

I- Introduction

Les pertes optiques correspondent aux photons réfléchis sur la face avant et ceux transmis à travers la cellule sans être absorbé, alors qu'ils auraient pu générer des paires électron-trous, affectent fortement le courant de court-circuit I_{cc} . Pour cela, une couche antireflet est indispensable [1].

Les solutions existantes pour limiter les pertes de rendement dans les cellules solaires photovoltaïques fonctionnent correctement mais elles présentent un coût élevé. Des solutions moins onéreuse et souvent un peu moins performantes sont systématiquement 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 $SiN_x:H$, l'oxyde de silicium SiO_2 , l'oxyde de Titane TiO_2 ,...

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 antireflet (CAR) est capable de lever les verrous physiques liés au matériau de base.

II— Les pertes par réflexion à la surface de la cellule

Le coefficient de réflexion R du semiconducteur n'est pas nul. De ce fait, une partie du flux incident est réfléchi et donc perdue. Une texturisation et une couche antireflet permettent de réduire ce coefficient [2].

II.1. Rappel sur la réflexion et la transmission

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

$$N=(\epsilon)^{1/2}=n+ik \quad (III.1)$$

Par ailleurs, on note ϵ la permittivité complexe du matériau et $n = \frac{c}{v}$ est l'indice de réfraction (c et v sont les vitesses de la lumière dans le vide et dans le milieu considéré). k est le coefficient d'extinction correspondant à l'absorption de l'onde électromagnétique par ce même matériau. Le coefficient d'absorption α est défini par l'équation suivante [2].

$$\alpha = \quad (III.2)$$

Une onde électromagnétique se propage dans la matière avec le vecteur d'onde :

$$(III.3)$$

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.1).

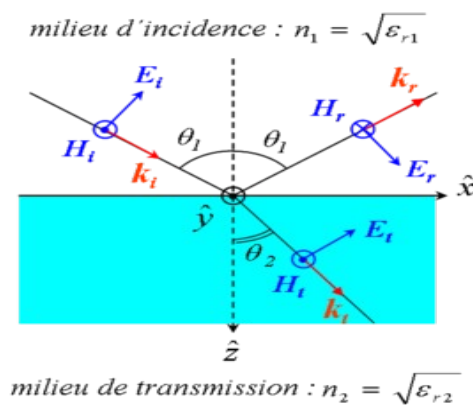


Figure III.1 : La réflexion et la transmission d'une onde électromagnétique incidente sur l'interface d'un milieu semi-infini.

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 dioptré et que les rayons réfléchis et transmis sont dans le plan d'incidence.

La figure III.2 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.

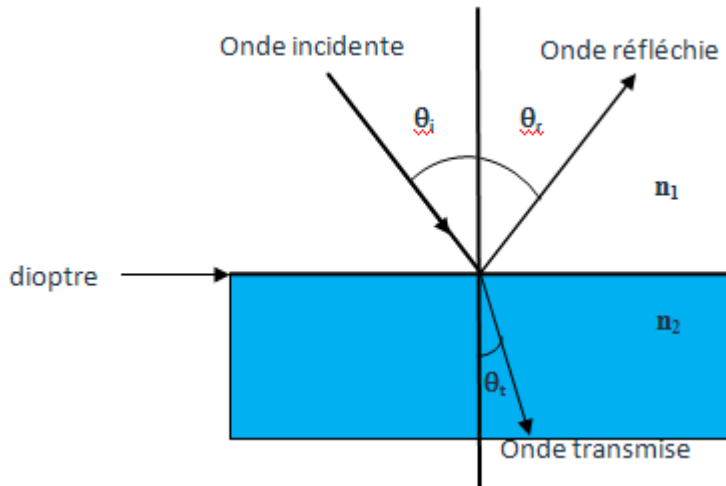


Figure III.2 : Les angles d'incidence de réflexion et de transmission

Les coefficients de réflexion et de transmission de la lumière pour la polarisation parallèle et perpendiculaire sont calculés à partir des équations III.3 à III.6.

(Polarisation parallèle) (III.3)

(Polarisation parallèle) (III.4)

(Polarisation perpendiculaire) (III.5)

(Polarisation perpendiculaire) (III.6)

(III.7)

(III.8)

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. R est le coefficient de réflexion, T est le coefficient de transmission. N_1 est l'indice de réfraction du côté incident et N_2 l'indice de réfraction du côté de transmission.

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 [2] :

$$N_1 = N_2 \quad (III.9)$$

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 :

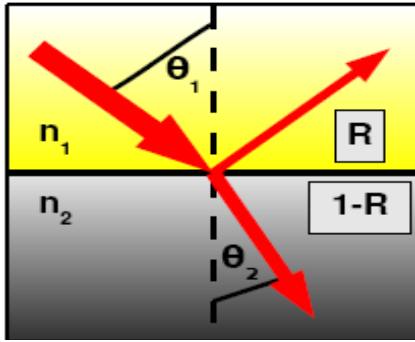
$$R+T+A = 1 \quad (III.10)$$

II.2. **Application à la couche antireflet**

La couche antireflet a pour rôle d'adapter l'indice optique entre l'air ou un corpuscule (verre) et le substrat afin de minimiser la réflexion pour des longueurs d'onde données. Pour cela, on doit bien choisir l'indice de réfraction de la CAR n_c et son épaisseur d_c . Afin d'exploiter les phénomènes d'interférence destructive, il faut que le déphasage entre l'onde réfléchie à l'interface air (corpuscule) /CAR et l'onde réfléchie à l'interface CAR/substrat soit en opposition de phase. Dans ce cas; l'onde incidente est intégralement transmise ou absorbée (Figure III.4).

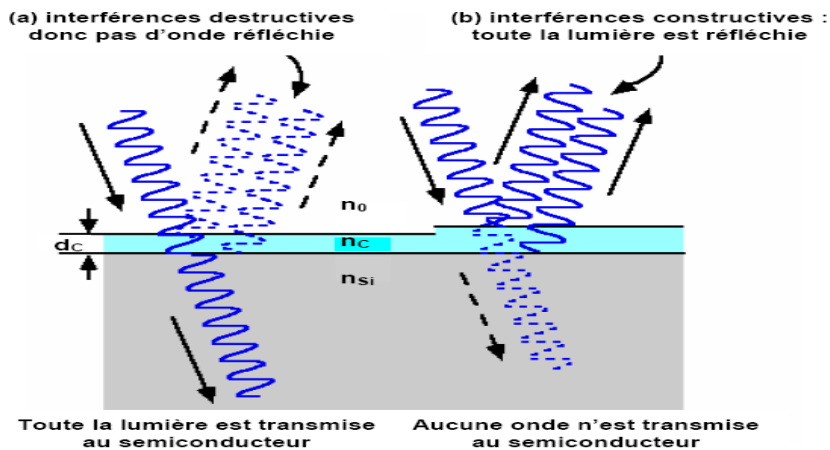
Calculons la réflectivité de silicium nu : si on considère une interface air silicium ($N_1 = 1$, $N_2 = n_{si} + i k_{si}$) en incidence proche de la normale () figure III.3, on aura :

$$(III.11)$$



Nous allons considérer le cas où $k_{Si} \approx 0$ c'est-à-dire 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 une longueur d'onde correspondant au maximum de rayonnement solaire ($\lambda=600$ nm, $n_{Si} = 3.94$, k_{Si})).

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



Repartons des équations (III.11) et considérons les réflexions aux surfaces ($k_{Si} \approx 0$, $\lambda=600$, $n_{Si} = 3.94$):

Figure III.4 : 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 [5].

et (III.12)

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

$$(III.13)$$

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

$$(III.14)$$

et Δ : la différence de marche

$$(III.15)$$

D'où :

$$(III.16)$$

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

1)
$$(III.17)$$

2)
$$(III.18)$$

La première condition est satisfaite si : $n_0 = n_1$ avec l entier. Ainsi, on obtient l'épaisseur de la CAR

$$(III.19)$$

et

$$(III.20)$$

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 maximale du soleil pondéré par la pénétration acceptable des photons au sein du silicium [2].

En ce qui concerne les conditions aux limites, deux cas peuvent se présenter.

➤ **La cellule est utilisée directement.**

Dans ce cas, nous avons $n_0 = n_{\text{air}} = 1$ et $n_1 = n_{\text{Si}} = 3,94$ (pour $\lambda = 600$ nm).

Les équations III.19 et III.20 nous donnent $n_{\text{CAR}} = 2$ et $d_{\text{CAR}} = 72$ nm.

➤ **La cellule est encapsulée dans un module.**

L'encapsulation utilise habituellement le polymère EVA (Éthylène - Vinyle - Acétate) qui couvre la cellule suivie par une plaque de verre qui fait la taille du module. Le rayonnement incident doit donc traverser plusieurs interfaces supplémentaires pour atteindre la photopile : air/verre-EVA/CAR/Si. L'EVA et le verre ont des indices proches de 1,46. Dans ce cas, nous avons $n_0 = n_{\text{EVA}} = n_{\text{verre}} = 1,5$ et toujours $n_1 = n_{\text{Si}} = 3,94$ pour $\lambda = 600$ nm. Les équations précédentes donnent alors $n_{\text{CAR}} = 2,3$ et $d_{\text{CAR}} = 60$ nm.

Cet exemple prend en compte qu'une seule longueur d'onde afin de déterminer la réflexion totale d'une gamme spectrale. 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 de longueurs d'onde étudiée :

$$(III.21)$$

Les limites inférieure et supérieure du domaine spectral étudié.

L'utilisation du SiN comme une couche antireflet, déposée par plasma permet une grande souplesse dans l'ajustement de l'indice de réfraction de la CAR. Ainsi, l'indice de réfraction du SiN peut être ajusté de 1,9 à 3 [2], avec le réacteur PECVD et donc le dépôt d'une couche antireflet est possible avec le même matériau aussi bien pour une cellule nue qu'une cellule encapsulée.

L'utilisation du SiN comme une couches antireflet, déposée par méthode plasma permet une grande souplesse dans l'ajustement de l'indice de réfraction de la CAR. Ainsi, l'indice de réfraction du SiN peut être ajusté de 1,9 à 3 [2], avec le réacteur PECVD et donc le dépôt d'une couche antireflet est possible avec le même matériau aussi bien pour une cellule nue qu'une cellule encapsulée.

Les équations utilisées ici restent limiter. En réalité, l'optimum n'est pas tout à fait à 600 nm à cause du caractère fini de la cellule et surtout à cause des

variations d'indice du silicium et du SiN en fonction de la longueur d'onde qui vont influencer sur la réflectivité moyenne définie par l'équation III.21.

L'optimisation de la réflectivité va même plus loin puisque généralement l'absorption de la couche antireflet (et de l'encapsulant) n'est jamais complètement nulle, pour cela le minimum de la réflectivité et les meilleurs résultats électriques peuvent être obtenus pour des indices et épaisseurs différentes des indices et épaisseurs optimaux de la CAR. Nous reviendrons plus en détail sur ce problème dans le chapitre IV.

III— Développement de multicouches antireflets (MCAR)

Les pertes causées par la réflexion dans les cellules solaires malgré la mise d'une couche antireflet sont grandes et elles ont un impact important sur le courant I_{cc} . Donc il est intéressant de pouvoir les minimiser davantage et pour cela une option peu contraignante serait de développer des multicouches antireflets.

Des multicouches antireflets MCAR sont simulées en utilisant un modèle matricielle « Matrix method » [3]. Cette méthode nous a permis de traiter les double couches antireflets de $SiN_x:H$ et de SiON.

Ce modèle présente une manière rapide et précise de simuler la propagation d'onde électromagnétique dans un milieu posé. Parmi une variété d'approches de la théorie de matrice, les plus généralement utilisés sont la matrice caractéristique et les descriptions de matrice de transfert.

Dans ce travail, nous avons utilisé l'approche caractéristique de matrice qui relie les composants tangentiels totaux des champs électriques et magnétiques aux frontières multicouches.

La structure d'une multicouche détermine complètement la matrice caractéristique. Cette approche est plus générale et elle peut être augmentée pour traiter les interfaces évaluées [3].

III.1. Rappel sur les empilements interférentiels

Supposons un empilement de p_i couches d'indice de réfraction n_i et d'épaisseurs e_i posées sur un substrat d'indice n_s , l'angle d'incidence de rayon incident est compris entre 0 et 65° . Subséquemment les rayons réfléchis et réfractés en polarisation parallèle sont égaux à ceux en polarisation transversale (figure III.3) [4].

III.1.1. L'amplitude de l'onde réfléchie par le dioptre

D'après les équations III.7 et III.8, les ondes réfléchies et transmises par un dioptre sont :

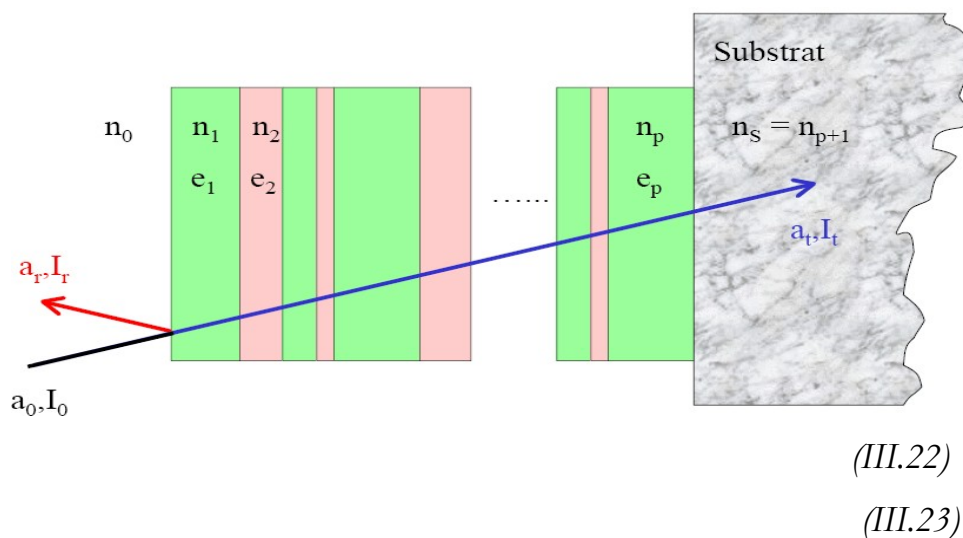


Figure III.5 : l'amplitude de l'onde à travers un empilement

Les épaisseurs des couches permettent de déphaser les différents faisceaux réfléchies par les différents dioptres, on aura donc la différence de phase qui est égale à :

$$(III.24)$$

Pour obtenir des interférences destructives à la réflexion, les épaisseurs d_r des différentes couches sont prises égaux :

$$(III.25)$$

Avec λ_0 est la longueur d'onde centrale

III.1.2. Études des amplitudes progressant dans l'empilement

Pour détailler un peu la façon avec laquelle progressent les faisceaux dans les différentes couches, nous allons suivre le figure III.6 :

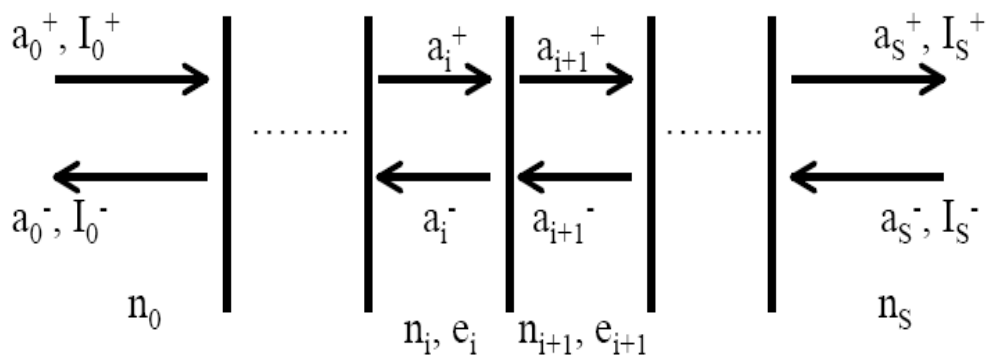


Figure III.6 : l'amplitudes des rayonnement progressant dans l'empilement

Avec :

et l'amplitude et l'intensité de l'onde incidente, respectivement

et l'amplitude et l'intensité de l'onde réfléchie, respectivement

et l'amplitude et l'intensité de l'onde réfractée, respectivement vers le substrat

et l'amplitude et l'intensité de l'onde réfléchie, respectivement par le substrat

et l'amplitudes des l'onde réfractée, respectivement dans les couches i et i+1

et l'amplitudes des ondes réfléchies, respectivement par les couches i et i+1

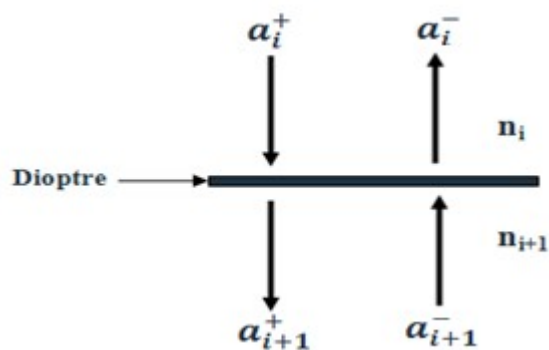
Si on suppose qu'il n'y a pas d'onde réfléchie par le substrat, on aura :

Pour un système air/substrat, la réflexion et la réfraction sont données par les relations suivantes :

$$; \quad (III.26)$$

$$; \quad (III.27)$$

III.1.3. Les amplitudes des faisceaux à la traversée d'un dioptre



Dans cette partie, nous allons donner les différentes équations des amplitudes des faisceaux à la traversée d'un dioptre. Pour cela, nous supposons deux couches d'indice de réfraction n_i et n_{i+1} , le faisceau traversant la couche i avec une amplitude sera transmis vers le milieu i+1 avec une amplitude de , et .

Figure III.7 : *l'emplitudes des rayonnement à la traversée d'un dioptre*

Les valeurs des grandeurs , et sont exprimées par les équations :

Ce qui nous donne :

$$= = D_i \quad (III.28)$$

Avec :

$$D_i = \quad (III.29)$$

III.1.4. Étude des amplitudes des rayonnements à la traversée d'une couche

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

$$(III.30)$$

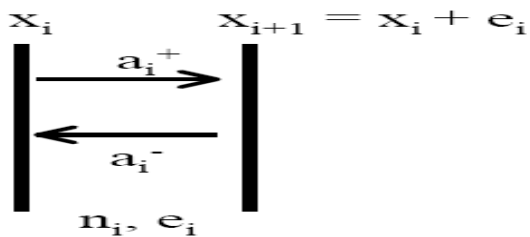


Figure III.8 : l'amplitude du rayonnement à la traversée d'une couche

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

$$(III.31)$$

Avec : est le déphasage entre les différentes ondes réfléchies.

D'où,

$$(III.32)$$

Avec :

$$(III.33)$$

III.1.5. Étude des amplitudes des rayonnements à la traversée de l'empilement

Les amplitudes totales des rayonnements réfléchis et réfractée dans un empilement de plusieurs couches est le produit de toutes les amplitudes à la traversée des dioptries et aussi à la traversée des couches, qui est donné par la relation suivante :

$$(III.34)$$

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

Il est en résulte les amplitudes à la traversée d'un empilement III.35:

$$= = M \quad (III.35)$$

A la fin du processus, les relations générales de la transmission, de la réflexion et de l'absorption s'écrivent :

$$(III.36)$$

Avec Y_s l'admittance de rayonnement solaire

IV—Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réussi à construire un programme sous Matlab qui nous a permis de voir l'influence de la réflectivité, la transmission et l'absorption des CAR et des MCAR sur le rendement des cellules solaires. Les calculs ont été effectués en considérant les deux possibilités d'application pour une cellule avec une monocouche antireflet, à savoir pour une cellule encapsulée ($n_0 = 1.5$) ou non ($n_0 = 1$). Ainsi pour une cellule avec une multicouche antireflets non-encapsulées.

En premier temps, nous avons fait un programme où on a négligé l'influence de l'absorption des couches. Mais les forts indices de réfraction nécessaires à la réalisation de ces multicouches vont irrémédiablement induire une forte absorption des photons de grandes énergies. Pour cela, comme deuxième étape, nous avons introduit les équations d'absorption dans le programme.

Bibliographie de chapitre III

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

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

[3] : *Manuelle de logiciel Atlas. Device simulation software, june 11, 2008.*

[4] : **Frédéric LEMARQUIS**. *Couches minces optiques : approche théorique et mise en œuvre. Communication de 17-18 octobre 2006, Institut Fresnel, Marseille.*

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