en $W.m^{-2}$

S : surface de la cellule en m²

I.3. Les pertes physiques et technologiques

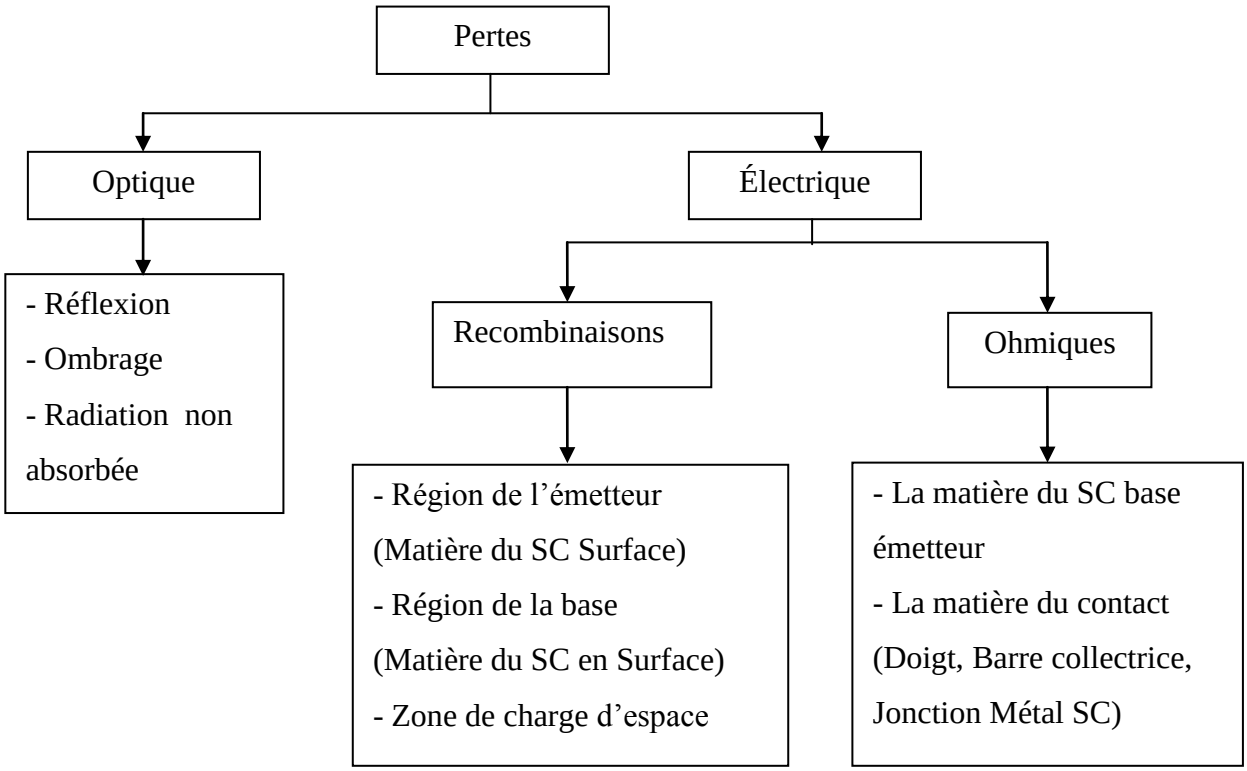


Figure I.5 : Mécanismes de perte dans une cellule solaire [5].

Pour élever un rendement il faut réduire de la totalité des pertes. La figure (I.5) présente une classification des différents mécanismes des pertes. Ceux-ci sont divisés en deux secteurs soit aux

restrictions purement physiques liées au matériau, soit aux limitations technologiques induites par le processus de fabrication.

I.3.1. Les pertes optiques

Les pertes optiques empêchent l'absorption d'une partie de l'éclairement incident dont elles sont dus aux photons réfléchis sur la face avant et ceux transmis à travers la cellule sans être absorbé. Leur principal effet sur les performances de la cellule photovoltaïque est la réduction du courant de court-circuit Icc. Pour cela, une couche antireflet est indispensable [9].

La profondeur d'absorption des photons de grandes longueurs d'onde est supérieure à l'épaisseur de la cellule (figure I.6). Un confinement optique peut alors être utilisé pour réduire cette perte.

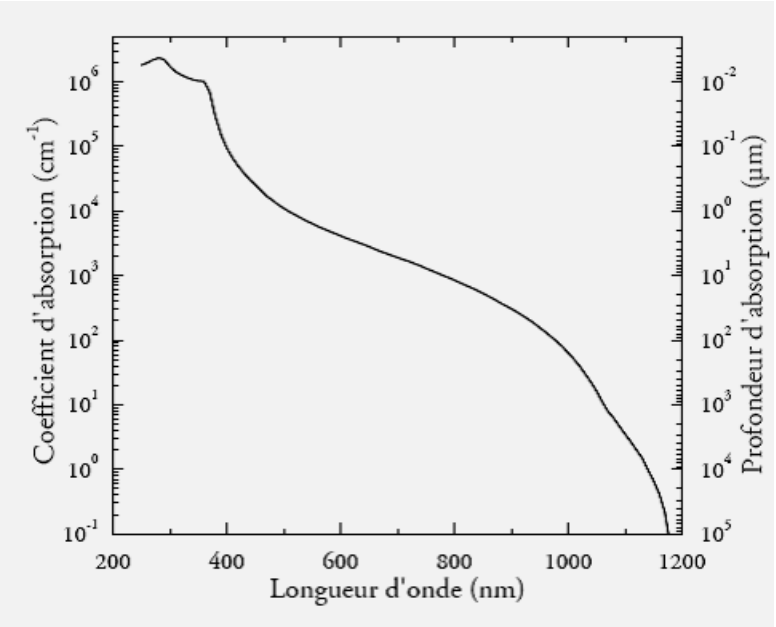


Figure I.6 : Coefficient d'absorption et profondeur de pénétration de la lumière dans le silicium cristallin en fonction de la longueur d'onde à 300K [2].

Pour limiter les pertes de rendement dans les cellules solaires, il existe des solutions qui présentent un coût élevé et d'autres moins onéreuse et souvent un peu moins performantes sont recherchées comme la limitation des procédés hautes températures ou encore la combinaison de plusieurs étapes de réalisation en une seule. Dans cette optique, on trouve le nitrure de Silicium hydrogéné SiNx : H, l'oxyde de silicium SiO_2, l'oxyde de Titane TiO_2,...

1. La réflexion

Le piégeage optique peut également être amélioré par une réflexion interne des photons élevée. Ainsi la cellule joue le rôle de cavité piégeant les photons jusqu'à ce qu'ils soient absorbés (figure I.7).

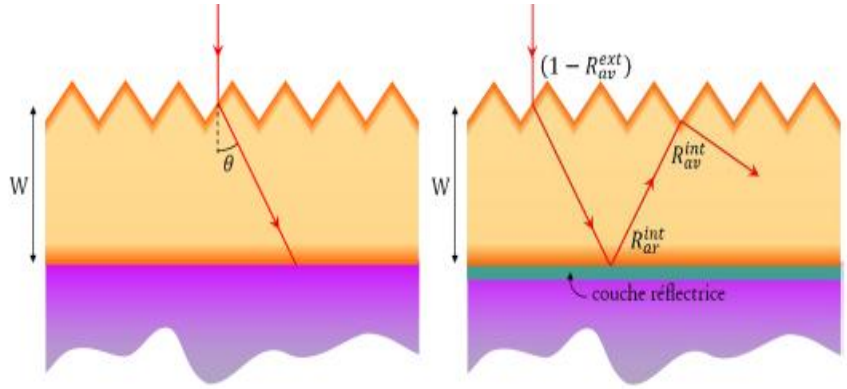


Figure I.7 : Piégeage optique. Allongement du chemin optique par inclinaison des rayons (à gauche) et piégeage optique par le biais de la réflectivité externe en face avant R_{av}^{ext}, la réflectivité interne en face arrière due à la présence d'une couche réflectrice et la réflectivité interne en face avant R_{av}^{int}.

Sur la figure (I.8), la courbe verte représente le spectre absorbé si la cellule dispose d'un réflecteur arrière. On voit ainsi qu'une importante partie des photons perdus en passant à la cellule mince est regagnée grâce au réflecteur.

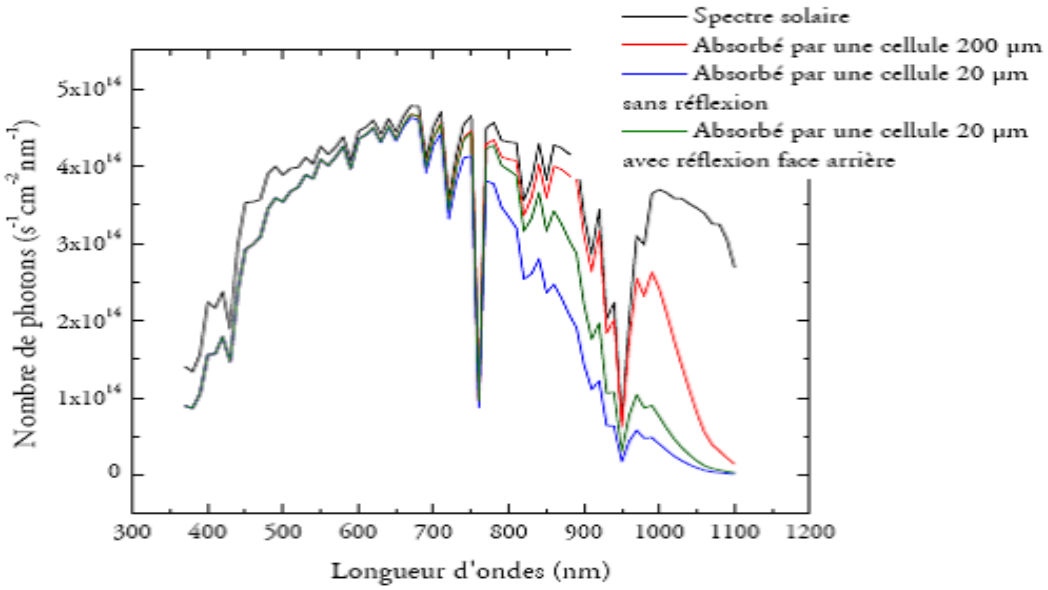


Figure I.8 : Spectre en nombre de photons par seconde et par nanomètre de longueur d'onde absorbé par centimètre carré de cellules solaires de différentes configurations (les chemins optiques sont de direction normale à la surface de la cellule).

D'un point de vue technologique, différentes techniques ont été mises au point pour assurer une bonne réflexion interne en face arrière. Le coefficient de réflexion R peut être optimisé par la mise en œuvre de couche antireflet ainsi que de traitements de surface pour des réflexions multiples [2].

2. Ombrage

Sur la cellule standard, les contacts métalliques présents sur la face avant pour permettre la collection des porteurs, forment une partie opaque qui limite l'entrée des photons dans la cellule. Les dimensions des métallisations sont alors un compromis entre les pertes optiques dues à la couverture partielle de l'émetteur et les pertes de facteur de forme provoquées par la résistance sérient, liées à la taille des métallisations [3].

3. Radiation non absorbée

Du fait de l'épaisseur limitée de la cellule, une partie des photons qui, bien qu'ayant l'énergie nécessaire, traversent l'épaisseur de la cellule sans être absorbés. Ce terme devient important quand la cellule est très fine (<100µm), et peut être minimisé en utilisant une couche réfléchissante sur la face arrière de la cellule (réflecteur arrière).

I.3.2. Les pertes électriques

1. Pertes dues à la recombinaison

Les pertes dues à la recombinaison des porteurs affectent à la fois le courant de court-circuit Icc et la tension de circuit ouvert Voc [3].

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

- **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 107 cm/sec pour des surfaces très recombinantes ;

- **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 Lb : longueur de diffusion des minoritaires et par τ_b : durée de vie des porteurs minoritaires, ces deux grandeurs étant liées par la relation :

$$L_b = (\sqrt{(D.\tau b)} \quad (I.8)$$

D étant le coefficient de diffusion des porteurs considérés. Lb 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 [5].

2. Pertes Ohmique

- **Pertes à base émetteur**

Le fort dopage de l'émetteur permet de limiter la résistance du contact métal semi-conducteur (créé par la connexion entre les contacts métalliques et l'émetteur) et de créer un champ électrique suffisant au niveau de la ZCE [1].

- **Pertes due au contact**

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photo générés 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 [3].

I.4. Les solutions techniques :

Il existe des recherches et des techniques qui ont permis de réduire les pertes de rendement.

I.4.1. Au niveau émetteur/ base :

L'ajoute d'un substrat de silicium de type P à la surface d'émetteur lui donne une force au dopage permet de limiter la résistance du contact métal semi-conducteur (créé par la connexion

entre les contacts métalliques et l'émetteur) et de créer un champ électrique suffisant au niveau de la ZCE.

I.4.2. La texturisation

La texturisation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Le relief de forme pyramidale permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur ces facettes. Cette solution assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

La texturisation est réalisée par différents procédés : 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 % [1].

I.4.3. Les contacts face avant et face arrière

Les contacts doivent être ohmiques pour récupérer et envoie les porteurs photo génères vers le circuit externe.

1. La passivation

La passivation consiste à améliorer la qualité électronique en surface et en volume en neutralisant les sites actifs, sources de recombinaisons. L'alliage Silicium - Aluminium formant le BSF limitera la passivation de la surface arrière en prend en considération le contact local entre eux. Sur ce sujet, il est important de discriminer ce qu'est une bonne et une mauvaise passivation de surface. Un critère simple de bonne passivation est de considérer que la passivation de surface doit être supérieure à la passivation du volume c'est-à-dire supérieure à la valeur D/L (avec D coefficient de diffusion et L longueur de diffusion des porteurs minoritaires. Ce ratio est proche de 1000 $cm.s^{-1}$ pour les cellules en silicium multi cristallin, ce qui est bien plus élevé qu'une passivation de surface réalisée par une couche de diélectrique telle que le SiNx : H. Ce ratio reste toutefois supérieur aux valeurs obtenues avec un BSF en aluminium [1].

On a deux mécanismes de passivation de la surface qui permettent de réduire les recombinaisons :

a- Passivation par neutralisation des défauts d'interface.

b- passivation par effet de champ.

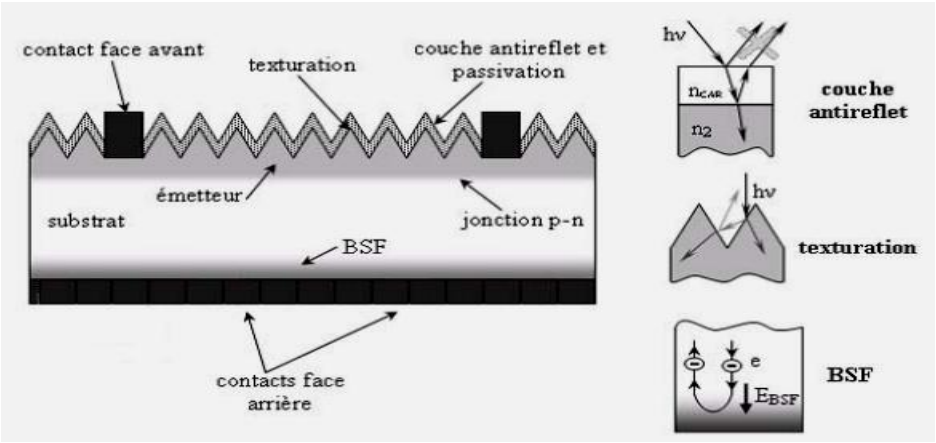


Figure I.9 : Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium [1].

2. La couche antireflet

Le but d'une couche antireflet d'obtenir des interférences destructives les ondes réfléchies sur les deux interfaces, entrainant l'annulation de réflexion à la longueur d'onde considérée.

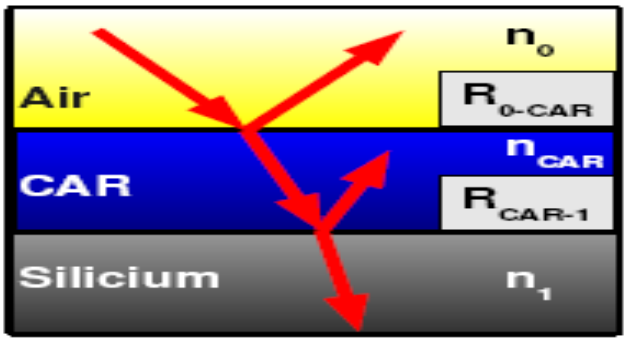


Figure I.10 : Réflexions dans le système Air/CAR/Silicium [1].

La couche antireflet peut donc être vue comme une lame quat 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 600nm. Celle-ci est, en effet, proche du maximum d'émission du soleil et autorisé une pénétration acceptable des Photons au sein du silicium [3].

Dans ce cas, on peut avoir trois états qui peuvent être même combinés :

- **La couche antireflet avant :** 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 texturisant la surface des cellules pour assurer un confinement optique de la lumière et en recouvrant cette surface d'une couche antireflet (figure (I.10)).

- **Réflecteur arrière (Back Surface Reflector BSR) :** la réduction de l'épaisseur des substrats des substrats de silicium utilisés pour élaborer les cellules photovoltaïques implique le développement d'un BSF alternatif. Une solution est l'utilisation d'une grille en aluminium (BSF localisé) combinée à une couche de passivation. En complément, un indice de réfraction bien choisi permettrait d'augmenter la probabilité de réflexion interne totale.

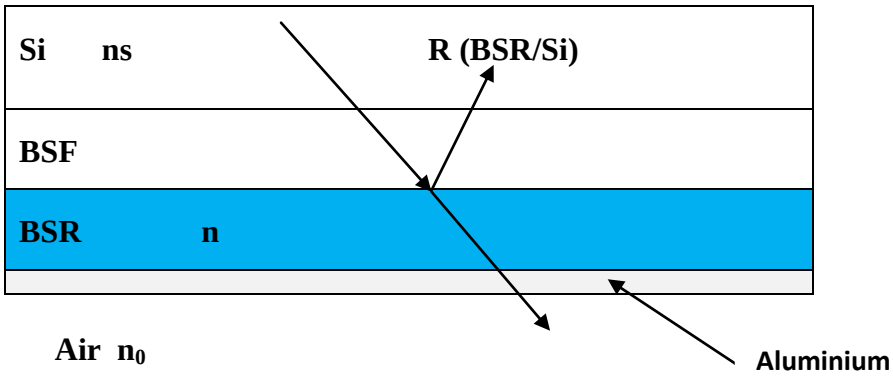


Figure I.11 : Réflexions dans le système silicium/BSR/AIR.

- **Les multicouches antireflet (MCAR) :** Les pertes optiques ayant un impact important sur de court-circuit, il est intéressant de pouvoir les minimiser davantage. Une option peu contraignante serait de développer des multicouches antireflet (MCAR) grâce à large gamme d'indices de réfraction du substrat.

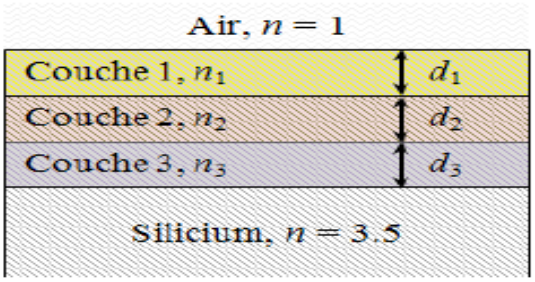


Figure I.12 : Structure à 3 couches [11].

I.5. *Conclusion*

D'après l'analyse des différentes types des pertes qui réduit le rendement énergétique d'une cellule et les procédés techniques diminuant ces pertes, on conclue que les dispositifs optiques modernes nécessitent de plus en plus l'ajout de couches minces permettant une meilleure transmission des ondes électromagnétiques dans un domaine particulier (revêtements antireflet), ou la transmission de certaines longueurs d'onde et la réflexion pour les autres (filtres), ou encore des couches hautement réfléchissantes.

Par contre, beaucoup de progrès ont été réalisés pour maintenir un rendement proche de 15 % tout en réduisant les coûts de production comme, par exemple, l'utilisation de silicium de moins bonne qualité ou la diminution de l'épaisseur des substrats.

Le silicium
Et
Les techniques d'élaboration

II.1. Introduction

Dans le domaine des cellules photovoltaïques, Le matériau utilisé doit 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. En pratique, les matériaux semi-conducteurs, et plus particulièrement le silicium, sont les plus utilisés, le plus souvent sous la forme d'une homo-jonction p-n [2].

Le silicium cristallin de grade solaire SOG est le matériau le plus utilisé en photovoltaïque où plus de 90% de l'énergie solaire est produite à partir des cellules en silicium mono-Cz et multi cristallin mc-Si [4].

Le silicium a souvent été qualifié de matériau du siècle. Avec ses multiples formes et ses nombreux composés (oxyde, nitrure, oxynitrure), ses domaines d'application ne cessent de s'élargir. Il est bien connu que les matériaux amorphes à base de silicium et élaborés sous forme de couches minces jouent un rôle important dans plusieurs domaines d'applications, notamment l'optique et la microélectronique. Les composés tels que l'oxyde de silicium (SiO_2) et le nitrure de silicium (SiN_x) sont largement utilisés pour la réalisation de dispositifs optiques modernes et lors de la conception de circuits intégrés [6].

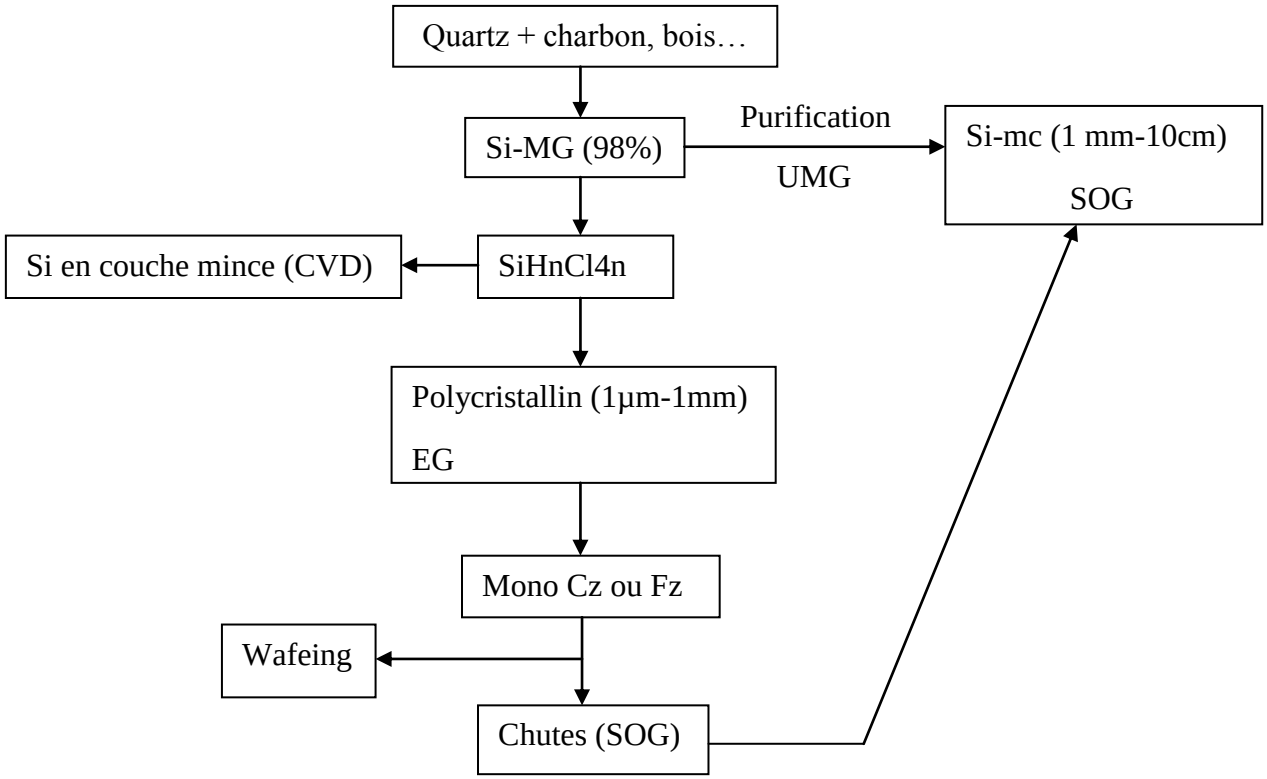


Figure II.1 : Types et grades de pureté du silicium cristallin [4].

Dans les dernières années, des recherches s'effectuent en silicium de grade solaire (amélioration de la pureté du silicium métallurgique UMG-Si, simplification des processus standards d'élaboration de poly silicium, …).

II.2. Le silicium et ces composés

II.2.1. La silice

La silice pure se présente sous la forme d'un minéral dur. Elle se présente en différentes forme monocristallin, multi cristallin, poly cristallin. Soit sous forme amorphe, comme dans le verre (voir figure II.2).

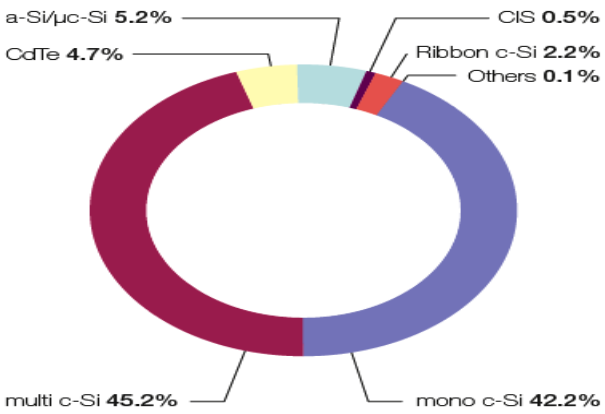


Figure II.2: Répartition des différents matériaux sur le marché photovoltaïque [5].

L'élément principal constituant la cellule solaire est le silicium, qui est le deuxième élément le plus abondant à la surface de notre planète, après l'oxygène. La matière première utilisée pour obtenir le silicium purifié utilisé par les industries électronique et photovoltaïque est le quartz. Sa réduction carbothermique dans des fours à arc électrique à plus de 2000 °C permet d'obtenir du silicium de qualité métallurgique, d'une pureté de l'ordre de 98 % [2].

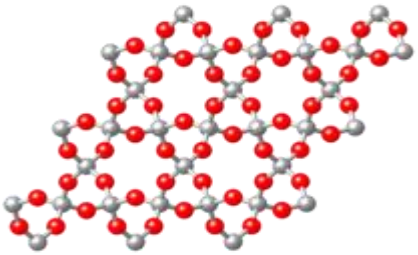


Figure II.3 : Modèle moléculaire d'une silice cristalline
(Atomes O en rouge, atomes Si en gris) [6].

$$SiO_2 + 2C \longrightarrow 2\,CO + Si$$

La silice sert également de support isolant en électronique.

Elle est un matériau transparent dans tout le domaine visible ce qui lui donne des applications intéressantes en optique. Cependant ses propriétés de transparence se perdent dans les domaines UV et infrarouge, ce qui impose l'usage d'autres matériaux pour travailler dans ces longueurs d'onde par exemple en spectrométrie infrarouge. Cet effet est mis à profit dans l'effet de serre où la lumière peut pénétrer mais dont les infrarouges ne peuvent sortir, d'où un échauffement ou, tout au moins, le maintien d'une température plus élevée qu'à l'extérieur sans chauffage.

II.2.2. Comparaison entre les différentes formes de silicium

La différence entre ces matériaux réside dans leur régularité cristallographique : si le silicium monocristallin comporte des tailles de grains parfaitement ordonnés supérieures à 10cm, elles sont comprises entre 1mm et 10cm pour le silicium multi cristallin et entre 1µm et 1mm pour le silicium poly cristallin. Le silicium amorphe est quand à lui complètement désordonné.

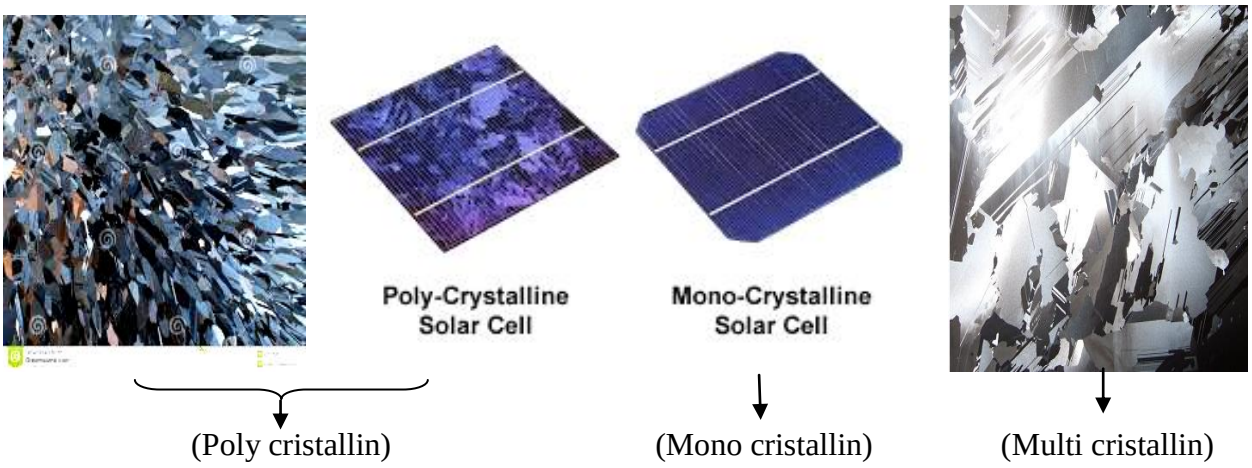


Figure II.4 : Photos des déférents substrats de silicium [5].

Le silicium monocristallin comporte peu de défauts recombinants et permet d'obtenir les meilleurs rendements. Cependant, son élaboration est très couteuse, ce qui constitue un frein à son développement industriel pour les applications photovoltaïque. Les techniques de production du silicium multi cristallin sont beaucoup plus simples et donc bien mois 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 [3].

II.2.3. Le silicium

Le silicium cristallin possède une structure de type diamant avec une distance Si-Si de 2,35 Å et un angle variant entre 99 et 108°.

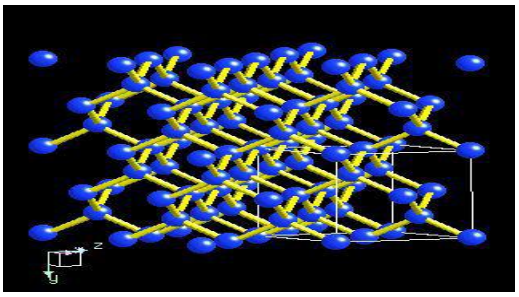


Figure II.5 : Structure cristalline du silicium [6].

II.3. Les polymorphes de silice

II.3.1. Les composés de type SiOx

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 SiO_2 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, Eg = 1.12 eV à 300 K, correspondant à une longueur d'onde = 1107 nm (figure (II.6)). 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 [5].

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.

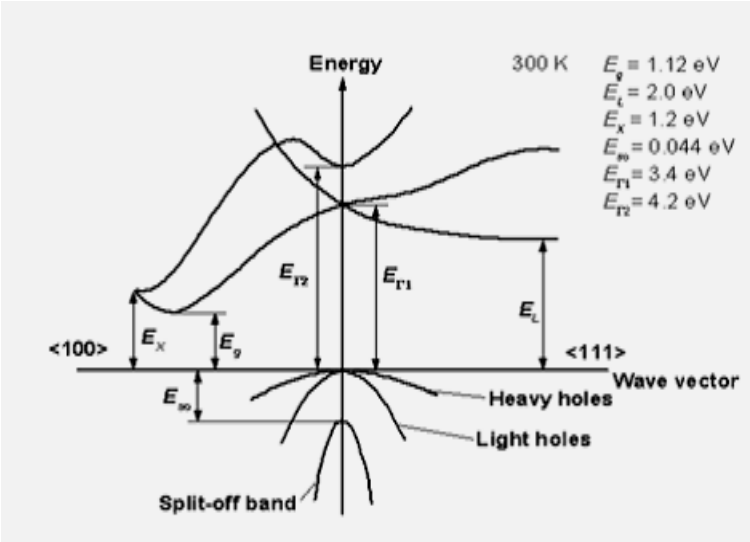


Figure II.6 : Structure de bande du silicium [5].

On connaît deux autres variétés cristallisées de l'oxyde de silicium. La première, destœchiométrie SiO forme un réseau cubique dont la masse volumique est comprise entre 2,13 et 2,24 g.cm^{-3} et dont l'indice de réfraction serait entre 1,92 et 2,15. La littérature signale l'existence du composé Si_2O_3 qui aurait un indice de réfraction de 1,5 [6].

II.3.2. Les composés de type SiOxNy

La seule composition d'un oxynitrure de silicium massif connue est Si_2ON_2. La structure de base est un tétraèdre de type $SiON_3$. La maille hexagonale plissée comporte autant d'atomes de silicium que d'atomes d'azote et les plans (SiN)x sont reliés ensemble par des atomes d'oxygène. Les distances Si-N et Si-O sont respectivement de 1,72 Å et 1,62 Å.

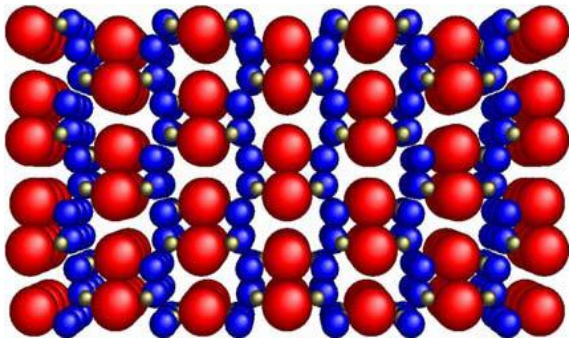


Figure II.7 : Structure de l'oxynitrure Si_2ON_2 [6].

Les oxynitrures de silicium présentent des valeurs importantes de gap optique. Cette grandeur physique est étroitement liée à la composition ainsi qu'à la pression d'élaboration. En plus, la substitution de l'azote par l'oxygène affecte les bandes de conduction et de valence en entraînant une augmentation de l'énergie [6].

II.3.3. Les composés de type SiNy

La seule composition stœchiométrique de nitrure de silicium connue est Si_3N_4. Ce composé se présente sous deux formes de structure hexagonale α et β. La maille de base est un tétraèdre centré sur un atome de silicium avec quatre atomes d'azote aux sommets. L'azote est sur un site trigonal et est lié à trois atomes de silicium. La distance Si-N est de 1,74 Å [6].

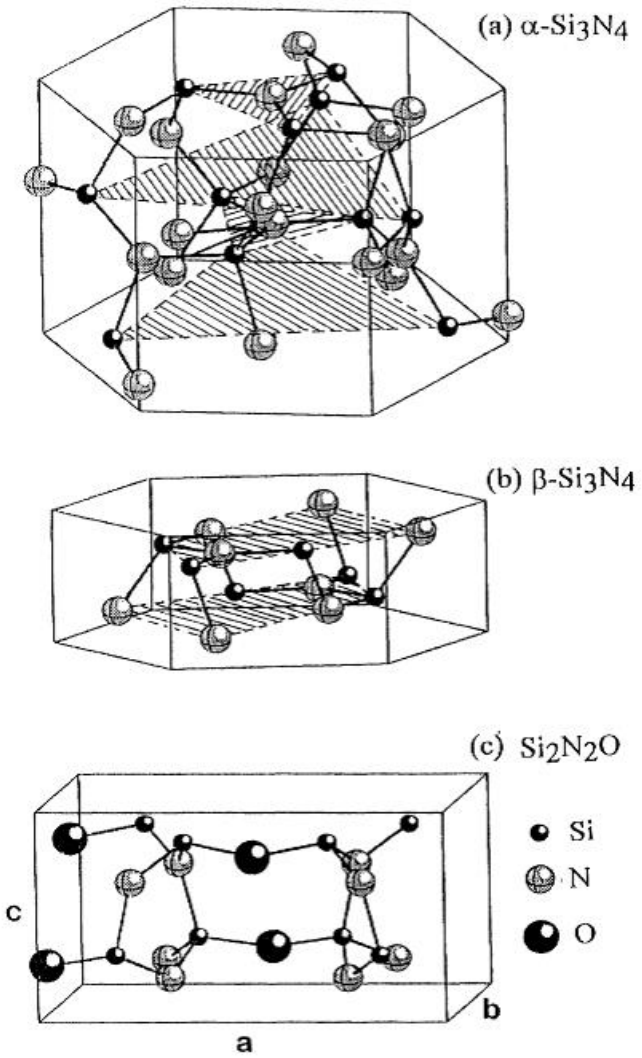


Figure II.8 : Structure cristalline des configurations et du Si_3N_4 et du Si_2N_2O. Les plans rayés sont perpendiculaires à l'axe c [1].

Le nitrure de silicium présente donc de nombreux atouts pour s'imposer dans l'industrie photovoltaïque. Néanmoins, l'amélioration des rendements des cellules photovoltaïques poussent les chercheurs à envisager des solutions alternatives au SiN ou à le combiner avec d'autres matériaux [1].

II.3.4. Les composés de type SiN_X:H

Le nitrure de silicium hydrogéné SiNx:H est largement utilisé comme couche antireflet (CAR) et couche de passivation dans la conception de cellules photovoltaïques en silicium car il joue un rôle très important en réduire les pertes.

Cependant, ce composant s'est avéré comme meilleur candidat au vu de ses propriétés optique sont ajustables en volume et de la reproductibilité de son dépôt. Ses propriétés optiques sont ajustables en fonction des conditions de dépôt : son indice de réfraction peut varier entre 1.8 et 3.5 et son coefficient d'absorption reste faible, même s'il demeure plus élevé que celui du dioxyde de titane. Il est intéressant de noter que son coefficient d'extinction k augmente avec l'augmentation de l'absorption par la couche antireflet des fortes énergies du rayonnement incident [3].

II.4. Les amorphes du silicium

La structure de la silice amorphe a été le sujet de très nombreuses études au cours de cinquante dernières années.

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 µm est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible. 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 [5].

II.4.1. Les amorphes du silicium de type $Si\text{-}O_4$

Elle consiste en un enchaînement de tétraèdres $Si\text{-}O_4$ peu distordus liés par un sommet et chaque atome d'oxygène est commun à deux tétraèdres (figure (II.9)).

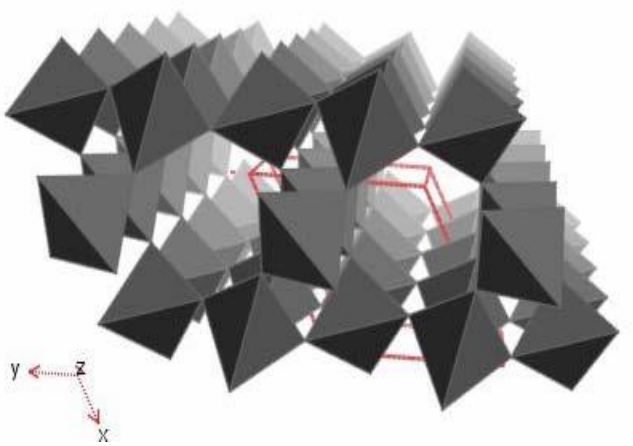


Figure II.9 : Coordination des tétraèdres dans la silice [6].

L'arrangement des tétraèdres adjacents fluctue le long d'une chaîne Si-O-Si, ce qui conduit à la perte de l'ordre à grande distance. Cette structure est bien décrite par le modèle du réseau continu aléatoire (CRN pour Continuous Random Network) énoncé par Zachariasen. Ce modèle suppose que l'environnement local est dicté par la nature des liaisons. Pour le silicium hybridé sp3, il y a forcément la formation du groupement stable Si-O_4. Plusieurs autres études ont été consacrées à la description de la structure du nitrure de silicium amorphe.

II.4.2. Les amorphes du silicium de type Si-N_4

Pour ce type de composés, l'atome de silicium est entouré de quatre atomes d'azote pour former un tétraèdre Si-N_4 et chaque atome d'azote est commun à trois tétraèdres. L'enchaînement des tétraèdres est moins aisé que pour la silice amorphe puisqu'il s'effectue par l'intermédiaire des plans N-(Si_3) très rigides. Il en résulte un réseau continu contraint présentant plusieurs types de défauts. La structure de Si_3N_4 a aussi été décrite par le modèle CRN, cependant cette description est incomplète. Elle a récemment été étudiée par simulation en dynamique moléculaire.

II.4.3. Les amorphes du silicium de type oxynitrures

La structure atomistique du nitrure de silicium amorphe stoechiométrique (Si_3N_4) est un réseau d'atomes de silicium quadruplement liés par des liaisons covalentes à des atomes d'azote, eux même triplement liés à des atomes de silicium (figure (II.10)). La distance moyenne entre deux atomes liés est comprise entre 1.71 Å et 1.78 Å, tandis que la distance entre deux premiers voisins non liés est comprise entre 2.67 Å et 2.98 Å [10].

Le remplacement du nitrure dans le but d'obtenir des matériaux avec de plus faibles contraintes, une meilleure stabilité thermique et une meilleure résistance à la fissuration tout en conservant un haut pouvoir de diffusion aux impuretés .

Le nitrure de silicium est également très étudié et suscite un intérêt industriel croissant. L'oxyde et le nitrure de silicium, sont d'ailleurs connus pour leurs propriétés très complémentaires. En effet :

- D'un côté, l'oxyde de silicium possède une bonne transparence dans le domaine du rayonnement visible et a un indice de réfraction bas (1,46), il présente de bonnes qualités diélectriques (Eg ~ 10 eV), de faibles contraintes mécaniques (de nature compressives) mais il constitue une mauvaise barrière à la diffusion des ions et dopants ;

- D'un autre côté, le nitrure de silicium d'indice de 2,02 est plus dense et constitue donc une meilleure barrière à la diffusion. Par contre, ce matériau est connu pour être un diélectrique médiocre (Eg ~ 5,5 eV) et peu résistant aux fissurations car les contraintes mécaniques y sont importantes [6].

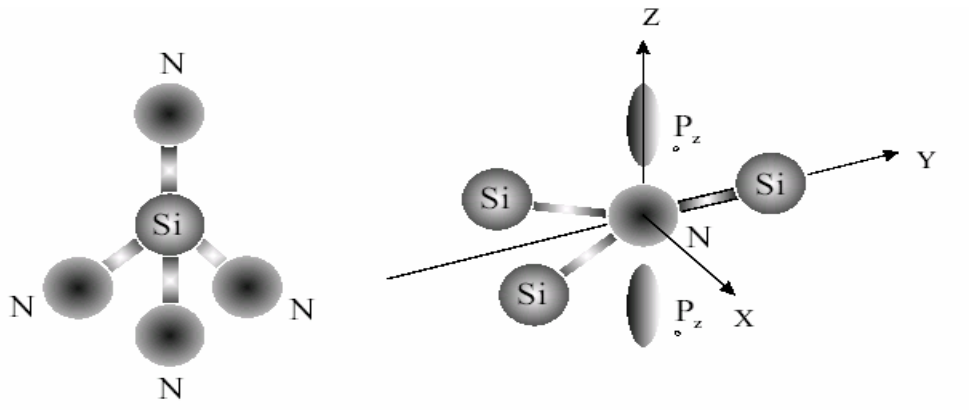


Figure II.10 : Structure microscopique du nitrure de silicium [10].

Pour les oxynitrures de silicium amorphes, plusieurs interrogations peuvent subsister concernant leur arrangement local si bien qu'à ce jour, leur structure n'est pas totalement établie. Deux principaux modèles sont discutés : Le mélange aléatoire de plusieurs types de liaisons autour d'un atome de silicium central (RBM pour Random Bonding Model) ou une séparation de plusieurs phases (RMM pour Random Mixture Model).

II.5. Les procédés de production du silicium

II.5.1. La purification de silicium

Le silicium est transformé en un composé gazeux, le plus souvent du tri- chlorosilane. Pour ce faire, des particules de silicium métallurgique broyé réagissent avec de l'acide chlorhydrique anhydre en lit fluidisé pour former du tri-chlorosilane. L'avantage du tri-chlorosilane est de pouvoir être facilement purifié par distillation.

Le composé gazeux est ensuite utilisé pour déposer du silicium sous forme solide. Différents réacteurs sont utilisés pour cela, les plus utilisés étant ceux du procédé Siemens. Il s'agit de larges réacteurs en forme de cloche, dont les germes de silicium sont des tiges en forme de U traversées par un courant élevé. Ils chauffent ainsi par effet Joule ce qui permet le dépôt de silicium. Ils produisent de gros blocs de poly silicium en forme de U (figure (II.12)).

Le silicium issu de ce procédé est de qualité électronique, sa pureté va jusqu'à 9N, soit une proportion d'impuretés de 10-9 atomiques. Cependant, d'autres méthodes existent, comme celle à lit fluidisé, procédé continu produisant des granules de silicium.

Il est à noter que ces procédés sont énergivores et leurs sous-produits sont nocifs pour l'environnement. Il y a lieu de considérer cela dans les analyses de cycle de vie du photovoltaïque.

Figure II.12 : Schématisation des procédés de fabrication de silicium purifié à partir d'un précurseur gazeux. A gauche : procédé Siemens, à droite : procédé à lit fluidisé. (Source : site web de REC).

À cause de la forte hausse du prix du silicium purifié, le secteur photovoltaïque à envisager d'autres voies de fabrication directement à partir du silicium métallurgique. Ces techniques, court-circuitant le passage à l'état de composé gazeux, sont moins coûteuses et moins nocives pour l'environnement, mais elles conduisent à une pureté moindre.

Les applications photovoltaïques ne nécessitent cependant pas une pureté aussi importante que la micro-électronique. Ainsi, différentes technologies émergent pour produire du silicium de qualité solaire, de pureté > 5N, parfois qualifié de silicium UMG pour Upgraded Metallurgical Grade. Selon le niveau de pureté, ce silicium conduit à des rendements plus faibles de plusieurs points ou bien proches de ceux obtenus avec le silicium purifié par la voie classique.

II.5.2. Le procédé Czochralski

Ce procédé produit du silicium monocristallin, un germe de silicium monocristallin est plongé dans le bain de silicium légèrement surfondu, et le silicium du bain est épitaxié sur ce germe (figure II.13). Le lingot et le creuset contenant le silicium liquide sont en rotation dans les sens opposés. Le lingot qui se forme est tiré vers le haut à une vitesse d'une dizaine de centimètres par heure.

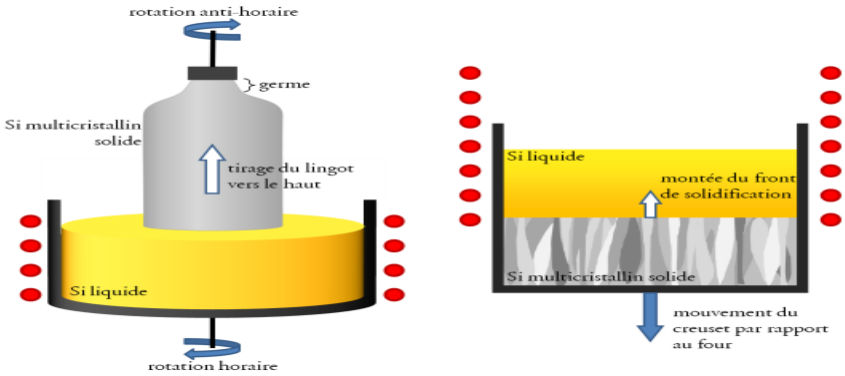


Figure II.13 : Procédés de croissance de lingots de silicium classiques. A gauche : procédé Czochralski, à droite, procédé Bridgman [2].

On obtient ainsi un lingot de section circulaire. Ses flancs sont ensuite découpés pour obtenir une forme pseudo-carrée qui permettra une meilleure compaction des cellules dans le module, tout en évitant d'éliminer une trop grande quantité de matière.

II.5.3. Le procédé de solidification directionnelle

Ce procédé produit du silicium multi cristallin. Le silicium est fondu dans un lingot, et refroidi de bas en haut, soit en déplaçant le creuset hors du four (méthode Bridgman, voir la figure (II.13)), soit en ouvrant le four par le bas (Polix), soit en créant un gradient de température à l'intérieur du four (HEM). Dans tous les cas, le silicium commence à cristalliser par le bas, et le front de cristallisation se déplace vers le haut. On obtient alors un lingot de section horizontale carrée dont les grains sont allongés selon la direction verticale.

La matière proche de la surface du lingot est sciée et écartée car elle contient plus d'impuretés. Le lingot est ensuite découpé verticalement en briques de section carrée, égale à la surface des cellules finales. La surface des plaquettes sera ainsi perpendiculaire à l'axe de croissance du lingot. Cela conduit à des grains plus petits sur les plaquettes, mais évite que les joints de grains se trouvent dans un plan parallèle à la surface des cellules, leur structure est alors dite colonnaire. En effet, comme les joints de grains sont très recombinants, il faut éviter que les porteurs minoritaires les traversent pour atteindre la jonction. Les lingots sont presque uniformément dopés de type p.

II.6. Les diélectriques

La caractérisation des diélectriques amorphes présentant des bandes d'absorption monotonement décroissantes et s'annulant dans le proche infrarouge et le visible : c'est le cas des films de nitrure de silicium et du silicium amorphe [10].

II.6.1. Les oxydes, nitrure et oxynitride

Les oxydes sont utilisés comme revêtements AR. Ceux-ci comprennent: les oxydes de titane, l'oxyde de tantale, l'oxyde de zirconium, l'oxyde d'yttrium, oxyde d'aluminium ainsi l'oxyde de silicium.

Les systèmes multicouches des films d'oxyde sont aussi largement utilisés dans les systèmes multicouches, tels que des miroirs lumière froide, filtres réfléchissant la chaleur, des séparateurs de couleurs, par exemple :

SiO_2: Il peut être déposé par évaporation par faisceau d'électrons avec IAD ou sans IAD, par RLVIP, et par faisceau d'ions, de réactif ou la pulvérisation cathodique RF.

SiO: Avant la disponibilité des évaporateurs à faisceau d'électrons pour l'évaporation SiO_2.

SiOx films ont été préparés par l'évaporation réactive de SiO. Leur composition correspond à Si_2O_3 et l'indice de réfraction est d'environ 1,55. Aujourd'hui SiO est surtout utilisé pour les revêtements multicouches dans la gamme infrarouge.

Puisque l'interface Si/SiO_2 possède de bonnes qualités électroniques, la silice a souvent été conservée comme point de départ au dépôt d'autres diélectriques tels que l'alumine, des nitrures de

silicium, ou de l'oxyde de tantale. Ces matériaux déposés par des procédés CVD (Chemical Vapor De position), présentent une bonne stabilité en milieu aqueux [13].

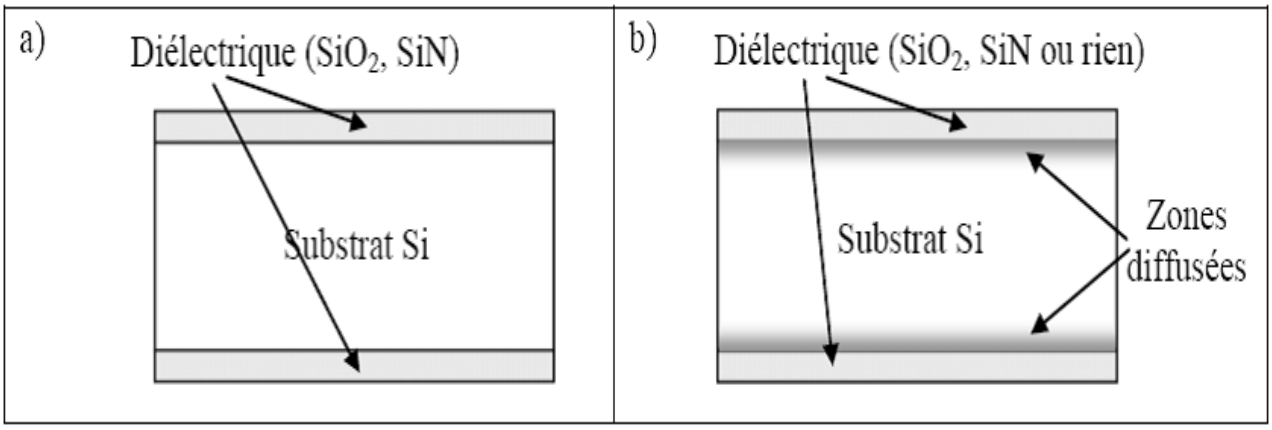


Figure II.14 : La Structure d'un diélectrique : a) la surface est recouvert d'un diélectrique b) la surface est diffusée (émetteur) et peut être recouvert d'un diélectrique [7].

SiON: Produit par double pulvérisation par faisceau d'ions ou réactive Magnétron de pulvérisation cathodique de Si dans une atmosphère d'oxygène et d'azote.

Al_2O_3: Pour les applications optiques, il est le plus souvent déposé par évaporation par faisceau d'électrons, Bien que toutes les méthodes mentionnées avec SiO_2 puissent être appliquées.

ZrO_2: Films de ZrO_2 préparés par faisceau d'électrons évaporation montrent une forte inhomogénéité de l'indice de réfraction. L'indice de réfraction au niveau du film / interface radio est plus petit d'environ 0,1 à l'interface couche-substrat, appelé inhomogénéité négative. Cela est dû au film la structure et la densité de tassement inférieure à l'interface air-couche. En utilisant l'IAD inhomogénéité changements à positive et sous certaines conditions homogènes les films peuvent être obtenus.

Ta_2O_5: l'oxyde de tantale montre une large gamme spectrale de haute transparence, faible les pertes et une grande stabilité. Outre TiO_2 il est probablement le matériau le plus utilisé à indice élevé. Elle est produite par ions assistée électronique réactive faisceau évaporation, de placage ionique, pulvérisation par faisceau d'ions et réactif à courant continu magnétron ou de pulvérisation RF.

Si_3N_4: Produit par pulvérisation magnétron réactive en azote, RLVIP ou d'ions assistés par évaporation par faisceau d'électrons de Si.

Le tableau suivant indique les propriétés d'oxyde, d'oxynitrure

Revêtement Matériel	Composition du film déposition	De transparence µm	Indice de réfraction à 550 nm
Si	SiO_2	0.2-9	1.45-1.5
SiO_2	SiO_2	0.2-9	1.45-1.46
SiO	SiO	0.7-9	2.0 (0.7 µm)
Al_2O_3	Al_2O_3	0.2-7	1.63 (T=300 °C)
Ta_2O_5	Ta_2O_5	0.3-10	2.1 (T=250 °C)
Si	SiOxNy	0.4-9	1.5-2.0
Si	Si_3N_4	0.25-9	2.0
Si	SiC	1.5-11	2.95

Tableau II.1: Les propriétés d'oxyde, d'oxynitrure [14].

II.6.2. Le silicium poreux

Le silicium cristallin peut être gravé ou déposé de sorte de présenter une porosité. Le silicium poreux ainsi formé présente une forte surface spécifique (typiquement 20 à 800 $m^2.cm^{-3}$), une taille caractéristique de quelques nanomètres à plusieurs micromètres et une porosité, définie par la fraction volumique du matériau non occupée par le silicium, pouvant aller de moins de 10 % à plus de 90 %.

Le silicium poreux peut être formé par voie sèche en utilisant un dépôt ou une gravure plasma ou bien par voie humide, par dissolution chimique ou par anodisation électrochimique [2].

Dans les modèles les plus simples, la permittivité diélectrique du silicium poreux est la moyenne pondérée arithmétique ou harmonique des permittivités des matériaux constituant le composite. Des modèles reflétant mieux nos structures existent, comme le modèle de Maxwell-Garnett, pour un matériau B inclus dans un matériau A :

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon A}{\varepsilon + 2\,\varepsilon A} = fB\,\frac{\varepsilon B - \varepsilon A}{\varepsilon B - 2\varepsilon A} \qquad \text{(II.1)}$$

où :

ε : est la permittivité diélectrique (complexe) du matériau composite,

ε_A : est la permittivité diélectrique du matériau A (ici, le silicium),

ε_B : est la permittivité diélectrique du matériau B (ici, le gaz),

f_B: est la fraction volumique du matériau B.

Pour deux matériaux interpénétrés, le modèle de Bruggeman permet de calculer la permittivité diélectrique selon l'équation :

$$fA\frac{\varepsilon A-\varepsilon}{\varepsilon A+2\varepsilon}+fB\frac{\varepsilon B-\varepsilon}{\varepsilon B+2\varepsilon}=0 \qquad \text{(II.2)}$$

Le modèle de Bruggeman est généralement considéré comme plus exact pour le silicium poreux.

II.6.3. Influence d'un diélectrique sur la réflectivité de la face arrière

Comme le montre la simulation en figure (II.16), la réflectivité dans les grandes longueurs d'onde est accrue par la mise en place d'un diélectrique entre le silicium et le contact métallique. Cette amélioration dépend de l'indice du diélectrique ainsi que de son épaisseur. Les réflexions lumineuses sur la face arrière permettent d'augmenter le trajet de la lumière et de produire ainsi, plus de paires électrons-trous.

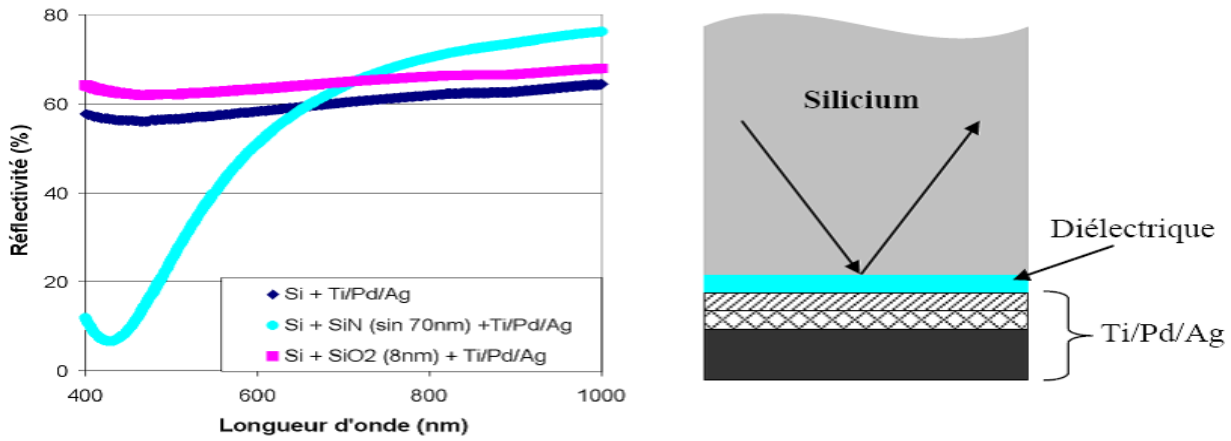


Figure II.15 : Simulation à l'aide du logiciel IMD (Bell Labs) de la réflectivité de la face arrière avec un diélectrique entre le métal et le silicium. Le schéma de droite représente la structure simulée [7].

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté brièvement les composés de silicium les plus connus. En plus, ces amorphes et les différents procédés de fabrication de silicium monocristallin et multi cristallin.

Dans l'industrie, l'étude de ce matériau et ces propriétés était très intéressante par les chercheurs dans plusieurs domaines : optique, électronique, électrotechnique ainsi l'énergie renouvelables. Comme les autres caractéristiques, les propriétés électriques des couches dépendent de la composition (taux d'oxygène et d'azote) et la structure (densité, gap optique, liaisons pendantes,…etc.) du matériau fabriqué.

Finalement, On ne constate que l'utilisation d'un matériau de bonne qualité : le silicium monocristallin de qualité électronique cristallisé par la méthode Czochralski (Cz-Si) consiste à augmenter les rendements de conversion des cellules solaires selon l'étude effectue par plusieurs chercheurs.

Modélisation d'un réflecteur arrière

III.1. Introduction

Les pertes optiques correspondent aux photons réfléchis sur la face avant et à ceux transmis à travers la cellule sans être absorbés, alors qu'ils auraient pu générer des paires électron/trou. Elles affectent ainsi fortement le courant de court-circuit Icc.

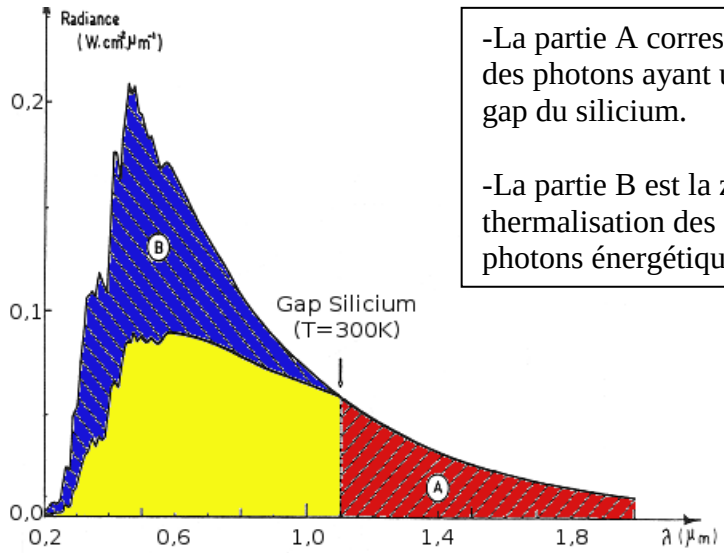
Mise à part la minimisation du recouvrement de la surface arrière par les contacts métalliques, qui doit être un compromis avec l'obtention d'une bonne résistance série, la réflectivité de la face arrière peut être réduite grâce à la texturisation et à l'utilisation d'un réflecteur (BSR). Enfin, le chemin optique dans la cellule peut être allongé par la combinaison de la texturisation et de l'utilisation d'un réflecteur sur la face arrière, augmentant ainsi la probabilité d'absorption des optiques et de réflectivité.

Nous avons vu dans le chapitre I que la réflexion des photons incidents par le substrat de silicium était une source importante de pertes pour la conversion photovoltaïque. De ce fait, voyant de quoi la solution de la couche (BSR) au niveau de réflecteur arrière est capable de lever le rendement d'une cellule solaire.

III.2. Les paramètres optiques

III.2.1. L'absorption des rayonnements

L'absorption c'est les transitions radiatives des ondes (les photons incidents c'est-à-dire la création de paires électrons-trous) dont l'efficacité dépendra de la longueur d'onde de ces photons et le gap direct du substrat.

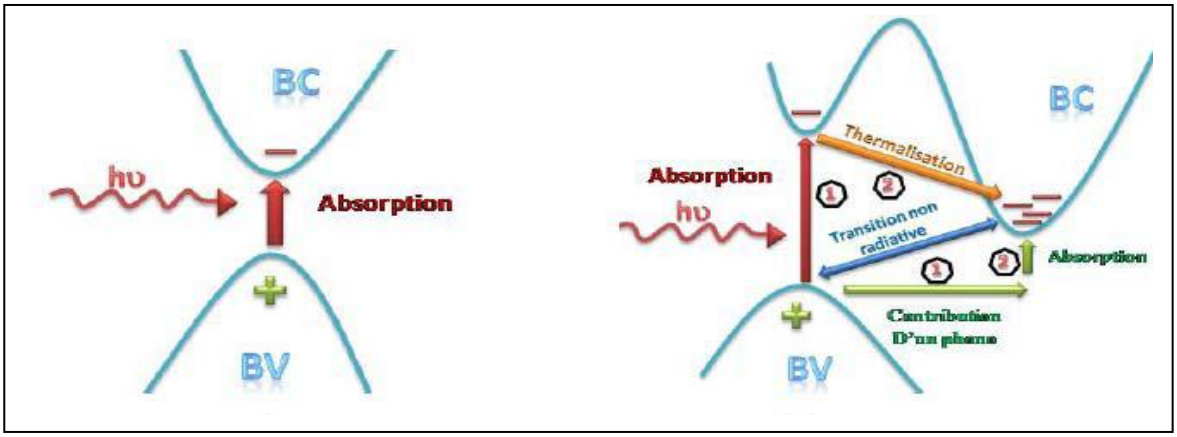


-La partie A correspond aux pertes optiques des photons ayant une énergie inférieure au gap du silicium.

-La partie B est la zone des pertes liées à la thermalisation des électrons issus de photons énergétiques.

Figure III.1: Courbe de l'irradiance solaire en fonction de la longueur d'onde [1].

Dans le cas de silicium celui-ci possède également un gap direct à 3,4 eV qui donnera lieu à des transitions radiatives pour des longueurs d'onde inférieures à 365 nm. 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 III.2 : Transition inter-bande d'électrons dans un semi-conducteur [15].

- **Absorption incomplète des photons :** Les photons ayant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du matériau ne peuvent pas générer de paire électron-trou (figure (III.1)). Sous un éclairement classique (AM1.5G 2), les pertes sont évaluées à 23,5 %.

- **rendement d'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 (figure (I.6)).

III.2.2. La transmission

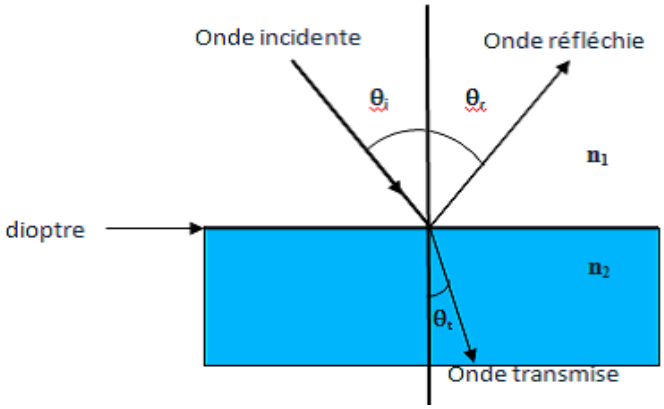


Figure III.3 : Les angles d'incidence de réflexion et de transmission [5].

La transmission des photons incidents passant par la face avant de la cellule ce sont tous les rayonnements visibles et infrarouge pénètrent dans le substrat. Elle est indiquée par le coefficient de transmission T et par l'indice de réfraction.

III.2.3. La réflectivité

La réflexion des photons incidents par le substrat de silicium était une source importante de pertes pour la conversion photovoltaïque. C'est-à-dire le coefficient de réflexion R du semi-conducteur n'est pas nul [5]. Voyons en quoi la couche antireflet (CAR) permettent de réduire ce coefficient. Par contre, la disposition d'un BSR à la face arrière augmente ce coefficient dans le but de récupérer les rayonnements infrarouge qui sont transmis par cette face arrière sans être absorbés pour cela il faut mettre ce réflecteur.

III.3. La réflectivité et les constantes optiques

III.3.1. Réflectivité spectrale

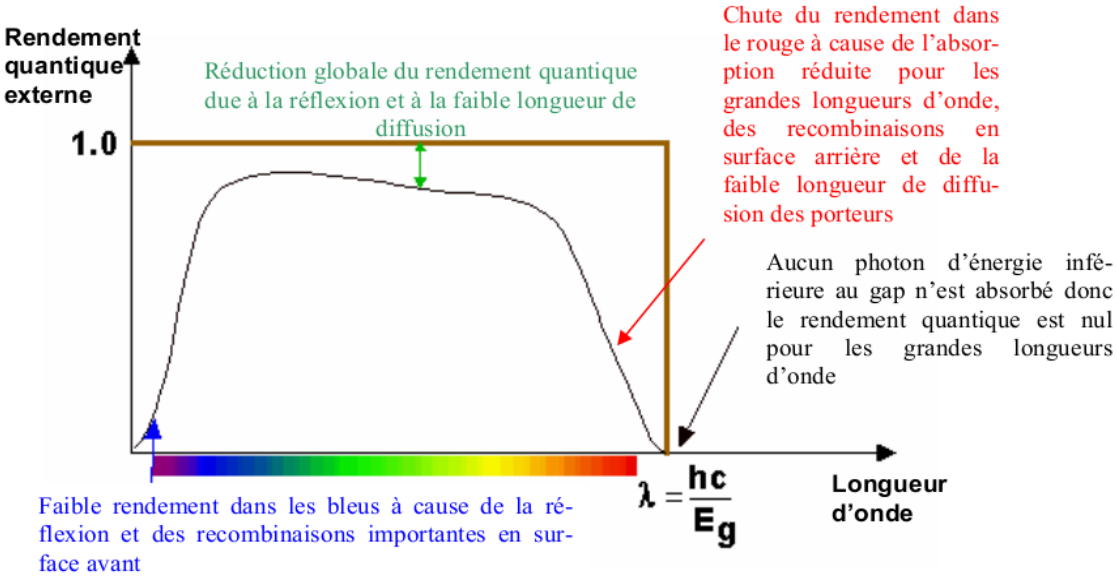


Figure III.4 : Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque [16].

Pour pouvoir calculer le rendement quantique interne *IQE* de nos cellules à partir du rendement quantique externe, il est nécessaire d'effectuer des mesures de réflectivité spectrale $R(\lambda)$, ces grandeurs étant reliées par l'équation suivante [4]:

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1-R(\lambda)} \quad \text{(III.1)}$$

On prend en considération que le rendement quantique externe tient compte des pertes optiques comme la réflexion (R) ou la transmission à travers la cellule. Le rendement quantique externe peut être corrigé des pertes optiques liées à la réflexion de la cellule en négligeant l'absorption de la couche antireflet [1].

III.3.2. Les constantes optiques

Dans un milieu homogène et non magnétique, les propriétés optiques peuvent être décrites par l'indice complexe de réfraction du matériau noté N est donné par l'équation suivante :

$$N=(\varepsilon)^{1/2}= n+i\,k \quad \text{(III.2)}$$

On note que :

- ε : la permittivité complexe du matériau
- n $= \frac{c}{v}$: l'indice de réfraction (c et v sont les vitesses de la lumière dans le vide et dans le milieu considéré).
- k : le coefficient d'extinction et traduit l'absorption du rayonnement par le matériau. Il est lié au coefficient d'absorption α, pour chaque longueur d'onde λ, par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad \text{(III.3)}$$

Une onde électromagnétique se propage dans la matière avec le vecteur d'onde $\vec{k}$:

$$\vec{k} = (n + ik)\frac{\vec{\omega}}{c} \quad \text{(III.4)}$$

Lorsqu'une onde électromagnétique incidente de vecteur d'onde $k_0$arrive à l'interface entre deux milieux semi-infinis d'indice n_1 et n_2, une onde réfléchie de vecteur d'onde $k_1$et une onde réfractée k_2 apparaissent à l'interface (figure III.2).

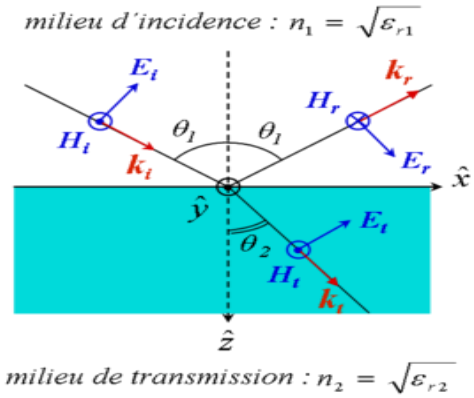


Figure III.5 : La réflexion et la transmission d'une onde électromagnétique incidente sur l'interface d'un milieu semi-infini [5].

En utilisant les équations de Maxwell, on peut démontrer qu'il n'y a pas de changement de longueur d'onde à la réflexion sur un dioptre et que les rayons réfléchis et transmis sont dans le plan d'incidence.

La figure (III.6) montre le rapport entre les angles d'incidence (θ_i) de réflexion (θ_r) et de transmission (θ_t) à l'interface entre deux médias. Ces coefficients sont calculés en fonction des indices de réfraction dans les deux médias.

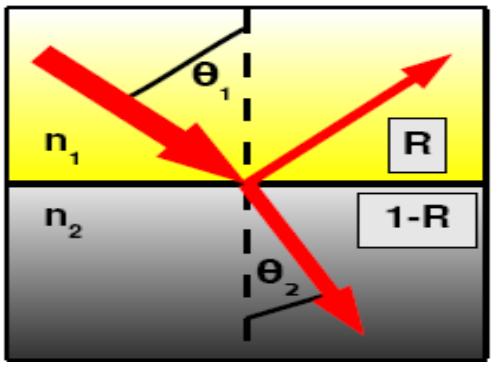


Figure III.6 : Réflexion et transmission de lumière à l'interface entre deux milieux d'indices de réfraction respectifs n_1 et n_2 [1].

La loi de Snell-Descartes donne la relation entre l'angle d'incidence θ_i et celui de réfraction θ_t en fonction des indices optiques des deux milieux [1] :

$$N_1 \sin \theta_i = N_2 \sin \theta_t \qquad \text{(III.5)}$$

Les coefficients de réflexion et de transmission de la lumière pour la polarisation parallèle et perpendiculaire sont calculés à partir des équations (III.6) à (III.9).

$$E_r = \frac{N_1 \cos\theta_i - N_2 \cos\theta_t}{N_1 \cos\theta_t + N_2 \cos\theta_i} E_i \quad \text{(Polarisation parallèle)} \qquad \text{(III.6)}$$

$$E_t = \frac{2N_1 \cos\theta_i}{N_1 \cos\theta_t + N_2 \cos\theta_i} E_i \quad \text{(Polarisation parallèle)} \qquad \text{(III.7)}$$

$$E_r = \frac{N_1 \cos\theta_i - N_2 \cos\theta_t}{N_1 \cos\theta_i + N_2 \cos\theta_t} E_i \quad \text{(Polarisation perpendiculaire)} \qquad \text{(III.8)}$$

$$E_t = \frac{2N_1 \cos\theta_i}{N_1 \cos\theta_i + N_2 \cos\theta_t} E_i \quad \text{(Polarisation perpendiculaire)} \qquad \text{(III.9)}$$

- ✓ Le coefficient de réflexion R est calculé par l'équation :

$$R = \left(\frac{E_r}{E_i}\right)^2 \qquad \text{(III.10)}$$

- ✓ Le coefficient de transmission T est donné par l'équation :

$$T = \left(\frac{E_t}{E_i}\right)^2 \frac{N_2}{N_1} \frac{\cos\theta_t}{\cos\theta_i} \qquad \text{(III.11)}$$

Avec :

E_i : est le champ électrique de l'onde incidente,

E_r : est le champ de l'onde réfléchie,

E_t : est le champ de l'onde transmise,

N_1 : est l'indice de réfraction du côté incident,

N_2 : l'indice de réfraction du côté de transmission.

L'onde transmise est donnée par le coefficient de transmission T et l'onde réfléchie est définie par le coefficient de réflexion R. Ainsi, l'absorption est définie par le coefficient d'absorption A, on a :

$$A+T+R = 1 \qquad \text{(III.12)}$$

III.4. Application à la couche antireflet (BSR)

Le BSF est une 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 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 [1].

La BSR a pour rôle d'adapter l'indice optique entre le silicium et l'aire sur la surface arrière de la cellule solaire afin réfléchir le maximum de longueurs d'ondes. Pour cela, on doit bien choisir l'indice de réfraction de BSR n_B et son épaisseur d_B. Afin d'exploiter les phénomènes d'interférence constructive, il faut que le déphasage entre l'onde réfléchie à l'interface Si/BSR et BSR/ Aluminium soit en même phase. Dans ce cas; l'onde incidente est intégralement réfléchie (figure III.7).

La réflexion interne totale est exploitée lorsque la lumière arrive à une interface entre deux milieux, le premier de fort et le second de faible indice de réfraction n_{si} et n_0, la réflexion interne totale aura lieu pour un angle d'incidence θi supérieur à l'angle critique θc.

III.4.1. Le rayonnement transmis

Les rayonnements transmis (T) dans le cas d'étude des réflecteurs arrière sont les rayonnements infrarouges incidents (I) entre les deux milieux silicium/BSR et qui ont une longueur d'onde λ entre 900 nm et 1100 nm.

III.4.2. Simulation de la couche réflectrice (BSR)

Calculons la réflectivité de silicium nu : si on considère une interface silicium/air ($N_1 = n_{si} + i\, k_{si}$, $N_2 = 1$) en incidence proche de la normale ($\theta_1 \cong \theta_2 \cong 0$) (figure (III.3)), on aura :

$$R = R_p = R_s = \left[\frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2}\right]^2 = \frac{(n_{si} - 1)^2 - k_{si}^2}{(n_{si} + 1)^2 + k_{si}^2} \qquad \text{(III.13)}$$

Le coefficient d'extinction devient négligeable ($k_{Si} \approx 0$) pour des longueurs d'onde supérieures à 400 nm ($k_{Si} < 0.3$). De ce fait, on peut alors ne considérer que l'indice de réfraction n_{si}, ce qui nous donne la réflectivité du silicium nu estimée à 39% (pour les longueurs d'onde correspondant au maximum de rayonnement solaire (λ=600 nm, $n_{si} = 3.94$, $k_{si} \approx 0$)).

Repartons des équations (III.13) et considérons les réflexions aux surfaces ($k_{Si}\approx 0$, $\lambda=600$, $n_{si}=3.94$):

$$r_{B/0} = \frac{n_B - n_0}{n_B + n_0} \qquad \text{et} \qquad r_{si/B} = \frac{n_{si} - nB}{n_{si} + n_B} \tag{III.14}$$

D'où l'on déduit le coefficient complexe entre le milieu extérieur et le silicium :

$$r_{si/0} = \frac{r_{B/0} + r_{si/B}\, e^{-i\varphi}}{1 + r_{B/0}\, r_{si/B}\, e^{-i\varphi}} \tag{III.15}$$

Avec φ est le déphasage entre deux ondes réfléchies, ce qui est donné par la relation suivante :

$$\varphi = \frac{\pi\delta}{\lambda} \tag{III.16}$$

δ : La différence de marche

$$\delta = 2\, n_B d_B \cos\theta_2 \tag{III.17}$$

D'où :

$$\varphi = 2\pi \frac{n_B d_B \cos\theta_2}{\lambda} \tag{III.18}$$

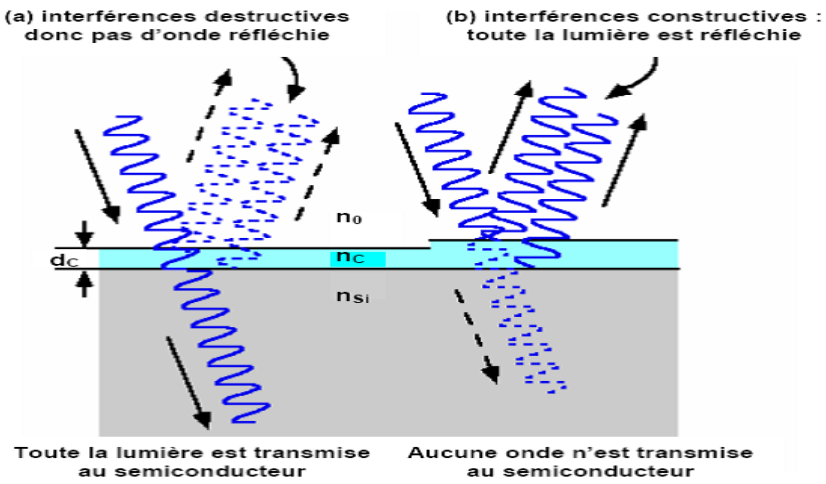


Figure III.7 : L'introduction d'une couche mince entraîne la division d'amplitude de l'onde incidente, conduisant à des phénomènes d'interférences entre les rayons réfléchis [3].

Pour obtenir des interférences constructives entre les deux ondes réfléchies sur les deux surfaces, les deux conditions suivantes doivent être satisfaites :

$$r_{\frac{B}{0}} = -r_{\frac{si}{B}} e^{-i\varphi} \quad \text{(III.19)}$$

$$r_{\frac{B}{0}} = r_{\frac{si}{B}} \quad \text{(III.20)}$$

La première condition est satisfaite si : $\varphi = (2l+1)\pi$ avec l entier. Ainsi, on obtient l'épaisseur de la BSR :

$$d_B = \frac{(2l+1)\lambda}{4\, n_B \cos\theta_2} \quad \text{(III.21)}$$

$$n_B = \sqrt{n_0 n_{si}} \quad \text{(III.22)}$$

L'épaisseur à choisir pour une réflexion totale dépend de la longueur d'onde. Dans le domaine photovoltaïque, on prend généralement 600 nm comme référence pour le calcul. Cette longueur d'onde correspond en effet à l'émission minimale de rayonnement infrarouge du soleil pondéré par la pénétration acceptable des photons au sein du silicium.

En ce qui concerne les conditions aux limites, peuvent se présenter comme suit :

$n_0 = n_{Al} = 3.58\text{-}0.0051i$ et $n_1 = n_{Si} = 2.06\text{-}8.30i$.

Les équations (III.21) et (III.22) nous donnent pour :

- **La BSR utilisé en SiN :** $n_B = 1.9$ et $d_B = 112$ nm.
- **La BSR utilisé en SiO_2 :** $n_B = 1.45$ et $d_B = 153$ nm.

Pour la longueur d'onde entre [900 ÷ 1100] nous déterminons la réflexion totale. Plus loin et pour comparer les propriétés de réflexion des différents échantillons, nous nous affranchissons de l'effet de la longueur d'onde. Cependant, la notion de réflectivité moyenne est introduite et elle est définie comme étant la somme des réflexions pour chaque longueur d'onde par rapport au nombre des longueurs d'onde étudie :

$$R_{moy} = \frac{\sum R(\lambda)}{\lambda_{sup} - \lambda_{inf}} \quad \text{(III.23)}$$

λ_{inf} et λ_{sup} Les limites inférieure et supérieure du domaine spectral étudié.

L'utilisation du SiN comme un réflecteur dont l'indice de réfraction du SiN peut être ajusté de 1,9 à 2,8 et pour SiO_2 de 1.45 à 2.

Les équations utilisées ici restent limiter. En réalité, l'optimum n'est pas tout à fait à 1100 nm à cause du caractère fini de la cellule et surtout à cause des variations d'indice du silicium,

du SiN et du SiO_2 en fonction de la longueur d'onde qui vont influer sur la réflectivité moyenne définie par l'équation (III.23).

L'optimisation de la réflectivité va même plus loin puisque généralement l'absorption de la couche réflectrice n'est jamais complètement nulle, pour cela le maximum de la réflectivité et les meilleurs résultats électriques peuvent être obtenus pour des indices et épaisseurs différentes des indices et épaisseurs optimaux de la BSR.

III.4.3. Étude des amplitudes des rayonnements à la traversée d'une couche

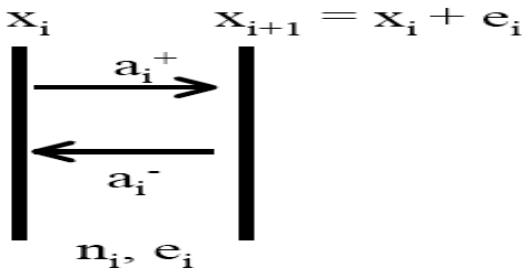


Figure III.8 : L'amplitude du rayonnement à la traversée d'une couche.

L'amplitude d'une onde traversant une couche d'épaisseur x est donnée par la relation suivante :

$$a_i^+(x) = a_i^+ e^{j(\omega t - \frac{2\pi n_i x}{\lambda})} \qquad \text{(III.24)}$$

Ceci va nous donner pour les ondes réfléchies et réfractées traversant une couche d'épaisseur e_i et limitée par deux dioptres X_i et X_{i+1} , les relations suivantes :

$$\begin{cases} a_i^+(x_{i+1}) = a_i^+(x_i)e^{-j\varphi_i} \\ a_i^-(x_{i+1}) = a_i^-(x_i)e^{j\varphi_i} \end{cases} \qquad \text{(III.25)}$$

Avec : $\varphi_i = \frac{2\pi n_i e_i}{\lambda}$ est le déphasage entre les différentes ondes réfléchies.

D'où :

$$\begin{pmatrix} a_i^- \\ a_i^+ \end{pmatrix}_{x_i} = \begin{pmatrix} e^{-j\varphi_i} & 0 \\ 0 & e^{j\varphi_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_i^- \\ a_i^+ \end{pmatrix}_{x_{i+1}} = C_i \begin{pmatrix} a_i^- \\ a_i^+ \end{pmatrix}_{x_{i+1}} \qquad \text{(III.26)}$$

Avec :

$$C_i = \begin{pmatrix} e^{-j\varphi_i} & 0 \\ 0 & e^{j\varphi_i} \end{pmatrix} \quad \text{(III.27)}$$

III.4.4. Étude des amplitudes des rayonnements à la traversée de l'empilement

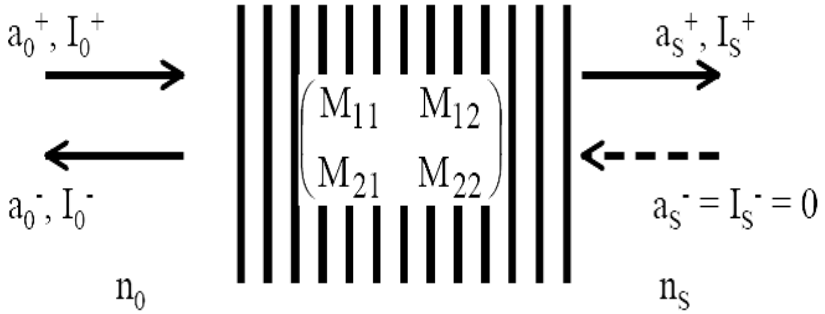


Figure III.9 : Les amplitudes à la traversée d'un empilement.

Les amplitudes totales des rayonnements réfléchis et réfractée dans un empilement de seule couche est le produit de toutes les amplitudes à la traversée des dioptres à la traversée de couche, qui est donné par la relation suivante :

$$M = D \times C \quad \text{(III.28)}$$

Il est en résulte les amplitudes à la traversée d'un empilement (III.28) :

$$\begin{pmatrix} a_0^- \\ a_0^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_s^- \\ a_s^+ \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} a_s^- \\ a_s^+ \end{pmatrix} \quad \text{(III.29)}$$

A la fin du processus, la relation générale de la réflexion s'écrive :

$$R = \frac{I_0^-}{I_0^+} = rr^* \quad \text{(III.30)}$$

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réussi à construire un programme sous Matlab qui nous a permis de voir l'influence de la réflectivité de BSR sur le rendement des cellules solaires, Les calculs ont été effectués en considérant deux cas d'application pour une cellule avec une monocouche réflectrice, à savoir pour une cellule photovoltaïque (n_0= 3.58-0.0051i et n_{Si}=2.06-8.3i).

En premier temps, nous avons fait un programme ou on a illuminé l'absorption de la couche antireflet. La deuxième étape était l'optimisation de l'épaisseur " d " en variant l'indice de réfraction " n " entre 1,45 à 2 dans le cas SiO_2 et entre 1.9 à 2,8 pour SiN. Enfin nous avons l'épaisseur " d " optimisé en cherchant la grande réflectivité.

Résultats Et Discussion

IV.1. Introduction

Les pertes optiques affectent drastiquement la puissance délivrée par la cellule photovoltaïque en diminuant le courant de court-circuit. Comme nous l'avons introduit dans le Chapitre I, l'utilisation d'un (BSF) sur la surface arrière combinée à un réflecteur arrière permet d'augmenter la probabilité de réflexion interne totale et de réduire considérablement ces pertes. Plusieurs matériaux sont utilisés comme BSR notamment le nitrure de silicium SiN pour son indice de réfraction qui peut être ajusté en faisant varier les conditions de dépôt (1.91 < n (600 nm) < 2.98).

Pour augmenter le nombre de photons réfléchie (IR) sur la face arrière des cellules photovoltaïques, il faut bien choisi un indice de réfraction et une épaisseur adéquats de réflecteur, de manière à exploiter les phénomènes d'interférences constructives et obtenir une réflexion maximale à la longueur d'onde considérée. Nous allons illustrer cela en étudiant le cas où la cellule est directement en contact avec l'air figure (IV.1).

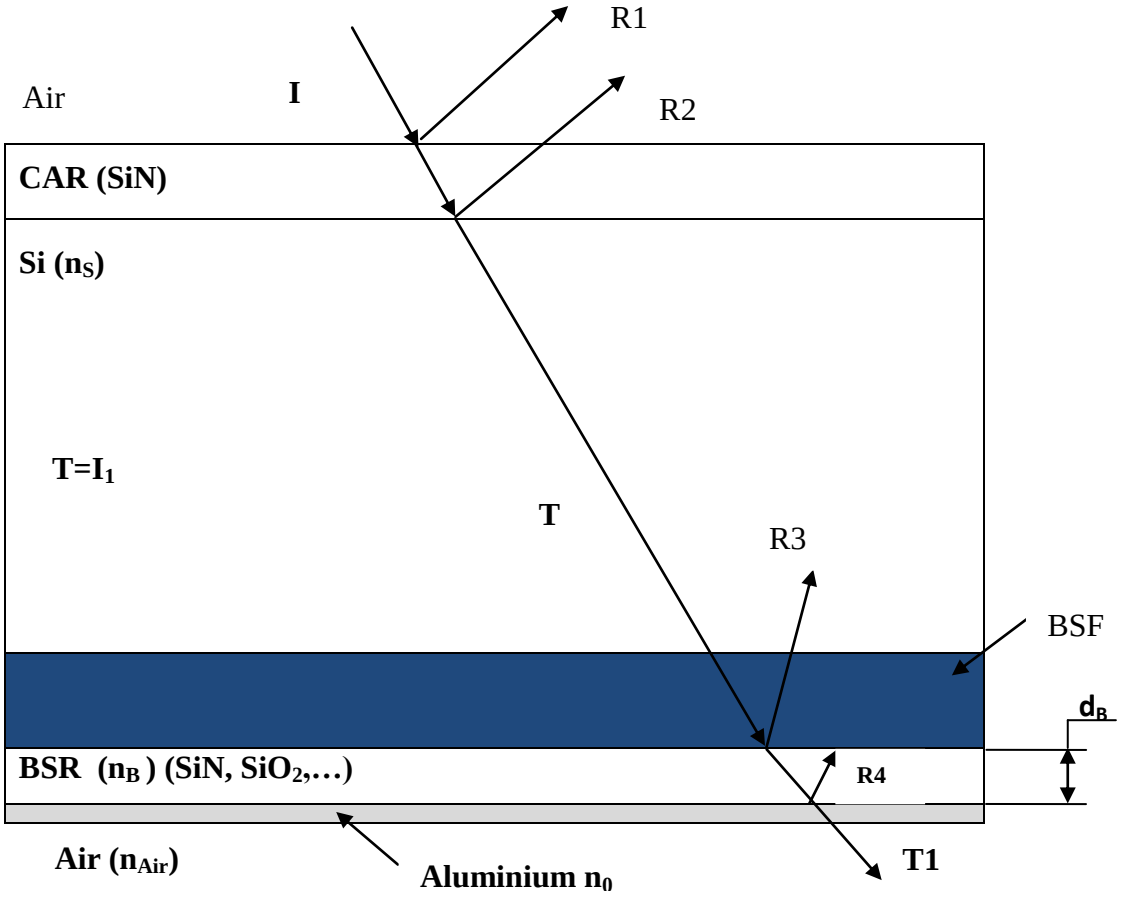


Figure IV.1 : La réflexion au niveau de réflecteur arrière.

IV.2. L'augmentation de la réflexion en utilisant un BSR pour applications photovoltaïques

Nous considérons deux applications : l'oxyde de silicium (SiO_2), le nitrure de silicium (SiN), les calculs ont été effectués sous Matlab.

Pour augmenter l'absorption de la cellule en diminuant la réflexion des rayonnements visible sur la face avant, une couche antireflet en SiN est déposée sur cette face avec les caractéristiques suivantes [5] :

d_{car} (nm)	n_{car}	R_{moy} (%)	J_{cc} (mA.cm^2)	η (%)
73	2.05	11.69	34.02	17.24

Tableau IV.1 : Les paramètres optiques de la CAR.

Ce sont les meilleurs résultats pris lors de l'étude de la CAR effectue par monsieur SAHOUANE.

Nous allons considérer le milieu extérieur est l'air (n_{Air} = 1). Une couche d'aluminium est déposée sur la face arrière (n_0 =2.6 - 3.8i). Comme les résultats des simulations nous le montre, les indices de réfraction optimums pour des BSR en oxyde de silicium et en nitrure de silicium sont alors :

- SiO_2 : n_B =1.45 et l'épaisseur optimum d_B=153 nm
- SiN : n_B =1.9 et l'épaisseur optimum d_B=112 nm

(Équation III-20)

Il convient de préciser que les indices de réfraction du silicium et de BSR varient avec la longueur d'onde et qu'il faut en tenir compte, dans notre cas, en a prit des indices et épaisseurs des BSR pour les quelles les meilleurs résultats optique et électrique sont obtenu sans prendre en compte pour quelle longueur d'onde.

La figure (IV.2) permet d'observer l'impact de la BSR sur la réflectivité du silicium. La couche de la BSR (SiN) considérée est d'épaisseur 112 nm et d'indice de réfraction n_B= 1.9 et pour la couche de la BSR (SiO_2) considérée est d'épaisseur 153 nm et d'indice de réfraction n_B= 1.45 à [900 - 1100] nm.

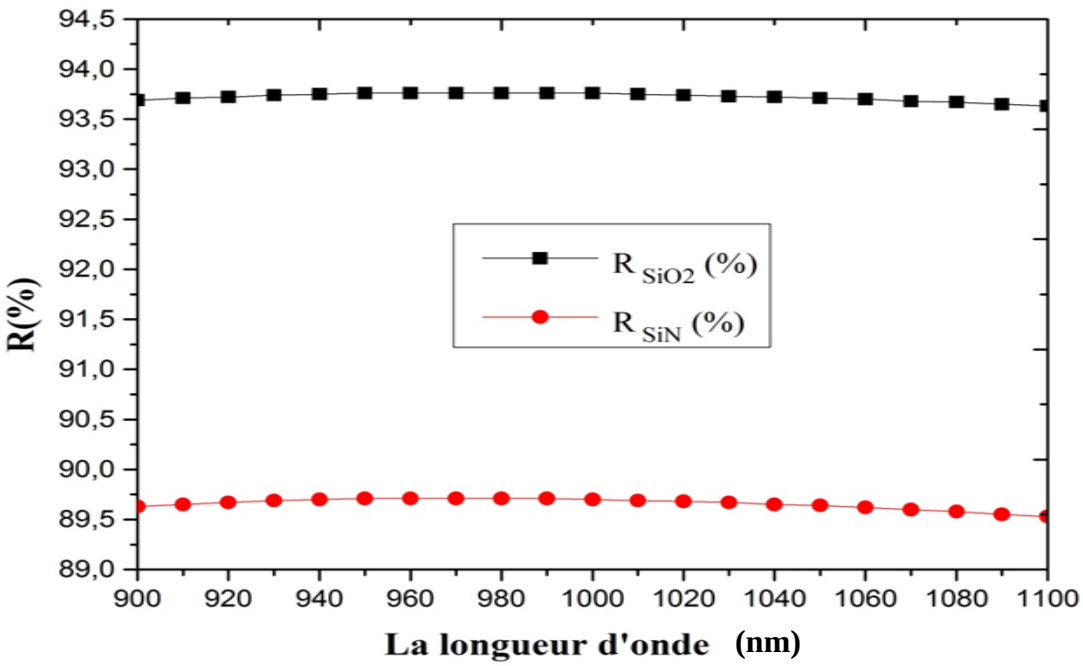


Figure IV.2 : Comparaison de la réflectivité simulée entre l'oxyde de silicium et le nitrure de silicium.

IV.3. Influence de l'épaisseur et l'indice de réfraction sur la réflectivité

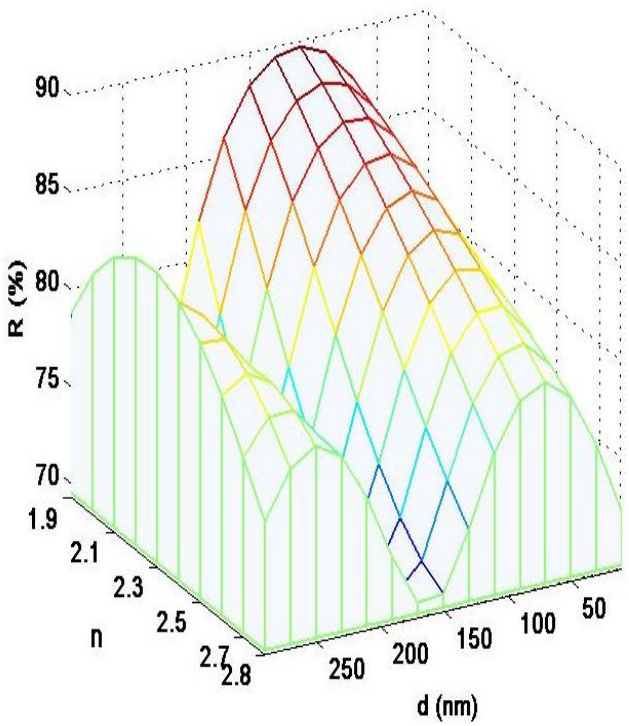
Nous avons effectué le calcul de la réflectivité pour les longueurs d'ondes entre [900-1100] nm, en variant les deux paramètres l'épaisseur et l'indice de réfraction mathématiquement R = f (d, n). Nous avons pris pour :

- [d, n] (SiN) = ([10:20:300], [1.9:0.1:2.8]).
- [d, n] (SiO_2) = ([10:10:300], [1.45:0.05:2]).

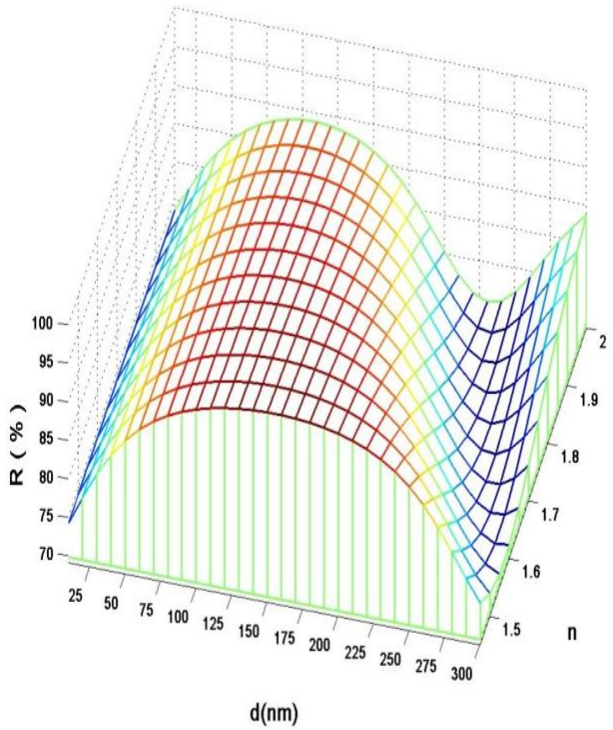
Les résultats sont présentés sur la figure (IV.3) sous forme des graphes tridimensionnels pour étudier l'influence de l'épaisseur et l'indice de réfraction en même temps.

Nous avons constaté que influence de l'épaisseur est plus important que celle de l'indice de réfraction soit pour l'oxyde de silicium où bien pour le nitrure de silicium. D'autre part, la réflectivité est maximale dans les zones limitées suivantes :

- Pour SiN ⟶ d = [95-130] nm, n = [1.9-2.3] avec Rmax à n = 1.9.
- Pour SiO_2 ⟶ d = [120-175] nm, n = [1.45-1.9] avec Rmax à n = 1.45.



BSR en SiN



BSR en SiO_2

Figure VI.3 : Influence de l'épaisseur (d) et l'indice de réfraction (n) sur la réflectivité (R).

D'après la figure (IV.3) l'influence de l'indice de réfraction sera considérable pour des épaisseurs supérieures à 300 nm.

Nous indiquons quelques valeurs pris pour d > 300 nm dans le tableau suivant :

	SiO_2			**SiN**		
n	1.85	1.65	1.55	1.9	2.1	2.5
d (nm)	360	320	400	310	350	420
R (%)	88.91	76.57	89.40	83.43	86.89	72.24

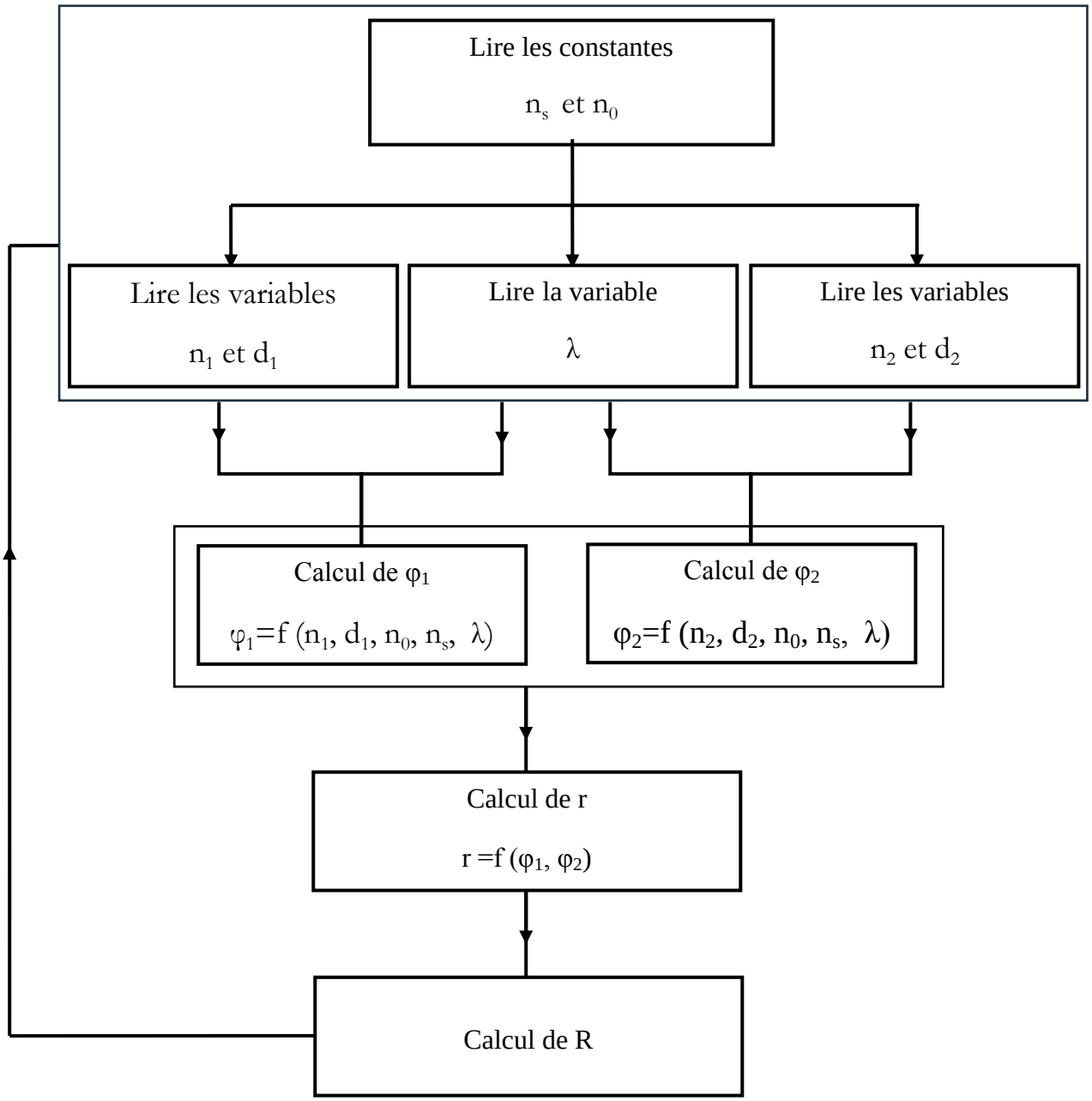
Tableau IV.2 : La réflectivité pour des valeurs d'épaisseur supérieur à 300 nm.

Programme utilisé

Dans ce travail, on a développé un programme de simulation sous Matlab pour chercher à augmenter la réflectivité la face arrière des cellules en silicium cristallin grâce à des BSR.

Organigramme

Ce schéma représente les différentes étapes de notre modèle de simulation qu'on a effectué sous Matlab.



IV.4. Résultats de simulation de la réflectivité de BSR

Pour étudier l'impact de BSR et de son épaisseur sur les performances d'une cellule photovoltaïque conventionnelle, et notamment le courant de court-circuit, nous avons fait appel au logiciel PC1D. Pour toutes les simulations PC1D de cette partie de chapitre, les paramètres utilisés sont les suivants :

Paramètres		Valeurs	Unité
Surface de la cellule		100	mm^2
Surface avant texturisé		54.73 3	Degré (°) µm
Épaisseur		200	µm
Profondeur de la jonction		0,5	µm
Couche antireflet avant (SCAR)		n = 2.03 d = 73	— nm
BSR	SiO_2	n = 1.45 d = 153	— nm
	SiN	n = 1.9 d = 112	— nm
Substrat type-p (Base)		$7,21.10^{15}$	cm^{-3}
Résistivité		2	Ohm.cm
Émetteur (dopage) type-n		$2,019.\ 10^{20}$	cm^{-3}
La longueur de diffusion L_D		150	µm
Recombinaison Arrière	SiO_2	10^5	cm / s
	SiN	1000	cm / s
Recombinaison Avant		1000	cm / s

Tableau IV.3 : Les paramètres de la cellule sur PC1D.

Bien que l'objectif principal des résultats développés dans ce travail vise essentiellement à l'amélioration de la réflexion de la face arrière, nous avons vérifié si l'application des empilements de diélectrique entraînait également une amélioration de courant de court-circuit ainsi que le rendement de la cellule. Pour cela, nous avons introduit les résultats de BSR dans PC1D pour calculer les courants de court-circuit des ces dernières.

Les meilleurs résultats de cette simulation de la réflectivité et le courant de circuit obtenus sont dans le tableau suivant :

	N	d (nm)	R_{moy} (%)	Jcc ($mA.cm^{-2}$)	η (%)	Voc (mV)	S éff	
							S_{Rear}	S_{Front}
S. CAR	2.03	73	11.66	33.2	15.9	586.2	10^5	1000
BSR (SiO_2)	1.45	153	93.72	33.5	16.1	586.4	10^5	1000
BSR (SiN)	1.9	112	89.66	34.2	16.6	591.6	1000	1000

Tableau VI.4 : Résultats de simulation de réflectivité (Matlab) et de courant de court-circuit (PC1D) pour un réflecteur dans le cas d'une cellule photovoltaïque.

En plus, de l'apport des BSR sur la réflectivité arrière, la couche de SiN, contribue à la passivation de la surface arrière (S = 1000 cm/s) car cette couche est riche en hydrogène, contrairement à la couche de SiO_2.

L'amélioration de courant de court-circuit est obtenue pour des réflectivités peu plus grandes. Nous avons ainsi obtenu une amélioration du courant de court-circuit pouvant aller jusqu'à 34.2 $mA.cm^{-2}$ pour une couche composé d'un SiN (n [900 - 1100 nm] =1.9 et d=112 nm) et 33.5 pour la couche composé d'un SiO_2 (n [900 - 1100 nm] =1.45 et d=153 nm).

IV.5. L'influence de la BSR sur le rendement de la cellule

La solution d'un réflecteur en face arrière va dans ce sens d'améliorer le rendement de la cellule. Celles-ci conduisent à des réflectivités (en « U ») et des courants de court-circuit très similaires.

L'amélioration de ce dernier paramètre est principalement due à une meilleure transmission des photons de fortes énergies (figure IV.4). Le rendement quantique externe montre qu'une partie de ceux-ci sont tout de même réfléchie au sein de la BSR.

La BSR semble donc un bon compromis entre la minimisation des pertes optiques et une épaisseur totale relativement faible. Il conviendra donc à l'avenir de réaliser une cellule photovoltaïque avec une telle BSR et de confirmer l'éventuelle amélioration du courant de court-circuit.

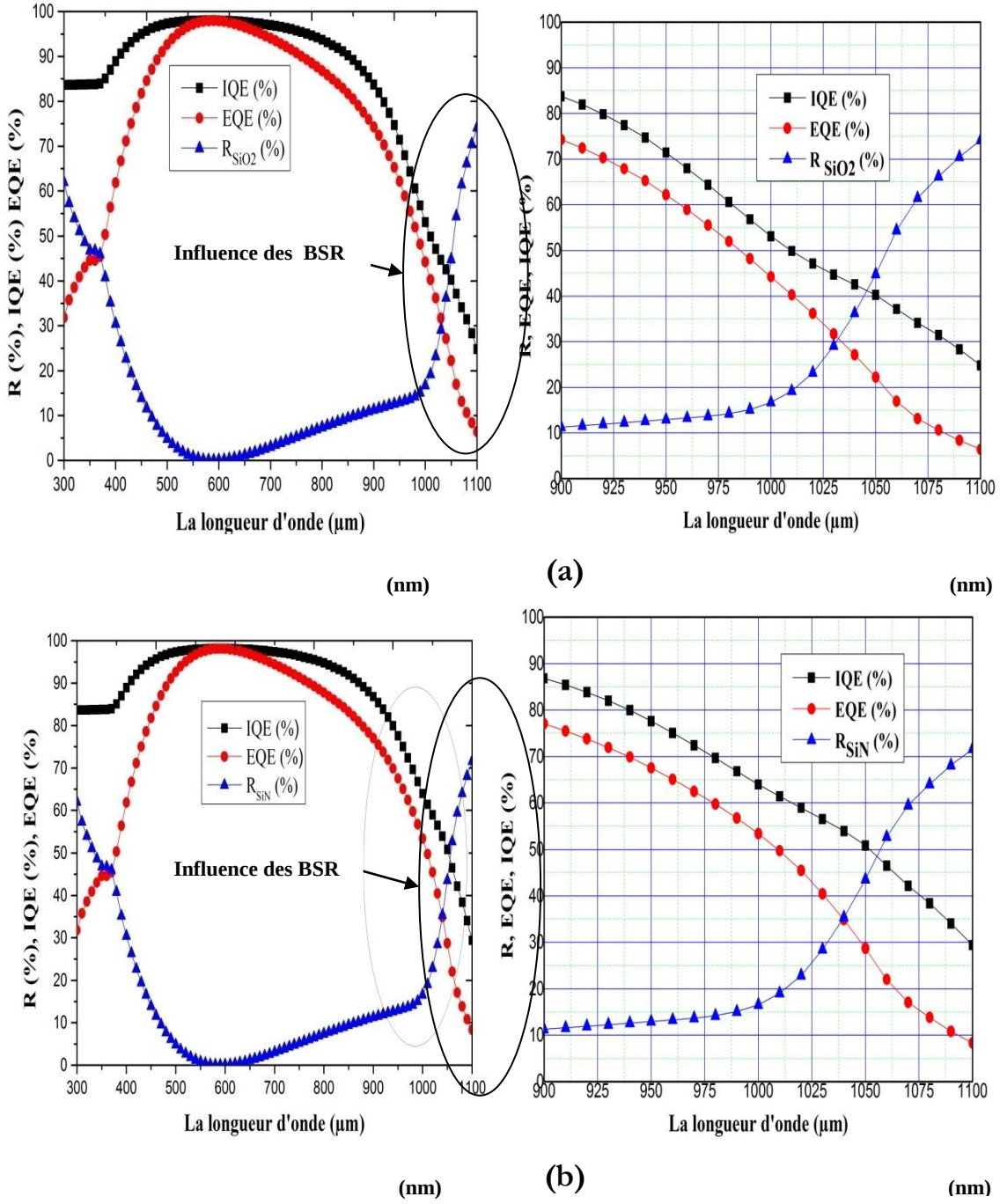


Figure IV.4 : Réflectivité et rendement quantique externe simulés respectivement par Matlab et par PC1D pour les couches BSR (a) l'oxyde de silicium et (b) le nitrure de silicium.

IV.6. Conclusion

Nous avons montré que théoriquement, l'application d'un réflecteur sur une cellule solaire, composée de nitrure de silicium sur la face arrière, pourrait induire une amélioration du courant de court-circuit +34.2 $mA.cm^{-2}$ plus important que celle de l'oxyde de silicium.

D'autre part, l'utilisation d'une couche réflectrice arrière avec le nitrure de silicium d'épaisseur d_{SiN} = 112 nm inférieur à celle dans le cas de l'oxyde de silicium évite d'avoir des problèmes des contraintes mécaniques à cause de la charge sur cette face.

Cette couche est déposée pour récupérer le maximum de photon de grande longueur d'onde (IR) et mettre un convertisseur de photon sur la face avant pour exploiter les photons de petite énergie (UV) donc nous obtenons une augmentation importante sur le rendement de la cellule solaire.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

❖ Travail Accompli

De nos jours les cellules solaires à couches minces sont de plus en plus utilisées essentiellement à raison de leur faible coût. Durant ces dernières décennies, les performances de ces cellules ont été nettement améliorées. Dans le cadre de ce projet nous a offert la possibilité d'étudier la réflexion du point de vue technologique. Pour parvenir à cet objectif, nous nous sommes appuyés sur l'étude de l'optimisation et simulation de réflecteurs arrière (BSR) sur les cellules solaires en silicium cristallin.

La disposition d'une couche BSF localisé en Aluminium a pour but de diminue les contraintes mécaniques et le taux de casse dont la résistance série devient plus élevé permettent la réduction de recouvrement de la face arrière en utilisant une grille de contact, donc nous permettons d'avoir bon rendement.

L'ajoute d'une couche supplémentaire entre les contacts en nitrure de silicium avec ces propriétés passivantes, joue le rôle de réflecteur arrière c'est une bonne solution pour limiter les recombinaisons sur cette face et d'une autre part augmente la réflexion des rayonnements infrarouge qui conduit à une amélioration importante sur le rendement de conversion d'une cellule solaire.

L'oxyde de silicium SiO_2 et le nitrure de silicium SiN sont des matériaux remarquables pour les applications photovoltaïques à base de silicium. De par leurs propriétés optiques et électriques, ces deux diélectriques peut être exploitée pour réduire à la fois les pertes optiques et les pertes liées aux recombinaisons des porteurs minoritaires sur la face arrière des cellules photovoltaïques grâce aux leurs caractère anti-réfléchissant lorsque leurs épaisseurs et leurs indices de réfraction sont correctement choisis.

Pour obtenir des résultats satisfaisants notre programme sur " Matlab " qui a la base des besoins en choix des propriétés des couches (indices, épaisseurs) ce fait par l'optimisation des meilleurs valeurs de ces deux derniers de la couche réflectrice (BSR) correspondants à la grande réflectivité (R) , puis la conjuguer pour avoir augmentation de rendement de la cellule.

Une analyse numérique montre que le BSR en nitrure de silicium c'est un bon choix avec son indice de réfraction n= 1.9 et son épaisseur d=112 nm donne un meilleur rendement de 16.6 % en comparant avec celles de l'oxyde de silicium dont l'indice de réfraction moins n=1.45, l'épaisseur élevé de 153 nm et un rendement inférieur η =16.1% à partir des simulations et des mesures de Réflectivité. De cela nous observons une amélioration de rendement est obtenue avec l'utilisation d'un BSR en SiN.

Du point de vue des propriétés optiques, les perspectives de travail concernent la réalisation d'une couche réflectrice afin de confirmer la simulation et de mesurer l'impact sur les performances des cellules photovoltaïques, ainsi pour augmenter le rendement de la cellule il convenait de faire une étude sur une double BSR sur la face arrière et voir son influence sur le rendement de la cellule.

Référence

Référence bibliographique

[1]Julien DUPUIS, '*Élaboration et caractérisation decouches de SiOxNy:H et SiNx :Hréalisées par méthode PECVD :application à la face arrière descellules photovoltaïques en silicium*' thèse doctorat 2009, INSA de Lyon.

[2] MAÏLYS GRAU,*'Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir decouchesminces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittagedepoudres'* thèse doctorat 2013.INSA de Lyon

[3]JEAN- FRANÇOISLELIEVRE, '*Élaboration de SiNx : H PEVCD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour application photovoltaïques'*thèse doctorat2007.INSA de Lyon

[4] Yassine SAYAD, '*Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charges minoritaires dans le siliciumpar interaction lumière matière'*thèse doctorat15/07/2009.L'institut National Des Sciences Appliquées De Lyon

[5] SAHOUANE NORDINE, '*Étude de la contribution des doubles couches antireflets dans l'amélioration descellules solairesconventionnelles à base de siliciummulticristallin'* thèse De Magister 2010/2011.Université Abou-Bekr BELKAÏD –Tlemcen.

[6] Farida REBIB, '*Étude structurale, optique et électrique de couches minces d'oxynitrure de silicium déposéesparpulvérisation cathodique radiofréquence réactive'*thèse doctorat 12/07/2012. UNIVERSITE BLAISE PASCAL.

[7]**Pierre PAPET, '** *Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium cristallin'*thèse doctorat2007.
L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

[8]Florent TANAY, ‘*Étude des défauts liés à l'oxygène dans le silicium Czochralski destiné auxcellules solairesphotovoltaïques – Influence des impuretés isovalentes*’thèse doctorat17/10/2013.Université D’aix-Marseille.

[9] Caroline Boulord, ‘*Développement de techniques de métallisation innovantes pour cellules photovoltaïques à hautrendement*’thèse doctorat2011.L’institut national des sciences appliquées de Lyon.

[10] G. Raymond, ‘*Étude mécanique des films de nitrure de silicium fortement contraints utilisesPour augmenterles performances des transistors*’archive ouverte2010.Institut National Polytech-nique de Grenoble – INPG.

[11] Laboratoire 3, ‘*Simulation d’une structure antireflet à multicouche’*. Université d’Ottawa Canada.

[12] Thomas VANYPRE, ‘*Étude et caractérisation du matériau CuAl1%1% utilisé en tant que couche de germination pour améliorer les performances de fiabilité des interconnexions des technologies 45 nm et ultérieures*’thèse doctorat2008.École Doctorale : Électronique, Électrotechnique et AutomatiqueLyon.

[13] Jean-Marc CHOVELON, ‘*Preparation de couches minces d'oxynitrure de silicium par PECVD en vue de greffage chimique. application a un ISFET PH*’ thèse doctorat 1991. L'école centrale de Lyon.

[14] Martin Friz and Friedrich Waibel’, *CoatingMaterials*’ article 2003. Balzers, Liechtenstein.

[15] FOUTEM FATIMA, ‘*Étude de la contribution d’une couche BSF (back Surface Field) sur les performances des cellules Solaires en GaAs*’ thèse magister 2013/2014. Université Abou-BakrBelkaid–Tlemcen.

[16] OUDDAH MOURAD, ‘*Étude du silicium poreux destine aux cellules solaires*’thèsemagister en physique2009. Université Mentouri Constantine.

Résumé :

Ces dernières années, plusieurs recherches étaient effectuées dans le domaine des cellules photovoltaïque pour le but d'améliorer le rendement d'une cellule solaire. La disposition d'une couche antireflet (CAR) à la face avant et une couche réflectrice à face arrière de la cellule solaire pour augmenter la réflexion des rayonnements à longue d'onde vers la face avant jusqu'à qu'ils sont absorbées, permet de réduire des pertes optiques due à la réflexion des rayonnements. En plus, l'utilisation un des deux matériaux le nitrure et l'oxyde de silicium SiON /SiN sur ces faces est une voie envisagée pour améliorer le rendement de conversion à cause de leur propriétés de passivation et de réflexion. Ce travail, consiste à rechercher la meilleure BSR permettant d'améliorer efficacement les performances électriques et spectrales des cellules solaires.

Mots clés : réflecteur arrière (BSR), cellule solaire, nitrure de silicium, oxyde de silicium, spectre solaire.

الملخص:

في السنوات الأخيرة، أجريت عدة دراسات في مجال الخلايا الضوئية لغرض زيادة كفاءة الخلايا الشمسية. إن تركيب طبقة ضد الانعكاس على الجبهة الأمامية و طبقة عاكسة على السطح الخلفي للخلية الشمسية لزيادة انعكاس الأشعة طويلة الموجة في اتجاه الجبهة الأمامية حتى يتم امتصاصها، يسمح بالتقليل من الفقدان البصري الناجم عن انعكاس الإشعاع. بالإضافة إلى استخدام إحدى المادتين نيتريد السليكون و أكسيد السليكون على الجبهة و السطح يعتبر وسيلة لتحسين خاصية التخميل و الانعكاسية و بالتالي رفع كفاءة التحويل. يبحث هذ ا العمل عن أفضل طبقة عاكسة على الجبهة الخلفية لتحسين الأداء الكهربائي و الطيفي للخلايا الشمسية على نحو فعال.

الكلمات الدالة: عاكس خلفي، خلية شمسية، نيتريد السليكون، أكسيد السليكون، الطيف الشمسي

Abstract

In recent years, many studies were carried out in the field of photovoltaic cells for the purpose of improving the efficiency of a solar cell. The provision of an anti-reflective layer (CAR) in the front and a reflective layer back surface of the solar cell to increase reflection of long-wave radiation to the front until they are absorbed, allows reduce optical loss due to reflection of radiation. In addition, using one of the two materials nitride and silicon oxide SiON / SiN on these surfaces is a proposed way to improve the conversion efficiency due to their passivation and reflection properties. This work is to search for the best BSR to effectively improve the electrical and spectral performance of solar cells.

Keywords: rear reflector (BSR), solar cell, silicon nitride, silicon oxide, solar spectrum.