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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE DEPARTEMENT D'Automatique

Mémoire de Fin d'Etude De MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Génie Micro-Electronique

Présenté par ACHOUR MOURAD

Mémoire dirigé par Mr : Lamrous Omar et co-dirigé par Mr : Chalal Mohand

Thème

Simulation unidimensionnelle des caractéristiques de cellules solaires et contribution à l'étude des effets de revêtements en matrice dopée en terres rares

Soutenue le 09 Mars 2017 Membre de jury

Noms/Prénom	Qualité	Grade	Lieu d'exercice
Benfdila Arezki	Président	Pr	UMMTO
Lamrous Omar	Encadreur	Pr	UMMTO
Chalal Mohand	Co-Encadreur	MC	UMBB
Lakhlef Ahcene	Examinateur	MCB	UMMTO
Oulebsir Allaoua	Examinateur	MAA	UMBB

Remercîments :

Tout d'abord je remercie **le Dieu** clément et miséricordieux de m'avoir donné la force et le patient durant mes études pour arriver à ce jour-là.

Je remercie aussi mes parent qui ont su m'encouragé à continuer jusqu'au bout

Je voudrai remercier aussi **Mr Chalal Mohand** Enseignant/Chercheur à l'UMBB/USTHB et **Mr Oulebsir Allaoua** Enseignant à l'UMBB et à l'USTHB pour leurs fortes contributions dans mon travail et leurs aides

Aussi un grand remerciement a **Mr Lamrous Omar** professeur et doyen de la faculté des sciences a l'UMMTO pour m'avoir dirigé vers mes deux promoteurs qui mon proposé ce thème très passionnant et important. Ainsi que **Mr Benfdila Arezki** professeur et responsable de la recherche du laboratoire Géni Micro-Electronique qui ma accueillis dans sa filière aussi très intéressante et d'actualité.

SOMMAIRE :

Introduction générale

Chapitre I : Introduction aux cellules solaires photovoltaïques :

- 1-Notions fondamentales sur les Semi-conducteurs
 - 1-1 Introduction au semi-conducteur
 - 1-2 Structures des bandes d'énergie dans les semi-conducteurs
 - 1-3 La conduction électrique dans les semi-conducteurs
 - 1-4 Concentrations des porteurs de charge
 - 1 -5 Calcule de Ef
 - 1-6 Alignement des niveaux de Fermi l'hors e la mise en contact :
- 2 Jonction PN
 - 2 -1 Le potentiel électrique
 - 2-2 Variations du Potentiel électrique
 - 2 -3 Courant de dérive (saturation)
 - 2 -4 Courant de diffusion
 - 2 -5 Effet de la température
- 3 Jonction pn hors équilibre
 - 3 -1 Equation e continuité
 - 3-2 Phénomène de génération et recombinaison
 - 3-2-a) Taux de recombinaison volumique
 - 3-2-b) Recombinaisons surfaciques
 - 3-2-c) Mobilités des porteurs
 - 3-2-d) Le taux de génération G
- 3-3 Le courant photo générer
- 4 Cellule solaire conventionnelle
 - 4-1 : Structure élémentaire
 - 4-2 : Principe de conversion de lumière en courant électrique
 - 4-3 : Caractéristiques principales d'une cellule solaire

Chapitre II : Modélisation et simulation des cellules solaires

I – Traitement numériques des équations de transport

- 1 Discrétisation spatiale
- 2 Linéarisation et résolution du système d'équation
- 3 Code de calcul PC-1D
 - 3-1: Présentation générale
 - 3-2 Exemple de caractéristiques d'une cellule solaire standard

II - Etude et optimisation par simulation numérique des caractéristiques d'une cellule solaire

1-Effet de la structure physique d'une cellule solaire :

- 1 1 Cas d'une cellule à base du Silicium :
 - 1 1 1: Effets du substrat
 - 1 1 2: Effet de l'émetteur
 - 1 1 3: Effets des pertes volumiques et surfaciques
- 1-2 Cas d'une cellule à base de l'InP
- 2 Model théorique optimisé de cellule à base de Si et InP

Chapitre III : Effet des terres rares sur la modification du spectre solaire pour l'irradiation des cellules solaires

1 - Spectre solaire :

2-Spectres d'absorption d'une cellule solaire :

3-Réponses Spectrales d'une cellule solaire :

4-Effets de revêtement contenant des terres rares sur les caractéristiques d'une cellule solaire :

- 4-1 Généralités sur la spectroscopie des ions de terres rares
- 4-2 Transitions électroniques dans les matrices solides

a) Les transitions radiatives :

- b) Transitions non radiatives
- 4-3 MECANISMES DE TRANSFERTS D'ENERGIE
 - a) Transfert d'énergie direct
 - b) Transfert d'énergie assisté de phonons
 - i. Processus d'up-conversion :
 - ii. Processus Down conversion

- 4-4 Spectroscopie d'absorption et loi de Beer-Lambert
 - a) Coefficient de transmission et absorbance :
 - b) Loi de Beer-Lambert
 - c) Section efficace d'absorption
- 4-5 Effet des terres rares sur le spectre solaire
 - a) Choix des terres rares et architecture de la cellule
 - b) Effet d'une matrice vitreuse dopé en terres rares sur le spectre normalisé AM1.5G :

 $4-6\,$ Simulation des caractéristiques de cellules solaires avec modification down-conversion du spectre solaire

- a) Cas idéal :
- b) Cas particulier des terres rares

4-7 Simulation des caractéristiques de cellules solaires avec modification up-conversion du spectre solaire

- a) Cas idéal :
- b) Cas particulier des terres rares

Conclusion générale

Liste des abréviations :

Si-n : Cellule solaire à base de Silicium type P avec émetteur de type N Si-p: Cellule solaire à base de Silicium type N avec émetteur de type P InP-n : Cellule solaire à base du Phosphure d'Indium de type P avec émetteur de type N Eu : Europium (Elément de terre rare) **Er**: Erbium, (Elément de terre rare) Sm : Samarium, (Elément de terre rare) **Tb**: Terbium (Elément de terre rare) **Yb**: Ytterbium, (Elément de terre rare) **Te**: Tellure, (Elément de terre rare) **ZBA** : Matrice vitreuse à base de zirconium **PV**: Photovoltaïques UV : Ultraviolet **IR** : Infrarouge **BI** : Bande Interdite **BC** : Bande de conduction **BV** : Bande de valence **ZCE** : Zone de charge d'espace **Voc**: Tension de circuit ouvert Icc : Courant de court-circuit Vm : tension de puissance maximale

Im : Courant de puissance maximale

Introduction générale :

Actuellement les ressources fossiles et nucléaires dominent la consommation énergétique mondiale. Le principal inconvénient est que leur quantité sont limitée pour l'un est très dangereux pour l'autre. L'alternative est les énergies renouvelables dans leurs différentes formes. Parmi elle l'énergie solaire comme l'unique ressource inépuisable qui nous parvient à la surface de la terre avec des grandes densités dépassant le besoin énergétique mondial. Cette énergie ne peut être exploitée par l'être humain que par des formes pratiques qui sont l'électricité et la chaleur. Parmi les processus de conversion on trouve essentiellement la conversion photovoltaïque c'est-à-dire la production directe de l'électricité par la lumière du soleil. Ce systèmes utilise un mécanisme physique qui consiste à l'absorption de la lumière du soleil qui s'étend sur un spectre large contenant toutes les longueurs d'onde a des amplitude différente (équivalent a un corps noir a 5500 K) puis génère un courant électriques. Malheureusement, ce processus possède un rendement relativement faible (< 20 % dans les meilleurs des cas industriels). Les cellules solaires sont des composants électroniques concus sur des architectures à base de matériaux semi-conducteurs. On trouve, en grande partie le matériau prédominant qui est le silicium et ses variétés, les matériaux semi-conducteurs binaire III-V comme InP ainsi que d'autres combinaison ternaires, quaternaires et d'autres matériaux faits en couches minces spécifiquement à base d'alliages ayant les propriétés de semi-conducteurs, il existe aussi de nouvelle génération avec des matériaux organique qui utilisé un processus complètement différent de celle des jonction a semi-conducteur. La cellule solaire est donc caractérisée par le matériau sur lequel elle est concue, elle est fabriquée de la même méthode que les dispositifs micro-électronique mais a des dimensions plus élevé ce qui facilite leur fabrication néanmoins il est fortement demandé de maitriser les phases de dopage et de métallisation pour optimiser les paramètres physiques touchant les caractéristiques et principalement le rendement de conversion.

Le principe de son fonctionnement est basé les propriétés d'une diode a jonction PN ou une des régions est suffisamment superficielle (faible profondeur) et d'une grande surface, la zone de charge d'espace s'étale en largeur et on profondeur vers la deuxième région qui faiblement dopé par rapport à celle de la surface. La lumière incidente sur la face active pénètre dans la ZCE et donc crée des pairs électrons trous et grâce au champ interne il sont séparé puis entrainé vers les contacts ce qui donne un courant électrique. Les porteurs générés sont-ce qui ont une énergie supérieure ou égale au gap entre **la** bande de valence et de conduction du semi-conducteur. Il est connu que pour le gap du silicium est autour de 1.14 eV équivalent en longueur d'onde a 1100 nm et celui de l'InP est de 1.35 eV soit 918 nm ainsi on y trouve un maximum de puissance du spectre solaire a exploité c.à.d. que tous les longueurs d'ondes supérieur à celle du gap ne sont pas absorbé alors que le spectre s'étale jusqu' 4000 nm et même plus donc une quantité grande énergie est perdue.

Le travail de ce mémoire de MASTER a été proposé dans un contexte relativement récent ou des recherches se font dans le domaine de l'amélioration du rendement de conversion en jouant sur la distribution spectrale de la lumière du soleil. On se limite à l'étude de deux cellule solaire a base de silicium et d'InP, chacune mis en sandwiche entre deux revêtements (matrice vitreuse) dopé en terre rares et suivre leur effet sur les caractéristiques de ces cellule. La matrice du dessus cerf a convertir une partie du spectre solaire de l'UV vers le visible via le processus down-conversion car ces dernier ont une faible pénétration mais nuise aux performances des cellules solaire par thermalisation UV et la matrice du dessous cerf à convertir une partie du spectre IR vers le visible via le processus up-conversion car une grand partie de ces rayonnement ne sont pas absorbé par la cellule solaire ainsi on récupère une partie pour la réinjecté vers la jonction de plus les IR provoque aussi le réchauffement des cellule solaire.

Donc le but de ce mémoire et de prouver par simulation en utilisant un code très connu dans la littérature conçue par Paul Basore de l'université d'Australie qui est PC1D, qu'on peut améliorer le rendement on jouant sur le spectre solaire.

Résumé :

Tout d'abord nous allons faire quel que rappelle sur les notions des semi-conducteur et de cellule solaire dans le chapitre I. puis dans le chapitre II une introduction sur le code de simulation PC1D qui vas être la base de notre étude ,en suite voire par simulation les effet structurelle des cellule solaire sur leur performance (notamment la caractéristique I(V)) ,après une optimisation de nos deux cellule à base de Si et InP , enfin le bute principale dans le chapitre III une introduction sur la spectroscopie des terres rares suivie d'une étude par simulation des effet d'un spectre solaire modifier par une matrice dopé idéal sur les performances de nos deux cellule plus un exemple de matrice de ZBA dopé en Europium pour le cas du down-conversion et une matrice de tellure dopé en Erbium.

Chapitre I

Introduction aux cellules solaires photovoltaïques

1 – Notions fondamentales sur les Semi-conducteurs :

1-1- introduction au semi-conducteur :

Les Semi-conducteurs sont des matériaux qui possèdent des propriétés électriques qui ne se classent pas dans les conducteurs ni dans les isolants. Ces propriétés sont particulièrement dépendantes de la température et de la pureté du matériau. Les atomes formant ces semiconducteurs sont ceux de la colonne à 4 électrons de valence et on trouve principalement le Silicium et le Germanium comme matériaux idéalement semi-conducteurs. Les 4 électrons de valence qui, en général, sont en liaison avec d'autres atomes trouvent que l'énergie thermique à température ambiante peut casser une de ces liaisons et une densité de charge d'électrons apparait en donnant une conducteurs et les lacunes provoquées par les électrons se comportent aussi comme des porteurs libres appelés trous. La conduction électrique se fait donc par les électrons et par les trous. On introduit avec une précision assez élevée à l'intérieur des matériaux semi-conducteurs des impuretés en atome à 5 électrons de valence ou on augmente la densité des électrons et on parle de semi-conducteur de type P.

Un matériau semi-conducteur peut être généré par des liaisons covalentes d'autres atomes des éléments avoisinant les éléments de la colonne 4. Il existe des semi-conducteurs binaires lorsque on forme un alliage de deux atomes des colonnes 3 et 5 (ex : GaAs. InP) et les 3-6

Les semi-conducteurs ternaire qui font appelle a combinaison de 3 type de matériaux (2)-(4)- $(5)_2$ ou $(1) - (3) - (6)_2$ di-arséniure de zinc et de germanium ZnGeAs₂ ou le di-séléniure de cuivre et d'indium CuInSe₂.

1-2 : Structures des bandes d'énergie dans les semi-conducteurs

semi-conducteurs Les propriétés physiques des sont fortement liées à leur structure cristallographique et le niveau d'énergie de l'atome ou la molécule du semi-conducteur. Les symétries existantes dans le cristal et l'arrangement spatial et périodique génèrent une structure de bande d'énergie liant les niveaux atomiques. Dans les semi-conducteurs on distingue principalement les deux dernières bandes, la bande de valence et la bande de conduction. Ces deux bandes sont séparées par une bande interdite qui est le gap du semi-conducteur. A température ambiante la bande de valence est quasi pleine d'électrons et la bande de valence est quasi vide avec une faible densité d'électrons occupant le bas de la bande et c'est ces électrons qui sont appelés électrons de conduction et leur lacunes ou vacances dans la bande de valence représentent les trous. La transition radiative d'un électron de conduction vers la bande de valence est une recombinaison qui fait disparaitre une paire électron-trou.

La théorie statistique des porteurs de charge appliquées aux semi-conducteurs conduits à considérer des concepts comme l'existence d'un niveau d'énergie caractéristique du semi-conducteur appelé niveau de Fermi. (Selon la statistique de Fermi Dirac). Dans le cas d'un semi-conducteur pur, le niveau de Fermi se situe exactement au milieu de la bande interdite. Dans le cas où on introduit des éléments impuretés ce niveau décale vers la bande de valence ou la bande de conduction selon le type de l'impureté.



Figure I-(1): Représentation schématique de la structure de bande pour un semi-conducteur

A une température nulle (T= 0 °K) le semi-conducteur se comporte exactement comme un isolant. Tous les électrons occupent la bande de valence et la bande de conduction est vide. Aux températures non nulles, certains électrons de la bande de valence auront assez d'énergie pour passer à la bande de conduction tout en laissant des états vacants donnant ainsi des trous.

L'hors des transitions électroniques entre les niveaux d'énergie la forme des bandes devient importante et ce saut suivant la nature du gap est très importante dans le domaine optoélectronique. On distingue les semi-conducteurs ayant :

- Un gap direct : lorsque le minimum de la BC coïncide avec le sommet de la BV ce qui permet aux électrons qui s'y trouve de transiter de la BC vers la BV sans variation du vecteur d'onde.
- Un gap indirect : lorsque le minimum de la BC ne coïncide pas avec le maximum de la BV donc l'électron doit changer son vecteur d'onde pour qu'il puisse transiter.

Nous verrons par la suite que la nature du gap peut influencer les caractéristiques des cellules solaires.

1-3 : La conduction électrique dans les semi-conducteurs

La conductivité électrique d'un semi-conducteur dépend principalement du nombre de porteurs libres (électron et trous) et leurs distributions spatiales, ces porteurs eux même dépendent du dopage. On produit donc un excès d'électrons en ajoutant des impuretés qui ont 5 électrons de valences (pentavalent), du Phosphore (P¹⁵) en général ou de l'arsenic (As³³). Le cinquième électron est seul ainsi une forte probabilité de se libérer et facilement participé à la conduction. On parle de dopage de type N.

Pour le type P on instruit des impureté qui ont 3 électrons de valence (trivalent) donc on a un vide qui sera combler par une liaison de covalence du semi-conducteur en générant une paire de porteur, l'électron servira à la liaison alors que le troue et quasiment libre.

Ainsi la densité de dopage **n ou p** dépend fortement de la densité des dopant donneur N_D et accepteur N_A

1-4 concentrations des porteurs de charge :

Le remplissage des niveaux électroniques suit la statistique de Fermi-Dirac :

$$f_n(E,T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_f}{k_B T}\right) + 1}$$
 eq-I-(1) - [19]-

k_B représente la constante de Boltzmann et E_F l'énergie du niveau de Fermi,

et
$$f_p(E,T) = 1$$
- $f_n(E,T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_f - E}{k_B T}\right)}$ eq-I-(2)

si Ec -Ef est relativement grand on aura une équivalence de la statistique de Maxwell Boltzmann :

et si $E_f - E_v$ est grand :

$$f_p(E,T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_f - E}{k_B T}\right)} = \exp\left(\frac{E_f - E}{k_B T}\right) \qquad \text{eq-I-(4) -[19]-}$$

Alors on dit que le semi-conducteur est non dégénérer est on pourra calculer la densité des porteur de charge :

$$n = \int_{E_c}^{E_c \max} f_n(E) N_c(E) dE \qquad p = \int_{E_v \min}^{E_v} f_p(E) N_v(E) dE \qquad \text{eq-I-(5) -[19]}$$

Avec $f_n(E)$ et $f_p(E)$ qui représente les probabilités d'occupation d'un état dans la bande de valence pour les électrons et les trous tel que $f_n(E) + f_p(E) = 1$, et Nc [cm⁻³] ainsi que Nv [cm⁻³] représentes respectivement les densités d'états dans la bande de conduction et la bande de valence.

$$n = \int_{E_c}^{E_c \max} f_n(E) N_c(E) dE = \int_{E_c}^{E_c \max} N_c(E) \exp\left(\frac{E - E_f}{k_B T}\right) dE = \int_{E_c}^{E_c \max} N_c(E) \exp\left(\frac{E - Ec + Ec - E_f}{k_B T}\right) dE$$
$$= \exp\left(\frac{Ec - E_f}{k_B T}\right) \int_{E_c}^{E_c \max} N_c(E) \exp\left(\frac{E - Ec}{k_B T}\right) dE \quad \text{ou} \quad \int_{E_c}^{E_c \max} N_c(E) \exp\left(\frac{E - Ec}{k_B T}\right) dE = N_c(T)$$

ou $N_c(T)$ représente la densité équivalente d'état

De la même manière pour p et on obtient :

On intégrant $N_c(T)$ et $N_v(T)$ on obtient :

$$N_{c} = 2 \left(\frac{2\pi k T m_{c}}{h^{2}} \right)^{3/2}$$
 eq-I-(9) -[19]-
$$N_{v} = 2 \left(\frac{2\pi k T m_{v}}{h^{2}} \right)^{3/2}$$
 eq-I-(10) -[19]-

Tel que $(m_c \text{ et } m_v)$ représente la masse effective des électrons et des trous Et avec la loi d'action de masse on peut déduire la densité intrinsèque ni :

$$n * p = N_c N_v \exp \left(\frac{Ec - E_f}{k_B T}\right) \exp \left(\frac{E_f - Ev}{k_B T}\right) = N_c N_v \exp \left(\frac{Ec - Ev}{k_B T}\right) = ni^2$$
$$ni = \left[N_c N_v\right]^{1/2} \exp \left(\frac{Eg}{2k_B T}\right) \qquad \text{eq-I-(11) -[19]-}$$

1 - 5 Calcule de E_f:

• Dans le cas intrinsèque : n = p = ni on a E_f est quasiment au milieu:





On utilisant les équations eq-I-(7) et eq-I-(8):

$$N_{c} \exp \left(\frac{Ec - E_{f}}{k_{B}T}\right) = N_{v} \exp \left(\frac{E_{f} - Ev}{k_{B}T}\right)$$

$$E_{f} = \left(\frac{E_{c} + Ev}{2}\right) + \log\left(\frac{N_{v}}{Nc}\right) = \left(\frac{Eg}{2}\right) + \ln\left(\frac{N_{v}}{Nc}\right)$$

$$N_{v} \propto m_{v}^{3/2} \qquad Nc \propto m_{c}^{3/2} \qquad \left(\frac{N_{v}}{Nc}\right) = \left(\frac{m_{v}}{m_{c}}\right)^{3/2}$$

$$E_{f} = \left(\frac{E_{c} + Ev}{2}\right) + \frac{3}{4}k_{B}T\ln\left(\frac{m_{v}}{m_{c}}\right) \qquad \text{eq-I-(12) -[19]-}$$
Et a T = 0 k : $E_{f} = \left(\frac{Eg}{2}\right) \qquad \text{eq-I-(13) -[19]-}$

• Dans le cas extrinsèque : type p

Dans ce cas de figure $N_A N_D$ ainsi les trous sont les majoritaire et E_f aura une tendance vers la bande de valence.



Figure I-(3): représentation énergétique du niveau E_{fi} et E_{fp} dans un semi-conducteur dopé p On utilisant la loi d'action de masse qui stipule qu'à n'importe quel température n * p =constante quelque se soit le type de dopage -[19]-

donc
$$\mathbf{n} * \mathbf{p} = \mathbf{n_i}^2$$
 avec $\mathbf{n_i}$: la concentration intrinsèque des porteurs eq-I-(14)

Et aussi l'équation de neutralité électrique :

$$n - p + N_A - N_D^+ = 0 \quad \leftrightarrow \quad n + N_A = p + N_D^+. \quad A T = 0 k$$
 eq-I-(15)

Avec N_A^- et N_D^+ sont les nombre d'accepteur et donneur ionisé et À T = 300 k la quasi-totalité des atomes ionisés est égale aux nombre d'impureté introduite -[19]-

Donc les équations eq-I-(14) et eq-I-(16) nous donne :

 $\mathbf{n_i}^2/\mathbf{p} - \mathbf{p} + \mathbf{N_A} - \mathbf{N_D} = 0$ ainsi on aura $-\mathbf{p}^2 + (\mathbf{N_A} - \mathbf{N_D})^*\mathbf{p} + \mathbf{n_i}^2 = \mathbf{0}$ et $N_A - N_D = N_{Ap}$ avec N_{Ap} qui represente les porteur p géneré par N_A

$$p - n = N_{Ap} \implies p = \frac{N_{Ap} \pm \sqrt{N_{Ap}^{2} + 4ni^{2}}}{2}$$
 eq-I-(17) -[19]-

et comme
$$p = N_v(T) \exp \left(\frac{E_f - Ev}{k_B T}\right)$$

on en deduit $E_f = E_{fp} = Ev + k_B T \ln\left(\frac{N_v}{p}\right)$ eq-I-(18) -[19]-

si le dopage est important $N_{Ap} \succ ni$ alors $p \approx N_{Ap} \Longrightarrow E_{fp} = Ev + k_B T \ln \left(\frac{N_v}{N_{Ap}}\right)$ et si $N_{Ap} \approx N_v$ le Semi - conucteur est dit dégénéré car $E_{fn} = E_v$

• Dans le cas extrinsèque : type n

Ici E_f a une tendance vers la bande de conduction



Figure I-(4): représentation énergétique du niveau E_{fi} et E_{fp} dans un semi-conducteur dopé n on utilisant la même méthode avec $N_D - N_A = N_{Dn}$ avec N_{Dn} qui represente les porteur n géneré par N_D

$$n - p = N_{Dn} \implies n = \frac{N_{Dn} \pm \sqrt{N_{Dn}^2 + 4ni^2}}{2}$$
 eq-I-(19) -[19]-

Et en déduit que :

$$E_{fn} = Ec - k_B T \ln\left(\frac{N_c}{n}\right) \qquad \text{eq-I-(20)}$$

si le dopage est important $N_{Dn} \succ ni$ alors $n \approx N_{Dn} \Longrightarrow E_{fn} = Ec - k_B T \ln \left(\frac{N_c}{N_{Dn}}\right)$ et si $N_{Dn} \approx N_c$ le Semi - conucteur est dit dégénéré car $E_{fn} = E_c$

1 - 6 Alignement des niveaux de Fermi l'hors e la mise en contact :

La mise en contact des deux semi-conducteurs dopés N et P provoque automatiquement l'alignement des niveaux de Fermie pour avoir un équilibre énergétique :







deux semi-conducteur de type p te n

Figure I-(6): représentation énergétique des niveaux de Fermi après la mise en contact de

deux semi-conducteur de type p te n

Comme on le voie les niveaux d'énergies ont subis un dénivèlement ce qui engendre une barrière de potentiel **eV** et comme ces derniers dépende du dopage on en déduit que :

$$eV_0 = k_b T \times Ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$
 eq-I-(21) -[19]-

Et

$$E_{fi}(x) = E_f - k_b T \times Ln\left(\frac{n(x)}{n_i}\right) \qquad \text{eq-I-(22)} \quad -[19]-$$

2 - : Jonction PN

La plupart des composants électroniques à semi-conducteurs se basent sur la notion de jonction entre des régions dopées différemment. La jonction se forme dans l'interface séparant deux régions d'un semi-conducteur dopées en N et P.

En pratique, la jonction s'établit en formant par des moyens techniques spéciaux une zone p dans un substrat déjà dopé en N ou inversement, une zone N dans un substrat déjà dopé en P. Les deux régions présentant un gradient de concentration forcent un mécanisme de diffusion naturel qui va établir un équilibre par un réarrangement spatial des porteurs créant une zone de charge d'espace. Ainsi, les trous de la région P diffusent vers la région N et les électrons de la région N diffusent vers la région P. les électrons minoritaires dans la région N se recombinent rapidement avec les trous et il en va de même pour les trous minoritaires qui ont migré vers la région P.



Figure I-(7): Schéma simplifié d'une jonction PN

Toutes les propriétés de la jonction PN dépendent essentiellement du dopage des deux régions N et P. Dans le cas unidimensionnel ou toutes les variables s'écrivent en fonction de la coordonnée x du point. Le potentiel V(x) et le champ électrique E(x) s'expriment en fonction de la densité de charges $\rho(x)$ qui forme l'équation de poisson écrite à une dimension :

$$\Delta \mathbf{V}(\mathbf{x}) = \frac{\partial^2 \mathbf{V}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} = -\frac{\rho(\mathbf{x})}{\varepsilon}$$
 eq-I-(23)

La densité de charge s'écrit $\rho(x) = +e.N_d^+(x) - e.N_a^-(x) - e.n(x) + e.p(x)$ eq-I-(24) Ou $N_d^+(x)$ est la concentration des donneurs ionisés au point x, $N_a^-(x)$ est la concentration des accepteurs ionisés, n(x) et p(x) sont les concentrations des électrons et des trous au point x, - e est la charge de l'électron.

Il est donc clair que l'équation précédente présente une difficulté de traitement et il faut simplifier les paramètres en prenant par exemple le cas d'une jonction abrupte et on considérant que toutes les impuretés sont ionisées et que la zone de charge d'espace est dépourvue de porteurs. La densité de charge s'écrit donc :

$$\rho(x) = \begin{cases} +e.N_a & \text{pour } \mathbf{x}_n > \mathbf{x} > 0 \\ -e.N_a & \text{pour } 0 > \mathbf{x} > \mathbf{x}_p \\ eq.\mathbf{I-(25)} \end{cases}$$

 $Or \, dV(x) = - E(x).dx$

Avec la condition de neutralité électrique qui nous donne :

$$e.N_d.x_n = -e.N_a.x_p \qquad \text{eq-I-(26)}$$

Et on obtient le champ électrique avec les conditions aux limites $E(x_n) = 0$ et $E(x_p) = 0$:

$$E(x) = \begin{cases} \frac{e.N_d}{\varepsilon}.(x - x_n) \text{ pour } x_n > x > 0\\ -\frac{e.N_a}{\varepsilon}.(x - x_p) \text{ pour } 0 > x > x_p \end{cases} \quad \text{eq-I-(27) -[19]-} \end{cases}$$

Avec une valeur maximale du champ électrique au point x = 0, $E_M = E_M = \frac{e \cdot N_d \cdot x_n}{\varepsilon} = -\frac{e \cdot N_a \cdot x_p}{\varepsilon}$ eq-I-(28)

On obtient pour le potentiel électrostatique :

$$V(x) = \begin{cases} -\frac{e.N_d.}{2.\varepsilon} .(\mathbf{x} - \mathbf{x}_n)^2 + \mathbf{V}_n \text{ pour } \mathbf{x}_n > \mathbf{x} > 0\\ \frac{e.N_a.}{2.\varepsilon} .(\mathbf{x} - \mathbf{x}_p)^2 + V_p \text{ pour } 0 > \mathbf{x} > \mathbf{x}_p \end{cases} \quad \text{eq-I-(29)} \quad \text{eq-I-(29)} \quad \text{-[19]-} \end{cases}$$

La barrière de potentiel de la jonction s'écrit $V_d = V_n - V_p = \frac{e \cdot N_d \cdot x_n^2}{2 \cdot \varepsilon} + \frac{e \cdot N_a \cdot x_p^2}{2 \cdot \varepsilon}$. eq-I-(30)

La largeur de la zone de déplétion du coté N s'écrit : $\mathbf{x}_n = \left(\frac{2\varepsilon V_d}{e N_D (1 + \frac{N_D}{N_A})}\right)^{1/2}$ eq-I-(31) -[19]-

Et la largeur de la zone de déplétion du coté P s'écrit : $\mathbf{x}_{p} = \left(\frac{2\varepsilon V_{d}}{e.N_{A}(1+\frac{N_{A}}{N_{D}})}\right)^{1/2}$ **eq-I-(32) -[19]-**

Ce qui donne une largeur de la zone de charge d'espace $\omega = x_n + x_p$ eq-I-(33)

Lorsqu'on polarise la jonction l'équation de Poisson doit tenir compte de la valeur du potentiel composé de la barrière et de la tension appliquée et que la zone de déplétion des deux côtés de la jonction est différente.

On remplace donc dans les relations précédentes l'expression de Vd par Vd-Vapp et les

Expressions de
$$\mathbf{x_n}$$
 par $\mathbf{x_n}^* = \left(\frac{2\varepsilon(V_d - V_{app})}{e.N_D(1 + \frac{N_D}{N_A})}\right)^{1/2}$ eq-I-(34) et $\mathbf{x_p}$ par $\mathbf{x_p}^* = \left(\frac{2\varepsilon(V_d - V_{app})}{e.N_A(1 + \frac{N_A}{N_D})}\right)^{1/2}$ eq-I-(35)

Ceci induit donc que lorsqu'on polarise par une tension positive (Vapp > 0, polarisation directe) la zone de déplétion se rétrécit et lorsqu'on polarise avec une tension négative, (Vapp < 0, polarisation inverse) la zone de déplétion s'élargit.

2-1 variation du Potentiel électrique :





contact

La variation du potentiel dans la ZCE est sous la forme :

$$V(x) \propto \frac{E_{fi}(x)}{-e} + cst$$
 eq-I-(36)

Avec la formule :

$$\vec{E} = -\overline{grad} V \qquad \text{eq-I-(37)}$$

on déduit

$$V(x) = V_T \times Ln\left(\frac{n(x)}{n_i}\right)$$
 eq-I-(38)

Tel que V_T le potentiel thermique qui vaut $k_b T/e$. avec cette expression on peut calculer V_D

$$V_D = V_A - V_B = V_T \times Ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) = V_T \times Ln\left(\frac{p_B}{p_B}\right)$$
 eq-I-(39)

Et d'après la loi d'action de masse

 $\mathbf{eq} - \mathbf{I} - (\mathbf{40}) \qquad \mathbf{n}_A = \frac{n_i^2}{p_A} \quad ; \quad \mathbf{n}_B = \frac{n_i^2}{p_B} \quad \text{ainsi on l'appliquant sur la jonction PN on aura :}$ $V_D = V_T \times Ln\left(\frac{p_B - n_A}{n_i^2}\right) \qquad \mathbf{eq}\text{-I-(41)}$

2 -2 courants de dérive ou courant de saturation:

Le courant de dérive comme son nom l'indique est due par la présence d'une force entrainante dans notre cas c'est le champ électrique E qui va entrainer les porteur minoritaire.

La densité du courant est calculée par la formule suivante :

J = **n** ***q** * **v** = [(**n** * **q**² ***E**)/**m**]***t** =
$$\sigma(t)$$
 * **E** eq-**I**-(42)

Avec n (cm⁻³) qui représente la concentration des particules et $\sigma(t)$ représente la conductivité Et dans un solide, v et représenté par la vitesse moyenne

$$\langle \mathbf{v} \rangle = \frac{q \cdot \mathbf{E} \cdot \langle \mathbf{t} \rangle}{m} = \frac{q \cdot \mathbf{E}}{m} \tau$$
 eq-I-(43)

Où τ est le temps de relaxation, donc dans les Semi-conducteur on aura :

Pour p : $\sigma_p = \frac{p \cdot e^2}{m_p} \tau_p$ et pour n : $\sigma_n = \frac{n \cdot e^2}{m_n} \tau_n$ et on introduisant les notions de mobilité μ (m²/V*s) on obtient : eq-I-(44,45)

$$\mathbf{v}_n = \boldsymbol{\mu}_n * \mathbf{E}$$
 et $\mathbf{v}_p = \boldsymbol{\mu}_p * \mathbf{E}$ eq-I-(46)

Le courant total :

$$J = J_n + J_p = e (n^* \mu_n + p^* \mu_p)$$
 eq-I-(47)

e: représente la charge électrique (1.6e-19 coulant), et on déduit les mobilités :

$$\mu_p = \frac{e \cdot \tau_p}{m_p}$$
 et $\mu_n = \frac{e \cdot \tau_n}{m_n}$ eq-I-(48)

2 - 3 Courant de diffusion :

En présence d'un gradient de concentration électronique $(\vec{\nabla} n \text{ ou } \vec{\nabla} p)$ on parle d'un courant de diffusion \vec{J} qui est contrôlé par la différence de population des porteurs de charge. Cette tendance a égalé ces concentration est régie par la loi de Fick (1D) :

* La première loi de Fick :

Un flux de particule F à travers une surface est proportionnelle au coefficient de diffusion des particule dans la matière a la température de diffusion et de leur concentration C(x,t) en la profondeur et en fonction du temps :

$$F=-D \text{ grad } C(x,t) \qquad \qquad eq-I-(49)$$

Cette loi nous permet de déduire le courant de diffusion total qui est le suivant :

$$\vec{J} = \vec{J_n} + \vec{J_p} \qquad \text{eq-I-(50)}$$

$$\begin{cases} \vec{J_n} = e D_n \vec{\nabla} n \\ \vec{J_p} = -e D_p \vec{\nabla} p \end{cases} \qquad \text{eq-I-(51)}$$

Cas général :

$$\vec{J} = \vec{J_{\text{dérive}}} + \vec{J_{\text{diffusion}}}$$
 eq-I-(52)

2 - 4 Effet de la température T :

L'effet de la température sur les porteurs de charge est très important comme la montre la figure suivante :



Figure I-(9): représentation de l'effet de T sur n et p

Pour les hautes températures (1) la plus par des électrons sont issue de l'intrinsèque.

n ≈ ni

Et pour les températures moyennes (2) les électrons sont issus des impuretés ionisées

$$n \approx N_D = cst$$

Dans les températures basse (3) on a un système a 2 nivaux et

$$\vec{J} = \{ (n \,\mu_n + p \,\mu_p) \vec{E} + \Delta_n \,\vec{\nabla}(n) + \Delta_p \vec{\nabla}(n) \quad \text{eq-I-(53)} \}$$

3 - Jonction pn hors équilibre :

L'hors de la polarisation en direct d'un dispositif a jonction pn, la tension Vapp se retrouve opposé a la tension V_0 aux borne de la ZCE qui correspond au champ électrique de déplétion, ainsi les porteur majoritaire seront favorisé et accroitront le courant de diffusion, alors que le courant I_s de saturation (ou de dérive) reste constant car il dépend peut du champ interne E alors qu'il dépend surtout du nombre de porteur minoritaire arrive a la ZCE.

Dans une polarisation inverse la tension Vapp favorise la tension V_0 ainsi que les porteurs minoritaires alors que les majoritaire seront bloqué ainsi le courant I_s reste toujours inchangé.

Au final la caractéristique I(V) d'une jonction pn polarisé correspond à celle de la diode polarisé :



Figure I-(10): caractéristique I(V) simplifier d'une diode polarisée [3]

La zone (4) correspond au domaine de la cellule solaire et qui sera l'objectif de notre étude 3 - 1 Equation e continuité :

Comme on la vue précédemment, courant total est régie par deux courant interne qui sont le courant de dérive et le courant de diffusion, dans les modèles numériques l'équation général a résoudre d'un courant de particule a travers une surface en 1D est la suivante :

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{e}S(J(x) - J(x + dx)) + GS.dx - RSdx \qquad \text{eq-I-(54)} [19]$$

Avec G et R sont respectivement les taux de générations et de recombinaisons ainsi :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{e.dx}(J(x) - J(x + dx)) + G - R$$
 eq-I-(55)

On en déduit :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{e} \cdot \frac{dJ_n(x)}{dx} + G - R \qquad eq-1-(56)$$

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{1}{e} \cdot \frac{dJ_{p}(x)}{dx} + G - R \qquad \text{eq-I-(57)}$$

En 3D :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{q} \nabla \mathbf{J}_n + G - R \qquad \text{eq-I-(58)}$$
$$\frac{dp}{dt} = -\frac{1}{q} \nabla \mathbf{J}_p + G - R \qquad \text{eq-I-(59)}$$

3 - 2 Phénomène de génération et recombinaison :

Lorsque un courant électrique est générer par excitation optique plusieurs phénomène font que ces porteur se recombine avant d'être collecté, la distance parcourue entre le point de génération et le point de recombinaison est appeler longueur de diffusion L_n équivalant aux libre parcoure moyen.

$$L_n = (D_n \tau_n)^{1/2}$$
 eq-I-(60)
 $L_p = (D_p \tau_p)^{1/2}$ eq-I-(61)

 D_n : est le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires car il ne faut pas oublier que dans le dispositif photovoltaïques la jonction pn est équivalente a une diode polarisé en inverse donc ces les porteur minoritaire qui joue un rôle très important.

On définit le taux de recombinaison des porteur par le paramètre R tel que : $Rtot = R - G_{th}$ avec G : le taux de génération.

3-2-a) Taux de recombinaison volumique :

La longueur de diffusion des porteurs de charge dans le substrat dépend fortement du matériau utilisé et de sa qualité ainsi que de sa mobilité pour les porteur de charge, on utilise se paramétré pour savoir si ce matériaux est Apt pour les cellules solaire, il est exprimé en µm :

$$L_d = \sqrt{\tau \, \mathrm{D}_{\mathrm{np}}} = \sqrt{\mu_{np} \tau \frac{\kappa T}{q}} \qquad \text{eq-I-(62) [4]}$$

On distingue 3 type de recombinaison qui nuis a la longueur de diffusion :

Recombination SRH (Shockley-Read-Hall)

Malheureusement au même titre que les impuretés du dopage créent des niveaux d'énergie dans la BI du semi-conducteur d'autres impuretés peuvent aussi créent des niveaux équivalentes ainsi neutralisé les porteur générer et empêché la création des paire électrons trous, Ces impuretés sont caractérisées leur type et par leur densité N_R donc par la pureté du matériau, leur position E_R dans la BI, leur section efficace des électrons σn et $\sigma p(cm^{-3}.s^{-1})$ Le taux de recombinaison SRH est exprimé par :

$$\mathbf{R}_{srh} = \frac{n.p - n_i^2}{\tau_p(n + n_I) + \tau_n(p + p_I)} \qquad eq-I-(63) \ [4]$$

Avec : τ_n , τ_p sont les durée de vie des porteur de charge

$$\tau_n = \frac{1}{\sigma_p V_{th} N_t} \qquad ; \qquad \tau_p = \frac{1}{\sigma_n V_{th} N_t} \qquad eq-I-(64)$$

L'évolution de la durée de vie des porteurs peut être aussi calculée par référence en fonction de la température ou en fonction de la densité du dopage : $\tau(\mathbf{T}) = \tau_0 \left(\frac{T(K)}{300(K)}\right)^{\alpha}$ eq-I-(65) et

$$\tau(\mathbf{N}) = \tau_0 \left(\frac{N}{N_{ONSET}}\right)^{\alpha} \quad \text{eq-I-(66) ref [18]}$$

Tel que τ_0 est une durée de vie de référence ainsi N_{ONSET} qui est la densité de dopage de référence, et α est un paramètre propre au matériau exemple pour le Si il vaut (-0.5) dans l'équation de la température et (-0.4) ans l'équation sur la densité et N_{ONSET} vaut 1^e+15 cm⁻³ et pour l'InP on prend Et σ_n , σ_p sont les sections efficaces de capture des centres de recombinaison pour les électrons et les trous, V_{th} est la vitesse thermique et N_t est la densité des centres de recombinaison. n_1 et p_1 sont des concentrations dépendant de la position et de l'état du niveau d'énergie de l'impureté.

Les recombinaisons dues au processus Auger :

Ce type de recombinaison est non radiative et lorsque un électron passe de la Bv vers la Bc un autre se situant dans une orbital plus basse peut monter est comblait le trou généré par l'électron précèdent puis généré un trou plus bas ou-il été au pare avant et cela vas entrer la dissipation de la différence d'énergie par thermalisation, ce phénomène augment des que le dopage est important audelà de $1^{e}+17$ cm⁻³. Le taux de recombinaison Auger est exprimé par :

$$R_{aug} = \left(n.p - n_i^{2}\right) \left(n.C_n - p.C_p\right) \qquad \text{eq-I-(67)} \qquad [5]$$

Les recombinaisons dues aux désexcitations radiatives :

Lorsque des électrons ayant absorbé une énergie incidente et la réémis toujours sous forme électromagnétique mais a des longueurs différentes cela ce produit notamment dans les semiconducteur a gap directe.

3-2-b) Recombinaisons surfaciques :

A la surface du matériau il y a une rupture de continuité du réseau cela se traduit par l'apparition des phénomènes surfacique dû aux liaison pendante ou non saturé et induit a des défaut et a la création de piège qui contribue au freinage et à la recombinaison des porteur de charges. On caractérise la recombinaison de surface par sa vitesse et peut être calculé par référence :

$$S(T) = S_0 \left(\frac{T(K)}{300 (K)}\right)^{\alpha} \qquad eq-I-(68) - [12]- [10]$$
$$S(N) = S_0 \left(\frac{N}{N_{ONSET}}\right)^{\alpha} \qquad eq-I-(69) - [12]- [10]$$

Comme dans le cas de la durée de vie des porteur on peut utiliser les valeurs de référence N_{ONSET} et α example : Si : α vaut 0.5 pour la température et 1.0 pour le dopage et N_{ONSET} vaut : $1^{e}+18 \text{ cm}^{3}$

3 – 2 – c) Mobilités des porteurs :

Le paramètre mobilité apparait essentiel dans les équations de transport. Les mobilités sont affectées par différents mécanismes physiques. On tient compte des effets les plus importants qui sont, l'effet de la température, l'effet des impuretés ionisées, l'effet des interactions entre porteurs et l'effet du champ électrique voir la ref [18] ou [12].

3-2-d) Le taux de génération G:

Celui-ci dépend de la profondeur de pénétration (x (cm)) des photons incidents et du coefficient d'absorption $\alpha(\lambda)$ (cm⁻¹) du matériau qui est lui-même dépend de la longueur d'onde du photon incident, dans la théorique ou un photon génère une seul pair électron-trou alors G suit la loi de **Beer-Lambert** :

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda) \cdot N_0(\lambda) exp(-\alpha(\lambda)x) \qquad \text{eq-I-(70)} \quad [3]$$

Ou N_0 représente le nombre de photon incident (cm⁻².s⁻¹)

En suit c'est la zone de déplétion ZCE qui assure la séparation des pairs électrons-trous grâce au champ électrique présent qui vas accélérer les porteur génère au même titre que les porteur minoritaire déjà présent dans le substrat et pourront être collecté par les électrodes de la cellule solaire, voilà pourquoi le courant photovoltaïque I_{ph} est assimilable à un courant s'additionnant au courant de dérive (saturation) et on obtient la densité du courant générer noté J_{ph}. De plus, seule les paires électrons trous qui se forme a proximité de la ZCE participe à la génération du courant I_{ph} car ce qui se forme dans zone dopé n ou p subisse des recombinaient à cause de l'effèt du dopage sur la durée de vie des porteur qui diminue fortement (voir l'eq I-66), et devient trop faible pour que ces dernier puisse migrer vers la ZCE donc on a tout intérêt à avoir la zone émettrice (face sensible) la plus fine possible, aussi la ZCE est très importante en terme de dopage et de largueur, il faut faire en sorte que cette zone de déplétion soit faiblement dopé pour limité le processus de recombinaison Auger et aussi d'avoir cette zone asymétrique qui s'étant vers le substrat et non vers la face émettrice qui sera sur dopé pour atteindre se bute.

Cette asymétrie est représentée mathématiquement comme suit :

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{e}} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right) = W_N + W_P \qquad \text{eq-I-(71)} [3]$$
$$W_N = W \times \frac{N_A}{N_A + N_D} \qquad \text{eq-I-(72)}$$

$$W_P = W \times \frac{N_D}{N_A + N_D} \qquad \text{eq-I-(73)}$$

Ou W représente la largeur de la ZCE, W_N et W_P représente respectivement les longueurs intermédiaire de la ZCE dans la zone de type N et P déduite des équations **I-31** et **I-32**.

Si on néglige les pertes électroniques, l'équation de la densité du courant s'écrit :

$$J = J_0 \left(exp\left(\frac{eV}{k_BT}\right) - 1 \right) - J_{ph} \qquad \text{eq-I-(74)} \quad [3]$$
$$J_{ph} = eG(W + L_N + L_P) \qquad \text{eq-I-(75)}$$

Ou L_N et L_P représente respectivement les longueurs de la zone de proximité dans la zone N et P ou les porteur générer on suffisamment de duré de vie pour migré vers la ZCE et qui dépende aussi du coefficient de diffusion du matériau tel que :

$$L_{N=}\sqrt{D_n \tau_n}$$
 eq-I-(76)
 $L_P = \sqrt{D_p \tau_p}$ eq-I-(77)

Dans le cas réel en tenant compte des pertes électroniques l'équation du courant génère par la cellule solaire devient :

$$I = I_{ph} - I_0 exp\left(\frac{e(V+R_sI)}{nk_BT} - 1\right) - \frac{V+R_sI}{R_{sh}} \qquad \text{eq-I-(78) [3]}$$

Ou \mathbf{R}_{S} et \mathbf{R}_{sh} représente les résistances de série et parallèle (ou shunt), ces dernière modélise les courant de fuite, les chute de tension et le facteur de tension qui correspond a la dimension de la tension maximal \mathbf{Vg} fournie au borne de la jonction pn, et \mathbf{n} est le facteur d'idéalité qui tient compte des phénomène de recombinaison, garce a cette formule on peut obtenir le schéma électrique équivalent de la cellule solaire lorsqu'elle est exposé a un rayonnement :



Figure I-(11): Schéma équivalent électrique de la cellule solaire on mode générateur [3]

4 – Cellule solaire conventionnelle

La cellule solaire est le dispositif le plus simple des composants semi-conducteurs. Il est composé d'une simple jonction PN soit conçu à base d'un substrat P ou N. Le principe de la cellule solaire est de convertir le rayonnement du soleil en un courant électrique qu'on récupère à la sortie du dispositif. La génération des paires électrons-trous par l'absorption de la lumière est possible si le matériau a un gap (de l'ordre de 1.12 eV pour le silicium) permettant aux photons lumineux d'exciter les électrons de la bande de valence pour une transition directe ou indirecte vers la bande de conduction. Pour toute transition il y a création de paires électron-trous ou la conduction est assurée par ces deux porteurs. Ces porteurs libres photo-générés doivent être collectés sans perte par les contacts extérieurs pour récupérer un courant le plus élevé possible.

Une cellule solaire est donc caractérisée principalement par le rendement de conversion qui est calculé par le rapport de la puissance maximale que délivre la cellule sur la puissance de la lumière incidente.

4-1 : Structure élémentaire

La figure suivante représente un schéma descriptif d'une structure élémentaire d'une cellule solaire à une seule jonction faite sur un substrat de type P. Le schéma équivalent est donc simplement une diode exposée au soleil qui génère un courant dans le sens inverse du sens de conduction de la diode.



Contacts face arrière

Figure I-(12): Structure conventionnelle d'une cellule solaire

On distingue principalement dans la cellule solaire les éléments suivants :

- Le substrat : est le semi-conducteur de base qui forme le matériau support de la cellule sur lequel on conçoit la jonction par le dopage d'une fine couche sur la partie avant. L'épaisseur du substrat est autour de quelques centaines de µm (100 300 µm) et de surface circulaire ou carré autour de 100 cm².
- La Jonction PN : Sur le substrat on dope une fine couche (0.1 à 2 µm) inversement par rapport au substrat pour former la jonction PN qui va servir fondamentalement à créer une zone de charge d'espace et permettre la collecte des porteurs générés vers les contacts.
- La couche antireflet : A la surface de la face avant de la cellule on dépose une couche antireflet sur quelques fractions du µm qui va servir à réduire les réflexions de la lumière et permettre d'améliorer l'absorption du rayonnement solaire et donc augmenter le nombre de porteurs générés.
- Les contacts métalliques : Un contact arrière (cathode) est déposé uniformément sur la face arrière et un contact avant (anode) est dépose sous forme d'une grille occupant un espace le plus réduit possible pour laisser la lumière passer vers la cellule.

4-2 : Principe de conversion de lumière en courant électrique :

Quand une cellule exposée à un flux lumineux, les photons sont absorbés si leurs énergie ($E_{ph} = hv$) est supérieure à la largeur de la bande interdite (E_g). Ceci correspond à l'énergie nécessaire que doit absorber l'électron afin qu'il puisse transiter vers de la bande de valence vers la bande de conduction, le rendant ainsi mobile et capable de générer un courant électrique. L'existence de la bande interdite entraîne l'existence d'un seuil d'absorption tel que $hv_0 = E_g$, lors de l'absorption d'un photon.

La collecte des porteurs se fait uniquement par la jonction qui génère un champ électrique qui repousse les porteurs vers les bords de la ZCE et la technologie de conception de la jonction sur le substrat caractérise tous les paramètres qui influent cette collecte et donc sur le rendement de conversion. Dans ce processus de transition, deux mécanismes interviennent simultanément :

- Il y a création de porteurs minoritaires, c'est-à-dire des électrons dans la région P et des trous dans la région N. Ceux-ci sont susceptibles d'atteindre la ZCE par diffusion et d'être ensuite propulsés vers des zones où ils sont majoritaires. En effet, une fois dans la ZCE, la polarisation étant inverse, on favorise le passage des minoritaires vers leur zone de prédilection. Ces porteurs contribuent ainsi à créer le courant de diffusion.
- Il y a génération de pairs électrons trou dans la ZCE, qui se dissocient sous l'action du champ électrique, l'électron rejoignant la zone N, le trou la zone P. Ce courant s'appelle le courant de transit ou photo courant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour créer la photo courant I_{ph} qui s'additionne au courant inverse de la jonction.

4-3 : Caractéristiques principales d'une cellule solaire *a) La caractéristique courant-tension :*

On utilisant l'équation (eq-I-78) on peut déduire la caractéristique J(V) :



Figure I-(13): caractéristique J(V) d'une cellule solaire (mode générateur dans la zone (4) de la caractéristique d'une diode polarisé). [3]- L'allure de la caractéristique dépend notamment des deux résistances Rs et Rsh tel que si on a la Rs très faible voire nul et Rsh très grand on aura l'allure idéale.

Les paramètres importants qui caractérisent la cellule solaire sont :

- Jcc : la densité du courant du court-circuit pour une tension V nulle .

- Voc : la tension du circuit ouvert pour une densité du courant nulle

Ces deux valeurs représente les valeurs idéales, et le paramètre prépondérant qui agit sur Jcc et Voc est l'énergie du gap Eg d'après la règle eVoc ≈ 0.5 Eg plus Eg est grand plus Voc augment et pour Jcc il va diminuer a partie de Eg ≈ 2 eV car le nombre de photon diminue dans le spectre solaire.

La réponse principale d'une cellule solaire est le réseau de caractéristiques couranttension I(V) qui permet de déduire l'ensemble des autres caractéristiques. Cette caractéristique nous renseigne essentiellement sur le point de fonctionnement donnant une puissance maximale et d'en déduire le rendement de conversion.

d) Facteur de forme

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore et peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée V_m . I_m et la puissance idéale V_{co} . I_{cc}, on le note : $FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}}$ eq-I-(79)

e) Rendement de conversion

Le rendement de conversion est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P₀. On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P₀: $\eta = \frac{V_m I_m}{P_0} = FF \frac{V_{co} I_{cc}}{P_0}$ eq-I-(80)

Chapitre II

Modélisation et simulation des cellules solaires

Dans ce chapitre nous exposerons le formalisme mathématique qui permet de comprendre les simulations numériques utilisées dans la plupart des codes de calculs. Les phénomènes de transport des porteurs libres dans différentes régions du semi-conducteur sont décrits par un système d'équations très complexe du fait que les coefficients des équations sont liés à des paramètres physiques divers et surtout dépendants et liés. Les modèles donc sont relativement complexes et nécessitent une étude particulière. Des approximations pour arrondir le système d'équations en un système relativement bien conditionné pour l'analyse numérique s'avère obligatoire. La première approche d'approximation est de prendre une seule dimension pour étudier le transport des porteurs le long de la profondeur du dispositif ou sera généré le courant de sortie.

I – Traitement numériques des équations de transport

La résolution numérique du système d'équations composé de l'équation de Poisson et des équations de continuité doit passer par des simplifications des expressions à travers les coefficients intervenant dans les équations. En premier lieu, les équations seront prises à une dimension (x) ou toutes les variables et tous les coefficients sont pris suivant cette dimension. En deuxième lieu, il s'agit de considérer que le cas stationnaire c.a.d ne pas tenir compte des variations temporelles. Nous précisons aussi que la mise en forme de ces équations est relative à ce qui se fait dans le code de calcul qui sera utilisé par la suite.

On remarque que les paramètres les plus dominants dans les équations sont : - le profil du dopage, - les termes de génération-recombinaison, - les mobilités et les durées de vie des porteurs.

L'équation de Poisson et les deux équations de continuités des porteurs de charges donnent un système d'équations non linéaire de type elliptique, mal conditionné et très complexe à travers les modèles utilisés pour les différents paramètres. Analytiquement il est impossible de les résoudre et numériquement il faut avant tout simplifier au fur et à mesure en tenant compte des aspects fondamentaux du dispositif pour que la simplification n'altère pas les caractéristiques du dispositif.

1 - : Discrétisation spatiale

Le système d'équations précédant doit être résolu dans un domaine spatial relevé de la structure réelle. On associe donc une structure de simulation définie par un domaine Ω limité par une frontière Γ . Les équations de transports seront écrites dans ce domaine. Une méthode de discrétisation des équations sera appliquée pour le passage du système continu au système discret avec les conditions aux frontières Γ .

Les méthodes de discrétisation dépendent essentiellement du maillage spatial. On cite la méthode des éléments finies, la méthode des différences finies et la méthode des volumes finis.

Le maillage doit être non uniforme pour tenir compte des variations non uniformes des paramètres des équations.

2 - : Linéarisation et résolution du système d'équation

La plupart des codes normalisent les équations par rapport à des grandeurs standard pour ne pas traiter des variables de grandes valeurs numériques et pour relativiser surtout leurs variations. Dans le cas unidimensionnel ces équations normalisées s'écrivent : [8]- [10]-

$$\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} + \lambda^2 \left\{ p(x) - n(x) + \left(N_d - N_a \right)(x) \right\} = 0 \qquad \text{eq-II-(2)}$$

$$\frac{\partial \mathbf{n}(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{J}_n^{(x)}(x,t)}{\partial x} - (\mathbf{R} - \mathbf{G})(x,t)$$
 eq-II-(3)

$$\mathbf{J}_{\mathbf{n}}^{x}(x,t) = \mathbf{D}_{\mathbf{n}}(x,t) \cdot \frac{\partial \mathbf{n}(x,t)}{\partial x} - \boldsymbol{\mu}_{\mathbf{n}}(x,t) \cdot \mathbf{n}(x,t) \cdot \frac{\partial \boldsymbol{\psi}(x,t)}{\partial x} \quad \text{eq-II-(4)}$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{J}_{\mathbf{p}}^{x}(x,t)}{\partial x} - (\mathbf{R} - \mathbf{G})(x,t) \qquad \text{eq-II-(5)}$$

$$\mathbf{J}_{\mathbf{p}}^{x}(x,t) = \mathbf{D}_{\mathbf{p}}(x,t) \cdot \frac{\partial \mathbf{p}(x,t)}{\partial x} + \mu_{\mathbf{p}}(x,t) \cdot \mathbf{p}(x,t) \cdot \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial x} \qquad \mathbf{eq-II-(6)}$$

Ces équations ont comme inconnues le potentiel électrostatique et les concentrations des électrons et des trous en fonction desquelles d'autres grandeurs s'écrivent.

Les étapes de discrétisation mènent progressivement à des systèmes d'équations de type A.X = B ou A et B sont généralement des matrices géantes à éléments en matrice et sous matrices.

Les inconnues de ce système sont : Le potentiel électrostatique V(x), la concentration des électrons n(x) et la concentration des trous p(x) dans le cas stationnaire. Tout autre paramètre du dispositif peut être calculé à partir de ces trois inconnues. Par exemple la distribution du champ électrique, les densités de courant et le courant de sortie qui se calcul par l'intégration des densités de courant.

Toute méthode itérative de résolution du système A = B repose sur la décomposition de A, tel que A = D - L - U ou D est la diagonale de A, L est la matrice triangulaire inférieure stricte extraite de A et U est la matrice triangulaire supérieure stricte extraite de A.

A partir d'une solution initiale X^0 (construit soigneusement à partir du profil du dopage) la méthode itérative évoluera vers une solution finale X si le processus est convergent.

3 – Code de calcul PC-1D: (https://www.engineering.unsw.edu.au/energyengineering/research/software-data-links/pc1d-software-for-modelling-a-solar-cell)

Dans ce travail nous avons opté pour l'utilisation du code de calcul cité dans plusieurs références bibliographiques dans le domaine de la simulation des cellules solaires que ce soit au silicium ou en couches minces.

3 – 1 : Présentation générale

Plusieurs programme numérique sont capable de résoudre les équations a base des semiconducteur peut être utilisé pour modélisé les cellules solaire et PC1D en fait partie, ce dernier Possède une réputation internationale dans la recherche photovoltaïque, développé par Paul basore a l'université «New South Wales de Sydney» en Australie et c'est l'un des pionniers dans ce domaine.



Figure II-(1) : fenêtre du logiciel PC1D

PC1D repose sur tout ce que nous avons décrit dans les parties précédentes, il résout numériquement les équations de transport à une seule dimension en utilisant un réseau de discrétisation spatiale en éléments finis, il offre surtout la possibilité d'examiner une large gamme de paramètres physiques liés à l'architecture du dispositif.

Ainsi beaucoup de travaux peuvent donc faire l'objet d'étude lorsqu'on l'exploite dans le fond. Pour le cas des cellules solaire, il dispose surtout d'un mode de calcul permettant de scanner rapidement différents points de fonctionnement pour tracé la caractéristique I(V) et en déduire rapidement le rendement de conversion et la puissance maximale débitée par la cellule. Contrairement à d'autres logiciels comme SILVACO. PC1D trouve son utilité surtout dans son interface graphique très souple qui permet de contrôler soigneusement et efficacement l'architecture physique et l'ensemble des paramètres physiques en toute simplicité. Il permet de simuler n'importe qu'elle structure photovoltaïque, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en jouant sur les paramètres variables. Les résultats de la simulation sont très proches des résultats expérimentaux, donc c'est un gain de temps et d'argent, de plus PC1D possède une licence gratuite et accessible à tout le monde.

La fenêtre active dispose des outils :

- Device : qui nous permet de préciser le design de l'architecture en donnant la géométrie : la surface, la texturation, la réflectance (perte du spectre incident) la résistance des contacts et la résistance série (shunt)...etc.
- Région : qui nous permet d'imposé les propriétés physiques du matériau semi-conducteur comme : l'épaisseur, le type de matériaux, le gap, la mobilité, le type et le taux de dopage du substrat et même des régions a l'intérieur on spécifiant l'épaisseur, la répartition et la position a sur dopé ...etc. on peut aussi augmenter le nombre de régions principal
- Excitation : qui permet de préciser la température, le nombre de point d'échantillon, la polarisation du circuit, le mode et l'intensité d'éclairement de la cellule ainsi que le type du spectre a utilisé et d'autre part d'opérer à une simulation pour différent points de fonctionnements.

- Résultats : qui donne le courant de court-circuit, la puissance optimal et le tension du circuit-ouvert.
- Une représentation de la cellule a une dimension qui varier dans le sens de la profondeur.

- Aussi il dispose d'une barre de tâche qui rassemble toutes les options précédentes et même d'autre outils qui approfondie les paramètres lier a la cellule et notamment l'exécution de la simulation, faire varier jusqu'à 4 paramètres en même temps, aussi les outputs qui sont très riche en information et nous donne beaucoup de détails à travers un mode graphique sous forme de courbes ou à travers l'extraction des valeurs numériques. Ces graphs concernent principalement :

- Les distributions spatiales : des profils de dopages utilisés, des électrons et des trous, du potentiel électrostatique, du champ électrique, de la densité de charge d'espace, des densités de courant, des termes de génération recombinaison, des mobilités des porteurs etc....
- Les distributions temporelles : du courant de base, de la tension de base, de la caractéristique I(V) du dispositif

3-2 Exemple de caractéristiques d'une cellule solaire standard :

Pour illustrer les caractéristiques d'une cellule solaire au silicium nous prenons un cas d'une cellule standard prise comme référence dans pc1d. Il s'agit d'une cellule solaire avec les paramètres suivants :

- Substrat silicium : surface avant 100 cm², épaisseur 300 μ m, dopé en P uniformément avec une concentration N_a = 1,5.10¹⁶ cm⁻³, gap 1.124 eV, constante diélectrique 11.9, concentration intrinsèque de 10¹⁰ cm⁻³
- On dope en N par diffusion la face avant avec une concentration à la surface de $N_d=2,87.10^{20}$ cm⁻³ qui donne un profil de fonction erreur complémentaire, la profondeur de jonction dans ce cas est de l'ordre de 0,3 µm

- Une couche de texture de 2 μm

Le profil du dopage de la jonction est illustré sur la figure suivante :



Figure II-(2) : Profil du dopage de la jonction PN de la cellule

Sur la figure on représente le dopage effectif (Nd-Na) en valeur absolu. On vérifie clairement sur le graphe les valeurs des paramètres de la jonction décrit précédemment.

Une série de polarisations directe et inverse de la cellule donne la caractéristique courant tension de la cellule. On distingue les deux cas suivant que la cellule est sous éclairement ou en obscurité.

En obscurité on obtient :



Figure II-(3) : Caractéristique de la cellule de substrat N en obscurité

La caractéristique obtenue est conforme à celle prévue par une simple diode à jonction PN. On remarque que les courants inverses sont relativement importants et cela s'explique par le dopage du substrat qui est relativement élevé.
Lorsqu'on éclaire la cellule avec un rayonnement solaire de puissance de 1000 W/m2 la caractéristique I(V) est comme suit :



Figure II-(4) : Caractéristique de la cellule de substrat N et sous éclairement

A partir de cette caractéristique courant-tension nous déterminons les autres paramètres de la cellule :

- La puissance maximale : 1.359 W
- Le courant de court-circuit : Icc = -3.17 A
- Le courant de puissance max : Im = -3 A
- La tension de puissance max : Vm = +0.45 V
- La tension de circuit ouvert : Voc = +0.5920 V
- Le rendement de conversion = puissance maximale / puissance d'éclairement

= 13.59 %

Si on utilise le substrat silicium dopé en N sur lequel on diffuse de la même manière une couche P avec une concentration en surface de $2,87.10^{20}$ cm⁻³ on obtient la caractéristique I(V) sous éclairement de 1000 W/m² :



Figure II-(5) : Caractéristique de la cellule de substrat P sous éclairement

On remarque que le courant est positif alors que les tensions donnant la puissance max est négative, à l'inverse complètement du cas du substrat N. Les autres caractéristiques sont :

- La puissance max : 1.331 W
- Le courant de court-circuit : Icc = +3.077 A
- La tension de circuit ouvert : Voc = -0.5963 V
- Le rendement de conversion = puissance maximale / puissance d'éclairement

= 13.31 %

Par rapport à la cellule du substrat N une légère différence est apparente dans le Icc, le Voc et le rendement

II - Etude et optimisation par simulation numérique des caractéristiques d'une cellule solaire :

1 – Effet de la structure physique d'une cellule solaire :

Nous proposons dans cette partie d'étudier par simulation unidimensionnelle les variations des principaux paramètres de la cellule solaire. Nous entamerons en premier lieu les effets de l'architecture à savoir le substrat et l'émetteur en ciblant surtout l'effet du dopage de ces régions. Nous comparerons nos résultats sur deux cas de cellules solaires, celle conçue à base du silicium monocristallin et celle conçue à base du matériau binaire de type III-V constitué d'indium et de phosphore utilisé en micro-électronique, le phosphure d'indium InP qui est un semi-conducteur à gap direct dont les porteurs ont de fortes mobilités.

1-1 Cas d'une cellule à base du Silicium :

Nous résumons l'ensemble des données utilisées pour la simulation d'une cellule à base du silicium monocristallin avec les paramètres suivants :

- Substrat : Silicium dopé P avec une concentration de 1.5 10^{16} cm⁻³. On donne aussi ; La surface active 100 cm² avec une couche antireflet de 2 µm. La constante diélectrique relative 11.9, le Gap 1.124 eV ; Concentration intrinsèque 10^{10} cm⁻³ ; le coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde pris selon les donnée [10], [12] ; les durées de vie intervenant dans les termes de recombinaison volumique $\tau_n = \tau_p = 7.2$ µs et dans les termes de recombinaison en surface on donne les vitesses de recombinaison S_n = S_p = 10^6 cm/s
- Le profil de la jonction est pris selon une fonction d'erreur complémentaire avec un facteur d'ajustement permettant d'atteindre une profondeur de la jonction et donc limiter l'émetteur de la cellule à une certaine profondeur contrôlée. Pour le cas d'une diffusion avec une concentration de surface de 2.87 10²⁰ cm⁻³ le profil ajusté avec un paramètre de 0.105 donne une profondeur de jonction de 0.3 µm
- Les autres détails de la cellule donnée en référence par PC1D concernent la réflectance externe prise à 10 %; les pertes volumiques dans le substrat exprimée en conductance et les pertes surfacique sur la face avant et la face arrière sur les contacts métalliques sont aussi prises en compte dans le modèle avec des valeurs respectivement de 0.3 siemens et 0.015 Ω.

Nous exposons la cellule à un éclairement normalisé AM1.5 PC1D de puissance de 1000 W/m² et le code balaye un ensemble de polarisation directes et inverse allant de +0.8 à -0.8 sur 16 intervalles.

En gardant ces paramètres, on fait varier seulement la concentration du substrat dans la gamme des dopages utilisés dans les cellules solaires.

On note que les substrats destinés aux cellules solaires ont en général des résistivités faibles et on parle parfois de silicium grade solaire. Donc pour différentes concentrations du substrat la caractéristique I(V) varie comme suit :



Figure II-(6) : Variation de la caractéristique I(V) en fonction du dopage du substrat Nous observons donc que le substrat influe sur les caractéristiques à travers les paramètres qui dépendent du dopage. Les variations touchent beaucoup plus le courant de court-circuit qui indique que les porteurs générés subissent des recombinaisons fortes lorsque le substrat est fortement dopé (ne dépassant pas 10^{19} cm-3) pour ne pas atteindre, dans le cas des paramètres physiques utilisés, la dégénéréssance total ou les calculs divergent vu qu'on se situe en régime de très forte injection. Les autres caractéristiques déduites des courbes I (V) sont données sur les graphs de la **figure III-2** ou nous observons concrètement que le dopage du substrat présente des fluctuations importantes du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert. Les trois caractéristiques présentent des valeurs optimales pour une concentration du dopage autour de 1.51 10^{17} cm⁻³ donnant un rendement autour de 14 %. Ces fluctuations s'expliquent aussi par le fait que le dopage du substrat influe directement sur l'émetteur et sur la jonction et donc l'architecture émetteursubstrat est dépendante du dopage du substrat directement.



Figure II-(7) : Variation du courant Icc, de la tension Voc et du rendement en fonction du dopage du substrat

1 – 1 – 1 : Effet de l'émetteur

L'émetteur d'une cellule solaire est la région la plus sensible vu qu'il forme la jonction elle-même. Les caractéristiques extraites des simulation en prenant les paramètres décrits dans le paragraphe 1 – 1 en ajustant juste le dopage du substrat pour être dans la zone des valeurs optimales du rendement de 14.15 % pour une concentration de la base de 10^{17} cm⁻³.

Il est important de noter qu'il est difficile de faire varier un seul paramètre pour maitriser la géométrie et les caractéristiques de l'émetteur. Nous donnons sur la figure suivante les effets sur la caractéristique I(V) en faisant varier le profil du dopage de la jonction en gardant la profondeur de l'émetteur fixe.



Figure II-(8) : Variation de la caractéristique I(V) en fonction du dopage de l'émetteur

On observe une très faible fluctuation des caractéristiques I(V) lorsqu'on modifie uniquement le dopage de l'émetteur mais sur la même profondeur de jonction qui et de l'ordre de 0.26 µm. donc, c'est bien le dopage du substrat qui influe considérablement. Les effets sur le court-circuit, Icc, sur la tension Voc et sur le rendement sont illustrés sur les figures suivantes.



Bien que ces grandeurs sont liées aux caractéristiques I(V) qui ne sont pas très modifiées le zoom sur les valeurs de courant Icc fait apparaître des chutes pour les forts dopages, cela explique que par le fait que les porteurs photo-générés subissent de fortes recombinaisons dues aux forts dopages. Pour la tension Voc, une forte augmentation s'observe en fonction du dopage de l'émetteur et devient presque fixe ce qui s'observe aussi sur les courbes I(V). Ceci est évident du fait que cette tension dépend essentiellement du dopage des régions de la jonction.

Le rendement varie aussi autour d'une valeur optimale et évidement pour les forts dopages les recombinaisons sont la cause de la diminution et pour les très faibles dopages la collecte des porteurs n'est pas importante du fait que la ZCE est très réduite ainsi que le champ électrique qui s'affaiblit en intensité.

L'épaisseur de l'émetteur est aussi un paramètre géométrique qui peut directement influencer les caractéristiques du fait que la ZCE de la jonction étant toute prête de la surface de la cellule ou au fond la collecte des porteurs est différente.



Figure II-(10) : Variation de la caractéristique I(V) en fonction de la profondeur de l'émetteur Les variations de la caractéristique I(V) sont principalement au niveau du courant Icc, pour des profondeurs importantes de l'émetteur il est clair que la ZCE s'éloigne de la surface via même une couche du substrat et donc génère des recombinaisons avant la collecte des porteurs. La tension Voc reste pratiquement la même autour de 0.6 V ce qui est dû au fait que même la jonction s'éloigne de la surface la tension est seulement fonction des dopages des régions de la jonction. L'examen du courant Icc, de la tension Voc et du rendement est illustré sur la figure suivante.



Figure II-(11) : Variation du courant Icc, de la tension Voc et du rendement en fonction de la profondeur de l'émetteur

D'après ces courbes on remarque que les variations de la tension Voc sont faibles allant de 0.6 V à 0.62 V malgré la courbure du graph, par contre pour le courant Icc chute de 3.2 A 2.3 A approximativement ce qui correspond aux courbes des caractéristiques I(V). Ces variations du courant affectent donc le rendement et la chute du rendement est aussi importante de 14 % à 11 % et cela s'explique évidement par la perte de courant.

A travers ces résultats nous pouvons conclure pour un meilleur rendement la cellule solaire doit être soigneusement optimisée en fonction des dopages des régions en premier lieu et aussi un soin très attentif doit être donné à la région de l'émetteur.

1 - 1 - 2: Effets des pertes volumiques et surfaciques

Le substrat étant volumineux et l'ensemble des pertes représentées par une résistance parallèle influent automatiquement sur les caractéristiques. Pour différentes valeurs utilisées les figures suivantes illustrent les effets sur les caractéristiques I(V).



Figure II-(12) : Variation de la caractéristique I(V) en fonction de la conductance (résistance) de shunt

On observe sur ces courbes que le courant Icc et la tension Voc peuvent être considérés constants même s'ils présentent de très petites variations par contre le point de fonctionnement donnant la puissance max est variable ce qui est expliqué par le fait que les porteurs générés subissent surtout une perte par effet ohmique dans le volume et non liée aux recombinaisons de volume. Comme le point de puissance maximale est fluctué par ces pertes ohmiques le rendement est automatiquement réduit comme illustre la figure suivante.

La réflexion de la lumière sur la face avant de la cellule solaire joue un rôle important du fait que les réflexions causent une perte du rayonnement et donc l'énergie transmise à la structure est diminuée ce qui fait chuter le nombre de porteurs générés par conséquent le rendement diminue fortement L'effet de la réflectance est très important car c'est elle qui décide de l'intensité qui atteint la face émettrice. Les caractéristiques I(V) calculées pour différentes valeurs du taux de réflexion est illustré sur la figure III-8 qui suit.



Figure II-(13) : Variation de la caractéristique I(V) en fonction du taux de réflexion de la face de l'émetteur

Les courbes de cette figure nous précisent clairement que le courant photo généré est beaucoup réduit à cause des réflexions, on vérifie donc facilement que c'est dû à la perte du rayonnement réduisant la génération de porteurs. Ces pertes de rayonnement sont réduites par la couche antireflet qui est conçue par des couches minces de matériaux avec des indices de réfraction convenables avec une texture en générale pyramidale qui guide les rayons réfléchis vers la cellule au lieu de les perdre. Dans le cas du Silicium on utilise une couche antireflet avec l'oxyde de silicium poreux en jouant sur une texture de motif pyramidal on réduit les réflexion à l'ordre de 3.5 % [2]

Les courbes précédentes nous donnent aussi que la tension Voc reste constante et le point de fonctionnement de puissance maximale est aussi glissé vers les faibles valeurs ce qui réduit le rendement, chose qu'on confirme bien avec la courbe suivante.



Figure II-(14) : Variation du courant de du rendement en fonction du taux de réflexion de la face de l'émetteur

On peut dire correctement qu'en plus du fait que l'émetteur est une région très sensible d'un point de vue architecture et propriétés la face exposée directement à la lumière doit aussi être recouverte d'une couche antireflet bien adaptée pour un meilleur rendement.

Les deux surfaces de contact métallique de la base et de l'émetteur provoquent des defaults qui piègent les porteurs par recombinaison et le paramètre physique qui est prépondérant est la vitesse de recombinaison. Ce processus touche directement les porteurs minoritaires du substrat et les courbes des caractéristiques I(V) de la figure suivante montrent clairement ces effets.





D'après ces courbes on montre que le courant Icc diminue pour de grandes vitesse de recombinaison, ce qui correspond bien à la situation des porteurs minoritaires qui se recombinent très lentement donnant ainsi un fort courant Icc qui est du principalement aux porteurs minoritaires. On remarque aussi que la tension Voc est presque constante et le point de puissance maximale fluctue suivant le glissement de la caractéristique suivant Icc ce qui donne un effet apparent sur le rendement qui est bien illustré sur la figure suivante.



Figure II-(16) : Variation du rendement en fonction de la vitesse de recombinaison en surface des minoritaires

On remarque que le rendement diminuant avec la vitesse de recombinaison est dû à la perte des porteurs minoritaires par recombinaison. Il est donc important que lorsqu'on conçoit la cellule solaire il est indispensable de maintenir les surfaces avec des qualités qui ne dégradent par les effets de recombinaison.

1-2 Cas d'une cellule à base de l'InP :

Le matériau InP (Le phosphore d'Indium) est un semi-conducteur binaire III-V de structure de type Zinc Blende ayant un gap direct de 1.34 eV. La mobilité des électrons est autour de $5.4 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{V/s}$ et celle des trous est autour de $1.3 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{V/s}$ et une forte résistance aux tensions élevées rendent ce matériau intéressant dans les composants optoélectroniques. On note que l'ensemble de ces simulations sont faites pour pouvoir faire surtout des comparaisons sur différents aspects technologiques de la cellule solaire et permettre d'introduire par la suite des couches de revêtements externes pour modifier le spectre spécialement dans des zones de longueurs d'ondes plus rentables pour la cellule.

L'architecture prise pour la simulation est pratiquement la même que celle prise au paragraphe 1 - 1 du cas de la cellule au silicium avec des modifications concernant le substrat qui est de l'InP (le code utilise la base de données des paramètres physiques de l'InP), mais la durée de vie des porteur minoritaire est très faible (quelque nano seconde) comme dans la plupart des matériaux III-V on a pris le substrat de type n car dans ce cas la durée de vie des minoritaire peuvent atteindre 3 us a une concentration de 10^{14} cm⁻³ [19]- [20]-

Après plusieurs calculs on trouve que certaines valeurs des paramètres peuvent être changées ou on obtient des rendements meilleurs. En signalant que le cadre de ce mémoire ne permet pas de trop approfondir dans l'aspect physique du matériau pour une analyse poussée dans les calculs et les conclusions.



Figure II-(17) : Caractéristiques I(V) de deux cellules au silicium et à l'InP

La figure nous renseigne clairement que le matériau joue un rôle essentiel dans les caractéristiques de sortie de la cellule. Les deux courbes donnent des points de fonctionnements de puissance maximale très différents, des valeurs différentes de la tension Voc (0.6 V pour le silicium et 0.9 V pour l'InP), des courants Icc pas très différents (3.2 A pour le silicium et 2.9 A pour l'InP).

le rendement est meilleur pour la cellule à l'InP prenant une valeur de 20.93 % comparée à celle de la cellule au silicium avec un rendement de 14.15 %.

Les facteurs touchant la caractéristique I(V) des deux matériaux sont liés à plusieurs paramètres physiques et principalement aux mobilités. La figure suivante illustre clairement les variations des mobilités du Si et de l'InP.



Figure II-(18) :: Distribution des mobilités des porteurs dans les deux matériaux Si et InP Nous pouvons conclure que l'utilisation de ce matériau donne plus d'avantages dans les caractéristiques de la cellule en notant que les effets étudiés plus haut pour le cas de la cellule au silicium ont les mêmes tendances globalement. L'effet sur les porteurs de charge de l'InP apparait surtout par les mobilités des électrons et des trous qui sont relativement plus importantes que dans le silicium.

2 - Model théorique optimisé de cellule à base de Si et InP :

On optimisant les paramètres précèdent on peut aboutir a des résultats optimaux des performances des deux cellules Si et InP déplus on les simulant sous un spectre AM1.5G fournie par Nrel (Voir la figure IV-1) mais nous allons nous limité à 962 W/m2 après adaptation du spectre pour PC1D ainsi on obtient les résultats dans les figure (III-15) et le tableau III-1

La figure suivante II-(19) représente les paramètres essentiels des deux cellules :







Figure II-(20) : Caractéristique de la cellule à base de Si et d'InP sous spectre Obscurité, Corps noir a 5500 K et AM1.5G.

Si	Voc	Icc	Popt	Pmax	FF	Rendement
Obscurité	-3,37E-12	1,01E-12	1,11E-13	-3,40E-24	-3,26E+10	
Corps noir (5500K)	0,6162	-3,181	1,539	-1,96013	-0,78515	15.39%
AM1.5G	0,617	-3,279	1,593	-2,02314	-0,78739	15.93%
InP						
Obscurité	-1,36E-12	1,36E-14	6,91E-13	-1,86E-26	-3,72E+13	
Corps noir (5500K)	-0,9561	3,169	2,594	-3,02988	-0,85614	25.94%
AM1.5G	-0,958	3,383	2,777	-3,24091	-0,85686	27.77

Tableau (II-1)

Les performances optimisées nous allons utiliser ces deux cellules dans le chapitre IV pour voir l'effet du spectre modifier sur leurs caractéristiques.

Chapitre III : Effet des terres rares sur la modification du spectre solaire pour l'irradiation des cellules solaires

Nous exposerons dans cette partie le principal effèt d'une couche de revêtement contenant des éléments en terre rares sur la face de l'émetteur d'une cellule solaire. Ces revêtements sont formés par une composition en verre conçus au laboratoire de l'UMBB et nous introduisons les effets de ce revêtement par un ensemble de modification sur le spectre solaire extrait du site de référence dans le domaine des énergies renouvelables NREL (www.nrel.gov). Ces modifications du spectre sont dues essentiellement à l'interaction de la lumière avec le verre du revêtement et surtout avec les éléments en terres rares qui permettent d'absorber et d'émettre dans des régions très spécifiques du spectre grâce aux propriétés spectroscopiques particulières de ces éléments contenus dans une matrice bien particulière. Notre but consiste en un choix des éléments lanthanides qui permettent le transfert d'énergie des domaines de faible efficacité aux domaines de plus grande efficacité des cellules solaires. En effet, selon sa nature et sa composition, une cellule solaire présente un domaine spectral, autour de l'énergie du gap, pour lequel sa réponse est optimale (absorption maximale). Il est alors plus intéressant de pouvoir confiner un maximum de photons autour de cette énergie.

1 - Spectre solaire :

Il est indispensable d'étudier la réponse du matériau formant la cellule à la lumière solaire sous forme naturelle. Le NREL publie quotidiennement les données expérimentales du spectre solaire normalisé AM0 pour l'extraterrestre, AM1.5G pour le global et AM1.5D pour le diffusé. La figure suivante illustre ces spectres.



Figure III-(1) : Spectre solaire réel extraterrestre AM0, Global AM1.5G et Diffuse AM1.5D [NREL www.nrel.gov]

Ces spectres indiquent que pour le spectre AM1.5G beaucoup de pics d'absorptions s'observent qui sont dus aux constituants de l'atmosphère.

2 – Spectres d'absorption d'une cellule solaire :

Le matériau utilisé dans le volume de la cellule solaire est le milieu d'interaction du rayonnement solaire sous sa forme spectrale. L'absorption du matériau est représentée par son spectre (figure suivante). Autour de la jonction l'absorption du rayonnement dépend toujours du matériau utilisé et le dopage n'a pas d'effet sur l'aspect génération du fait qu'à température ambiante on suppose que tous les dopants sont ionisés.



Figure III-(2) : Coefficient d'absorption du substrat de la cellule au Si et l'InP [19], [20], [1].

Les courbes des spectres d'absorption du silicium et de l'InP donnent globalement le comportement de la lumière à l'intérieur du volume du matériau. L'énergie absorbée est génératrice de porteurs de charges électrons et trous si elle est supérieure au gap du matériau. En plus, en fonction de la structure des bandes de valence et de conduction (gap direct pour l'InP et indirect pour le silicium) le nombre de porteurs générés est plus important dans le cas de l'InP que le cas du silicium par rapport aux mécanismes d'absorption. On remarque aussi que la courbe d'absorption de l'InP présente une variation brusque autour de la longueur d'onde de 885nm qui correspond à son gap. 4

3 – Réponses Spectrales d'une cellule solaire :

L'étude de la dépendance des caractéristiques d'une cellule solaire en fonction de la distribution spectrale du rayonnement forme la réponse spectrale. Cette réponse peut être exprimée par la variation en fonction de la longueur d'onde des caractéristiques à savoir la courbe I(V), le courant Icc, la tension Voc, le rendement ou la puissance maximale. Avant de voir ces paramètres il est important d'examiner rapidement un paramètre physique qui apparait dans les équations et qui représente le taux de génération des porteurs par absorption du rayonnement.

La figure suivante montre l'importance des propriétés du gap du matériau dans la photogénération et il apparait clairement que le taux de génération dans le cas de l'InP à gap direct est plus important dans le cas du silicium à gap indirect.



Figure III-(3) : Taux de génération de la cellule au Si et à l'InP

Le fait que la répartition spatiale du taux de génération des deux substrats est différente ceci va automatiquement induire des caractéristiques différentes et c'est ce qu'on observe sur les figures suivantes pour la variation en fonction de la longueur d'onde de la caractéristique I(V).



Figure III-(4) : Variation en fonction de la longueur d'onde de la caractéristique I(V) des cellules au Si et à l'InP

Nous remarquons que la caractéristique I(V) dépend fortement de la longueur d'onde pour les deux cas et on peut lire principalement les points qui suivent :

- Le point de puissance maximale varie considérablement ce qui induit les mêmes variations sur le rendement
- La plage de variation du courant de court-circuit est grande (~ 4 A)
- La tension de circuit ouvert ne varie pas beaucoup
- Le rendement est optimal autour de 900 nm

L'examen de ces points à travers des courbes en fonction de la longueur d'onde donne les figures suivantes.





Les figures précédentes montrent que les caractéristiques dépendent de la longueur d'onde et que d'après le rendement (la puissance maximale) les cellules ont un maximum d'absorption autour de 900nm. Pour l'InP on retrouve les chutes brutales des caractéristiques pour les longueurs d'ondes dépassant 900 nm suivant la courbe de l'absorption.

A travers cette étude, nous avons noté l'importance de la longueur d'onde sur le rendement et le fonctionnement optimal d'une cellule solaire, et ce quel que soit sa nature. Dans les cas que nous avons étudiés, le maximum du rendement est obtenu pour une irradiation autour de 900nm. Cependant le spectre solaire est très large, de l'UV à l'IR et présente un maximum autour de 540nm et dont certains domaines (particulièrement dans l'IR) sont inefficaces ou même dégradant pour la cellule (effets thermiques). Il est alors très intéressant de pouvoir transférer toutes ces énergies vers des domaines spectraux de plus grande efficacité en l'occurrence atour de 900nm. Dans ce qui suit, nous exposons un moyen de transfert d'énergie d'un domaine à un autre en utilisant les principes de la spectroscopie atomique des ions de terres rares, tels que le down- et l'up-conversion.

4 – Effets de revêtement contenant des terres rares sur les caractéristiques d'une cellule solaire :

Nous proposons dans cette partie de modéliser les effets de transfert d'énergie dans le spectre solaire des régions de faibles efficacités vers des régions à forte efficacité de la cellule. Ces transferts peuvent se faire dans la couche de verre qui est utilisée dans le revêtement de l'encapsulation. Du point de vue simulation nous proposons un simple modèle de modulation du spectre par les parties d'absorption-émission des terres rares contenu dans un verre. On simplifie l'étude par l'hypothèse que le verre est à 100 % transparent, que les terres rares contenue dans ces matrices absorbent loin de la zone de forte efficacité de la cellule.

4 - 1: Generalites sur la spectroscopie des ions de terres rares

Les terres rares appartiennent à la famille des lanthanides qui s'étend du Lanthane ₅₇La au Lutétium ₇₁Lu et ainsi que le Scandium Sc et l'Yttrium Y, ces éléments ont une particularité d'avoir une couche interne incomplète qui est la couche 4f écranté par les couche supérieur 5s et 5p, ce qui leur donne des propriétés spectroscopiques exceptionnelles appliquées particulièrement dans les processus d'amplification optique et l'émission laser.

Des transitions sont donc possibles sous certaines conditions dans la couche incomplète 4f et permet de générer des raies intenses allant de l'infrarouge au l'ultra-violet. Ces dernières sont dues à l'éclatement de la couche en plusieurs sous niveaux due à la combinaison de différentes interactions représentées dans la figure suivante.



Figure III-(6) : Représentation schématiques des différentes interactions qui agissent sur le niveau 4f. [6]

Lorsque l'ion est libre on a certaines interactions permettant une levée partielle de la dégénérescence :

- L'interaction électron-noyau, niveaux n
- L'interaction coulombienne entre les électrons, niveau L
- Le couplage spin-orbite, sous niveaux J

Après l'introduction de l'ion dans une matrice il subit l'interaction du champ du réseau cristallin sous effet Starck et on aura encore une levée de dégénérescence des sous niveaux, c'est les sous niveaux m_i

Les énergies des bandes 4f des terres rares ont été mesurées expérimentalement et rassemblées dans un diagramme énergétique appelé diagramme de Dieke (figure suivante) :



Figure III-(7) : Diagramme d'énergie des terres rares (Dieke)

4 - 2: Transitions electroniques dans les matrices solides

Ce paragraphe est inspiré à partir de plusieurs travaux sur la spectroscopie des terres rares dans des matrices solides [mémoire de master de S. Amrouch, département de physique UMBB, 2015, H. Zanane 2013] [18]-. Nous allons essayer de donner un aperçu simplifié sur les mécanismes d'interaction photons-ions de terres rares.

Les ions de terres rares possèdent des niveaux d'énergie qui, par interaction avec le champ électromagnétique (couplages multipolaires électriques ou magnétiques) engendrent des transitions optiques. On peut citer deux types: **[17]**

- Interaction électron-photon : transition Radiatives (absorption, émission).
- Interaction électron-phonon : désexcitation non radiative.

Toutes ces transitions sont classées en deux catégories :

a) Les transitions radiatives :

Absorption

Tout rayonnement électromagnétique d'énergie E = hv, traversant un matériau dans lequel sont incorporés des ions de terres rares subit une absorption qui peut engendrer sur ces ions des transitions des électrons d'un niveau fondamental E1 vers un niveau excité E2. Cette absorption et possible si l'écart énergétique E1-E2 est au moins égal à l'énergie E du photon.

Emission Spontanée

Après absorption d'un photon, l'ion se trouve dans son état excité E_2 . Après un certain temps (appelé durée de vie du niveau E_2), l'électron revient naturellement à l'état fondamental en émettant un photon (figure IV-8).Cette transition est appelée « émission spontanée ». C'est le phénomène réciproque au phénomène d'absorption mais il est caractérisé par un mécanisme aléatoire pour l'absorption et l'émission de photons qui se fait sur une direction aléatoire.

Emission Stimulée

Le mécanisme de désexcitation provoquée par un photon d'énergie égale à E2-E1 Lors de l'émission stimulée permet de créer, un premier photon, en rencontrant un électron excité, provoquera sa désexcitation et le forcera à émettre un second photon. Les deux photons ont les mêmes propriétés donc ils sont cohérents et directionnels. Pour provoquer cette émission stimulée il faut bien ramener beaucoup d'électrons dans le niveau E2 par un pompage donnant ainsi ce qu'on appelle inversion de population. La lumière laser est l'exemple le plus concret.



Figure III-(8) : Schéma descriptif des différents types d'interactions photon-matière : absorption, émission spontanée et émission stimulée [17]- [18]

c) Transitions non radiatives

Durant ces transitions une autre forme d'énergie accompagne le mécanisme de désexcitation. Il s'agit par exemple d'une énergie de vibration du réseau cristallin.

Ces atomes retrouvent leurs niveaux d'énergie fondamentale en dissipant l'énergie vers le réseau, par création de phonons c'est le phénomène de relaxation multi-phonons. La transition est dite non radiative car son origine correspond à la vibration du réseau vitreux (ou cristallin) **[17]**.

Les transitions non radiatives dépendent sensiblement de la nature de la matrice hôte des terres rares contrairement aux transitions radiatives.

4 -3: MECANISMES DE TRANSFERTS D'ENERGIE

Lorsque la concentration en ions de terres rares est importante, les distances inter-ions diminuent, ils peuvent alors s'interagir sous l'influence des forces électrostatiques en donnant naissance à des phénomènes de transferts d'énergie entre un ion donneur (D) et un ion accepteur (A). Il existe plusieurs mécanismes de transfert d'énergie qui peuvent dépendre à la fois de la nature des ions de terres rares ainsi que de la nature de la matrice hôte [17].

a) Transfert d'énergie direct

Le mécanisme décrit dans la **figure IV-9**, est situé entre deux ions proches voisins qui présentent deux niveaux énergétiques identiques. L'ion donneur initialement excité, va se relaxer vers un niveau inférieur en émettant un photon. Ce dernier est absorbé par un ion voisin (dit accepteur) qui passe du niveau fondamental à un niveau excité **[17]**.



Figure III-(9) : transfert d'énergie résonant. [17]- [18]

b) Transfert d'énergie assisté de phonons

Ce phénomène est observé lorsque l'écart énergétique entre les niveaux de l'atome donneur et les niveaux de l'atome accepteur, est différent. Dans ce cas, le transfert d'énergie ne fait pas intervenir les mêmes états énergétiques pour les deux ions. L'énergie de la transition $D^* \rightarrow D$ de l'atome donneur, est supérieure ou inférieure à celle de la transition $A \rightarrow A^*$ de l'atome accepteur. Pour que la conservation de l'énergie soit totale il faut qu'il y ait soit émission soit absorption de phonon (**figure IV 10 et 11**).







phonons. [17]- [18]

i. Processus d'up-conversion :

Le processus d'up-conversion peut se réaliser de deux façons différentes. La première correspond à l'absorption de deux photons qui proviennent directement du faisceau d'excitation (c'est l'absorption simultanée de 2 photons). La seconde façon est celle qui correspond à l'échange radiatif ou non radiatif entre un ion donneur et un ion accepteur donc une relaxation croisée entre les deux ions excités.



Figure III-(12) : Processus d'up-conversion par absorption à deux photons. [17]- [18]



Figure III-(13) : Processus d'up-conversion entre deux ions. ii. Processus Down conversion [17]- [18]

Le down conversion est un processus de photoluminescence qui multiplet le nombre de photon absorber, ce dernier s'effectue par 3 voix différente (figure IV-14) :



Figure III-(14) : Schéma montrant les 3 voix de processus down conversion [6]

A – par un seul centre luminescent avec au moins 3 niveaux d'énergie, l'électron est existé vers le niveau supérieur puis se désexcite vers le niveau intermédiaire en émettant un photon avant de revenir à l'état fondamental en émettant un autre photon.

B – par un couple de centres luminescents, l'un joue le rôle d'absorbeur et l'autre le rôle de l'émetteur, l'électron dans l'absorbeur sera élevé vers le niveau supérieur comme dans la 1ere vois puis redescendre vers le niveau intermédiaire tout en cédant une partie de son énergie vers l'émetteur qui vas exister un électron du niveau fondamental vers un niveau supérieur, enfin les deux électrons des deux centres luminescents se relaxent vers le fondamental en émettons deux photons.

C – par 3 centres luminescents, comme dans la deuxième voie mais cette fois-ci on aura 2 émetteurs et l'absorbeur ne possède pas de niveau intermédiaire. L'absorbeur cède son énergie après excitation vers les deux émetteurs simultanément puis ces derniers se relaxent vers leurs niveaux fondamentaux en émettant deux photons.

Dans ces 3 voies la longueur d'onde des photons émis est au moins 2 fois supérieure à la longueur d'onde d'excitation.

Ces deux processus permettent de modifier les spectres lumineux, ils sont utilisés dans plusieurs domaines optoélectroniques comme les amplificateurs à fibre optique, nous allons voir leur contribution dans le domaine photovoltaïque.

4 -4: SPECTROSCOPIE D'ABSORPTION ET LOI DE BEER-LAMBERT

L'intensité transmise $I_T(\lambda)$ à une longueur d'onde donnée λ , représente le nombre de photons résiduels (énergie par unité de temps et de surface) du faisceau de photons incident (intensité incidente $I_0(\lambda)$) après avoir traversé un milieu d'épaisseur x :

Cette intensité transmise $I_T(\lambda)$ s'écrit en tenant compte de l'intensité diffusée $I_D(\lambda)$ et de l'intensité réfléchie $I_R(\lambda)$ comme :

$$I_T(\lambda) = I_0(\lambda) - I_R(\lambda) - I_D(\lambda) - I_A(\lambda) \qquad \text{eq-III-(1)} \quad [16] \quad [17]$$

 $I_A(\lambda)$ est l'intensité absorbée par les centres actifs du milieu



Figure III-(15) : schéma descriptifs des différents mécanismes responsables de l'atténuation de la lumière par un matériau

Dans un milieu dit non turbide et homogène (milieu transparent), il n'y pas de diffusion $(I_D(\lambda)=0)$, et si l'indice de réfraction du milieu est le même que celui du milieu estérieur $(I_R(\lambda)=0)$, il n'a pas de réflexion. Dans ce cas, l'intensité transmise $I_T(\lambda)$ ne dépend que de l'absorption par des centres actifs, on écrit alors :

$$I_{T}(\lambda) = I_{0}(\lambda) - I_{A}(\lambda) \qquad \text{eq-III-(2)}$$

a) Coefficient de transmission et absorbance :

On définit la transmission par :
$$T = \frac{I_T(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$
 eq-III-(3) [16] [17]

Par convention, on définit l'absorbance ou densité optique par : $Abs = -\log T = -\log \frac{I_T(\lambda)}{I_0(\lambda)}$ eq-III-(4) [16] [17]

b) Loi de Beer-Lambert

La transmission (ou absorption) pour une longueur d'onde donnée et pour un milieu donné, dépend de l'épaisseur de la matière traversée. On montre que l'intensité absorbée $dI_x(\lambda)$ est proportionnelle à l'intensité $I_x(\lambda)$ au point x, et à l'élément d'épaisseur dx traversée dans la matière, on peut alors écrire :

$$dI_{x}(\lambda) = I_{x+dx}(\lambda) - I_{x}(\lambda) = -\mu I_{x}(\lambda) dx \qquad \text{eq-III-(5)}$$

 $I_x(\lambda)$ est l'intensité transmise du faisceau au point x et $I_{x+dx}(\lambda)$ est l'intensité transmise au point x + dx, le signe (-) du terme de droite de l'équation est dû au fait que $I_{x+dx}(\lambda) < I_x(\lambda)$. μ est le facteur de proportionnalité qui dépend de la nature de la matière traversée, de la concentration en centre actif et de la longueur d'onde λ . Ce paramètre, appelé coefficient d'absorption linéique, a la dimension inverse de la distance et est souvent exprimé en (cm^{-1}) . L'intégration de l'équation (III-5), donne la loi de Beer-Lambert :

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$$
 eq-III-(6)

c) Section efficace d'absorption

On définit la section efficace d'absorption σ_a pour chaque centre actif, exprimée en cm^2 :

$$\sigma_a = \frac{\mu}{N}$$
, eq-III-(7) N est le nombre de centres actifs (ions de terres rares) par cm^3 ,

on peut déduire facilement son expression :

$$N = \eta \frac{\rho}{M \cdot N_A}$$
 eq-III-(8) η est la proportion molaire des ions de terres rares par

rapport au différents constituant chimique du matériau, ρ et M la masse volumique et la masse molaire du matériau respectivement, N_A le nombre d'Avogadro.

Dans toutes les mesures de spectrophotométrie UV-visible ou infrarouge, on utilise le même principe qui est basé sur la loi de Beer-Lambert afin de calculer la section efficace d'absorption σ_a pour chaque longueur d'onde à partir des spectres d'absorption expérimentaux. Notons que la section efficace σ_a est directement liée la probabilité de d'absorption par le centre actif pour une longueur d'onde donnée.

4-5: Effet des terres rares sur le spectre solaire

Comme nous l'avons décrit dans les paragraphes précédents, les terres rares vont nous permettre de modifier les spectres incidents en absorbant certaines longueurs d'ondes et en émettant d'autres. Notre objectif consiste à confiner plus de photons dans le domaine d'absorption maximale des cellules. Nous rappelons que le domaine optimal pour nos cellule Si et InP se situe aux alentours de **900 nm**.

a) Choix des terres rares et architecture de la cellule

Plusieurs paramètres peuvent aider à faire notre choix notamment la section efficace qui nous permet de définir le rendement quantique d'absorption et de fluorescence des terres rares. Les critères les plus importants dans notre cas sont deux :

- Domaine d'absorption des terres rares doit être en dehors du domaine d'absorption maximale des cellules
- Domaine d'émission doit, contrairement au premier, correspondre au domaine d'absorption de la cellule. Il faut faire en sorte que la répartition des photons (ou la densité de puissance) soit la plus élevée dans ce domaine, ensuite voir le domaine d'émission.

D'après le diagramme de Dieck on remarque que plusieurs éléments ont des niveaux d'absorption dans le domaine optimal des cellules. Il reste quelques éléments tels que le Samarium, l'Europium, l'Ytterbium, le Terbium et encore l'Erbium selon l'architecture de la cellule (élément intéressant dans les processus d'up-conversion).

En effet, l'aspect technologique dans la conception d'une cellule avec un revêtement sous forme d'une matrice vitreuse ou polymérique dopée terres rares est important pour optimiser le taux de transfert radiatif vers le domaine de fonctionnement optimal de la cellule. Pour les terres rares permettant une émission en down-conversion, il est plus intéressant de les mettre en dessus de la cellule. Dans ce cas, l'absorption est généralement dans le domaine des plus grandes énergies (proche de l'UV) pour une émission dans le visible ou proche IR, un domaine d'absorption pour lequel la diffusion de la cellule est importante (les UV pénètrent moins à cause de la diffusion). Cependant, pour les éléments favorisant le processus d'up-conversion, l'absorption est souvent dans l'IR. Ces derniers pénètrent plus facilement avec moins de diffusion. Il est alors plus intéressant de mettre ces éléments lanthanides audessous de la cellule ce qui force à revoir la structure de la cellule. Dans ce dernier cas, les éléments lanthanides peuvent être plus nombreux, car quel que soit leurs domaine d'absorption, ils n'affectent pas négativement le rendement de la cellule.

b) Effet d'une matrice vitreuse dopé en terres rares sur le spectre normalisé AM1.5G :

Nous allons utiliser le spectre expérimental de NREL avec une adaptation des valeurs pour un tableau exploitable avec PC1D et avec une puissance total de 962 W/m².

Dans le revêtement nous allons admettre une absorbance Abs = 1 (une transmittance T=0.1) dans un domaine d'absorption et Abs = 0 (T=1) dans ce qui reste.

En théorie on peut avoir un rendement de 200% en nombre de photon si il n y a pas d'émission non radiative mais il n y a que ceux de qui sont absorbé dans la plage 300-450 nm qui nous intéresse afin d'avoir des émissions dans une plage de 600 à 900 nm.

4 – 6 : Simulation des caractéristiques de cellules solaires avec modification downconversion du spectre solaire

a) Cas idéal :

Nous prenons les modifications du spectre solaire par les processus down et up conversion que nous adaptons pour le cas du programme pc1d sur la base du spectre normalisé AM1.5G. La figure suivante montre l'effet de la modification du spectre solaire dans le cas idéal du down-conversion. On a choisi le domaine d'absorption de 300 à 450nm (en jaune) pour une émission de 600 à 900nm (en vert). En termes de densité de puissance, on considère qu'il n'existe aucune perte d'énergie. De ce fait, nos simulations pour déduire les caractéristiques de la cellule, sont faites par comparaison avant et après modification du spectre. On note que dans cette gamme spectrale, la densité de puissance calculée est de **77** W/m^2 .



Figure III-(16) : Représentation du spectre AM1.5G après avoir subi une absorption à travers une matrice vitreuse dopé en terres rares conçu pour le down-conversion

Les suivantes présentent les caractéristiques I(V) d'une cellule au Si sur substrat p pour trois cas de figure : spectre solaire non modifié (I1), spectre solaire après absorption à 90% dans la gamme 300-450nm (I2) et spectre solaire modifié par effet du down conversion pour une émission entre 600 et 900nm (I3).



Figure III-(17) : Effet du processus down-conversion sur la caractéristique de la cellule Si avant (I1) et après absorption dans le domaine 300-450 nm(I2) et après une émission down entre 600 – 900nm (I3)

On constate alors que l'effet de la modification du spectre par le processus de down-conversion est extrêmement important quelle que soit la nature de la cellule.

En effet, l'apport dû au processus de down conversion se traduit surtout par l'augmentation du courant photo-généré. Il passe ainsi de 3.279 A à 3.625 A avec un gain du rendement de 2.1% Le résultat est encore plus important dans le cas de la cellule de sur substrat de type n en InP. Le courant photo-induit obtenu passe de 3.383A en irradiation avec le spectre solaire non modifié à 3.824A sous l'effet du down-conversion avec un gain en rendement de 3.2%.

Si	Voc(volt)	Icc(Amp)	P(watt)	Pmax(watt)	FF	Rendement(%)
I1	0,617	-3,279	1,593	-2,02314	-0,78739	15.9
I2	0,6167	-3,238	1,57	-1,99687	-0,78623	15.7
I3	0,6204	-3,625	1,801	-2,24895	-0,80082	18.0

Les résultats de cette étude sont récapitulés dans les tableaux III-1 et III-2.

Tableau (III-1)



Figure III-(18) : Effet du processus down-conversion sur la caractéristique de la cellule InP avant (I1) et après absorption dans le domaine 300-450 nm (I2) et après une émission down entre 600 – 900nm (I3).

InP	Voc(volt)	Icc(Amp)	P(watt)	Pmax(watt)	FF	Rendement(%)	
I1	-0,958	3,383	2,777	-3,24091	-0,85686	27.8	
I2	-0,9574	3,312	2,718	-3,17091	-0,85717	27.2	
13	-0,9606	3,824	3,097	-3,67333	-0,8431	31.0	

Tableau (III-2)

Les mêmes observations sont à noter, le courant photo généré devient plus important grâce à l'apport de puissance due à la conversion. Le rendement s'améliore par conséquent.

b) Cas particulier d'une terre rare :

Le cas réel de l'effet du down conversion sur les cellules consiste à pendre des spectres d'absorption et d'émission des ions trivalents d'europium composés dans une matrice vitreuse de type fluorure de zirconium (ZBA) synthétisée au laboratoire.

Les figures suivantes présentent respectivement, les spectres expérimentaux d'absorption et d'émission après excitation à 366nm de la matrice ZBA dopée Eu³⁺ dans le domaine spectral allant de 190 à 1100nm.



Figure III-(19) : Absorbance de l'Eu3+ dans une plage de 280 à 1100 nm



Figure III-(20) : Spectre d'mission de l'Eu3+ dans une matrice de ZBA existée à 532nm

Le choix de l'europium réside dans ses propriétés d'absorption et d'émission :

- L'absorption dans le domaine des UV avec un maximum autour de 400nm. Au-delà de cette longueur d'onde, l'absorption est quasiment nulle (figure III-19). Cette propriété est importante car le domaine d'absorption ne touche pas le domaine d'efficacité maximale de la cellule, ce qui ne modifie pas négativement le spectre du soleil dans cette zone.
- L'émission dans le domaine allant de 580 à 700nm (figure III-20), est considérable car ce domaine est proche du domaine d'efficacité maximale de la cellule.

Du point de vue quantitatif, on déduit une puissance absorbée de **11.8 W/m²** dans le spectre solaire AM1.5G dans le domaine des UV. Cette puissance est transférée dans le domaine d'émission de l'Eu3+ (distribuée selon l'amplitude des pics d'émission comme indiqué dans la **figure III-20**). Les modifications ainsi apportées au spectre solaire en présence d'europium, sont schématisées dans la **figure III-21**.



Figure III-(21) : Effet d'une matrice ZBA dopé en Europium sur le spectre solaire

Dans la supposition qu'on a émise du fait qu'il n y a pas de perte de puissance convertis, on peut simuler sous PC1D pour quantifier l'effet des matrices dopées Eu³⁺ sur les caractéristiques de nos cellules.

D'après les **figures III-22 et III-23**, la modification du spectre solaire en présence d'Europium, conduit à l'augmentation du photo-courant généré 3.287 à 3.326 A dans le cas de la cellule au silicium et de 3.383 à 3.438A dans le cas de la cellule à l'InP. Cependant, le rendement des deux cellules augmente de la même valeur et qui est estimée à 0.5%. Les résultats de cette analyse, sont récapitulés dans les **tableaux III-3 et III-4**.

On remarque que l'apport de l'europium est faible mais ce n'est qu'un effèt relatif par rapport à la puissance utilisée. En effet, dans le cas idéal que nous avons étudié, la puissance convertie est de 77 W/m2 alors qu'elle de 11.8 W/m2 dans le cas de l'utilisation du spectre expérimental de l'europium. En outre, ce spectre peut changer selon le taux de dopage en terres rares ou selon l'épaisseur de la matrice vitreuse, ce qui conduit à la variation de la puissance convertie. Il est important de noter que quelles que soient les valeurs obtenues, le down-conversion induit par la présence de l'europium conduit à l'amélioration des caractéristiques des cellules solaires.



Figure III-(22) : Caractéristique de la cellule Si Avant (i1) et après absorption (I2) et émission (I) de la matrice ZBA dopé en Eu3+



Figure III-(23) : Caractéristique de la cellule InP Avant (i1) et après absorption (I2) et émission (I) de la matrice ZBA dopé en Eu3+

Silicium	Voc(volt)	Icc(Amp)	P(watt)	Pmax(watt)	FF	Rendement(%)	
I1	0,617	-3,279	1,593	-2,02314	-0,78739	15.9	
I2	0,6171	-3,287	1,597	-2,02841	-0,78732	16.0	
Ι	0,6174	-3,326	1,617	-2,05347	-0,78745	16.2	
Tableau (III-3)							

InP	Voc(volt)	Icc(Amp)	P(watt)	Pmax(watt)	FF	Rendement(%)
I1	-0,958	3,383	2,777	-3,24091	-0,85686	27.8
I2	-0,958	3,383	2,776	-3,24091	-0,85655	27.8
Ι	-0,9585	3,438	2,825	-3,29532	-0,85728	28.3

Tableau (III-4)

4 – 7 : Simulation des caractéristiques de cellules solaires avec modification upconversion du spectre solaire :

Contrairement au processus de down-conversion, le phénomène d'up-conversion est un processus non linéaire qui permet une absorption simultanée de deux, trois ou plusieurs photons de faible énergie (IR) pour l'émission d'un seul photon de plus grande énergie (visible). L'énergie maximale ainsi émise est la somme des énergies de tous les photons absorbés. Ce cas est très observé dans les matrices dopées aux ions trivalents d'erbium. Ce que nous décrivons dans ce paragraphe, mais comme dans le cas du down-conversion, nous traitons le cas idéal et le cas réel sur l'apport de ce processus sur la modification du spectre d'irradiation des cellules solaires, et par conséquent la variation de caractéristiques de ces dernières.

a) Cas idéal :

Dans le spectre solaire, une grande partie de l'énergie dans l'infrarouge est inutile pour les cellules photovoltaïques du fait que leurs domaines d'absorption sont limités. Dans le cas des cellules au Si, la limite est situé à 1100nm, cette limite est encore plus basse pour les cellules de type InP qui se situe à 918nm (plus grand gap). Le spectre solaire résiduel au-delà de cette limite, en termes de longueur d'onde, est perdu ou constitue un effet indésirable en chauffant les cellules (effets thermiques). Le processus d'up-conversion permet alors de transférer une partie de cette énergie IR vers le domaine du visible et améliorer ainsi les caractéristiques de la cellule.



Figure III-(24) : Représentation du spectre solaire après avoir subi une absorption qui s'étale de 1100-2200 nm et une émission de 550-1100 nm du a l'up conversion favorable au Silicium avec un rendement de puissance de 100%


Figure III-(25) : Représentation du spectre solaire après avoir subi une absorption qui s'étale de 950-1820 nm et une émission de 475-910 nm du a l'up conversion favorable à l'InP avec un rendement de puissance de 100%

Comme dans le cas du down conversion, nous admettons une absorbance de 1 dans le domaine 1100 -2200 nm pour le cas du silicium et de 950 - 1820 nm pour le cas de l'InP. Par conséquent, dans le cas idéal, un transfert d'énergie par up-conversion par absorption à deux photons est prévu vers les plages spectrales de 550 à 1100 nm pour le premier cas, et de 475 - 910 nm pour le second. Nous notons que la puissance totale convertie est conservée en supposant que les transitions non radiatives sont négligeables. Les figures III-24 et III-25, montrent ainsi les spectres solaires idéalement modifiés par up-conversion pour les deux cas correspondant aux cellules Si-n et InP respectivement. Suivant cette configuration, on estime une puissance concvertie de 139.7 W/m² pour le spectre distiné au Silicium et 212 W/m² pour l'InP.

Les **figures III-26** et **III-27**, montrent les résulats de la conversion en fréquence par upconversion sur les caractéristiques des cellules à base de Si-n et InP respectivement, et ce pour plusieurs rendement de conversion allant de 20 à 90%. Les résulats montrent que quelque soit le facteur de conversion, le gain des cellules augmente sensiblement. Pour un facteur de conversion de 90%, le courant photo-induit passe de 3.279 à 3.88 pour la cellule Si-n qui voit son rendement passer de 15.9 à 19.7%, soit une augmentation de 3.8%. Le résultat est encore plus remarquable pour le cas de la cellule InP pour laquelle le photo-courant passe de 3.383 à 4.632A avec un gain qui augmente de 8.5%, il passe ainsi de 27.8 à 36.3% pour un facteur de conversion de 90%.



Figure III-(26) : effet du processus up conversion sur la caractéristique de la cellule Si sous le spectre de la figure (IV-24) avec des taux de transmissions différente (90%-50%-

20%)

Silicium	Voc(volt)	Icc(Amp)	P(watt)	Pmax(watt)	FF	Rendement(%)	
I(normal)	0,617	-3,279	1,593	-2,023143	-0,78738873	15.9	
I(90%)	0,623	-3,88	1,969	-2,41724	-0,81456537	19.7	
I(50%)	0,6204	-3,597	1,8	-2,2315788	-0,80660383	18.0	
I(20%)	0,6184	-3,408	1,673	-2,1075072	-0,79382884	16.7	
Tableau (III-5)							

Tableau



Figure III-(27) : effet du processus up conversion sur la caractéristique de la cellule InP sous le spectre de la figure (III-25)

InP	Voc(volt)	Icc(Amp)	P(watt)	Pmax(watt)	FF	Rendement(%)
I(normal)	-0,958	3,383	2,777	-3,24091	-0,85686	27.8
I(90%)	-0,9637	4,632	3,633	-4,46386	-0,81387	36.3
I(50%)	-0,9613	4,07	3,241	-3,91249	-0,82837	32.4
I(20%)	-0,9594	3,652	2,963	-3,50373	-0,84567	29.6
	•	-	Tableau	(III-5)		

b) Cas particulier d'une terre rare :

L'ion trivalent d'erbium est un élément type qui permet la conversion en fréquence par le processus d'up-conversion. Cependant, son spectre d'absorption est très riche et présente plusieurs bandes d'absorption dans le domaine du visible (**figure III-28**). Dans ce cas, son utilisation nécessite une architecture particulière qui permettrait son application en dessous des cellules pour éviter l'absorption par l'Er du spectre solaire dans le domaine d'efficacité maximale des cellules. En revanche, son application en dessous, ne modifie nullement le spectre solaire dans le visible mais par contre, permet de convertir les IR non absorbés par la cellule vers le visible.

Le spectre d'absorption de l'Er³⁺, indique deux bandes d'absorption dans l'IR, la première autour de 980nm et la seconde autour de 1530nm. L'excitation à ces énergies, permet une émission d'une bande large autour de 543nm par absorption à deux photons pour une excitation à 980 nm ou à trois photons pour une excitation à 1532nm. Le spectre d'up-conversion obtenu par excitation à 980nm (le même que celui à 808 nm) est présenté dans la **figure III-29**.

Pour la cellule à base de l'InP, dont le gap est situé à 918 nm, est favorable pour le processus d'up-conversion par excitation à 980nm (énergie inferieure à l'énergie du gap). Cependant pour les cellules à base du silicium pour laquelle le gap se situe à 1100nm, c'est l'absorption à trois photons à 1532nm qui lui est favorable.



Figure III-(28) : spectre d'absorption de l'ion de terre rare d'Er3+ dans une matrice de tellure. [16]



Figure III-(29) : représentation spectre d'émission en up-conversion de la matrice de Tellure dopé en Er3+ après excitation à 808nm.

Pour une cellule InP, irradiée par un spectre modifié par le processus d'up-conversion en présence d' Er^{3+} comme schématisé sur **la figure III-30**, le courant photo-induit augmente de 3.383 à 3.444A avec l'amélioration du rendement de 0.5% et ce pour une puissance convertie de 14.7W/m². Les caractéristiques de la cellule sont décrites par la courbe de la **figure III-31** et entièrement récapitulées dans le **tableau III-6**.



Figure III-(30) : représentation spectre solaire à travers une matrice tellure dopé en Er3+



Figure III-(31) : caractéristique de la cellule solaire InP avant et après avoir subi le processus up conversion travers une matrice tellure dopé en Er3+

InP	Voc(volt)	Icc(Amp)	P(watt)	Pmax(watt)	FF	Rendement(%)
I1	-0,958	3,383	2,777	-3,240914	-0,85685705	27.8
I2	-0,9585	3,444	2,833	-3,301074	-0,85820554	28.3

Tableau (III-6)

Nous pouvons conclure qu'enfin même si les variations des caractéristiques sont relativement faibles mais une amélioration est visible, un apport de puissance supplémentaire peut avantager un gain encore plus important dans le ca du up-conversion. Cet apport peut être assuré par La concentration de lumière pouvant augmenter le rendement des matrice vitreuse et même de faire ressortir certaines transitions qui n'apparaissent qu'a des forte densité de lumière d'excitation.

Conclusion générale :

Dans ce travail en a vus les principaux éléments pour la compréhension du fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque. Comme étant des composants convertisseurs de lumières vers le courant électrique. Pour connaitre quels sont les facteurs qui influent sur ces caractéristiques il était indispensable d'étudier le composant dans son aspect matériaux et architecture. Nous avons vu que la jonction entre deux matériaux semi-conducteurs est le siège de création d'une zone de charge d'espace où règne un champ électrique qui repousse les porteurs majoritaires pour former une barrière mais les porteurs minoritaires forment un courant d'intensité très fable. Les mécanismes de transport de ces porteurs de charges sont régis par les équations de transport. La première équation est celle qui donne l'état électrique en tout point, c'est l'équation de poisson. Les deux autres équations qui sont les équations de continuité donnent les états électriques lorsque les porteurs se déplacent d'une façon générale.

Dans ce travail nous avons opté pour l'utilisation d'un code de calcul développé par l'équipe de Paul Basore de l'université d'Australie qui permet de résoudre les équations de transport et donner toutes les solutions dans beaucoup de cas de conditions de fonctionnement. Il se base sur la résolution numérique du système d'équation formé par l'équation de Poisson et les équations de continuité normalisées et adapté aux schémas aux éléments finis dans le cas unidimensionnel uniquement. Ce code tient compte des modèles physiques les plus connues de la littérature. Il dispose d'une interface conviviale pour contrôler beaucoup de paramètres liés aux équations et aux conditions extérieures. Les solutions sont exposées graphiquement et en data exploitable et regroupant les valeurs des grandeurs physiques comme le potentiel électrostatique et les concentrations des porteurs de charges qui permettent de remonter aux caractéristiques macroscopique comme la courbe de réponse courant-tension. L'étude faite pour des configurations de cellules solaires montre que le substrat est l'élément central de la cellule avec la couche dopée formant l'émetteur. Les caractéristiques dépendent directement de ces deux aspects. Comme la cellule absorbe de la lumière solaire sous forme d'un spectre large les propriétés optiques du matériau forment donc un aspect bien précis pour étudier la réponse du composant. Nous avons conclu que les comparaisons faites sur des cellules concues à base du silicium et à base d'un matériau binaire InP donnent des caractéristiques différentes du fait que leurs propriétés optiques sont différentes.

Du fait que le spectre solaire (pris en valeurs expérimentales normalisées AM1.5G) nous montre que la gamme du visible est la région la plus efficace pour les cellules solaires d'une façon générale et surtout dans le Rouge. Une faible partie de la gamme des UV est absorbé alors que les IR inferieur (en eV) au gap ne le sont pas et donc nous avons opté pour la récupération et la conversion de cette énergie perdue de l'UV et IR vers le visible on utilisant deux processus down et up conversion afin de l'exploité et de voir son effet sur la caractéristique I(V) d'une cellule solaire et d'amélioré son rendement. Il existe plusieurs éléments qui ont des propriétés optiques intéressantes pour de faire la conversion de faibles longueurs d'ondes vers de grande longueur d'onde mais seules les terres rares peuvent faire le processus inverse

L'étude de la spectroscopie des matrice dopé en terres rares est utilisé dans plusieurs domaine notamment l'optoélectronique mais comme on la vue on s'est limité à deux matrice (ZBA te tellure) et deux terre rares (Europium et Erbium) car ce domaine et très vaste néanmoins on a tout d'abord prouvé que le maximum d'absorption de nos deux cellules était au alentour de 885 nm aussi que le processus up-conversion est plus favorable que le down-conversion avec des apports pour la cellule a base d'InP dans le cas idéal 8.5 % par UP contre 3.2% par DOWN et 0.5% pour les deux processus dans le cas des deux terres rares mais n'oubliant pas que on a négligé l'absorption a 1532 nm ans le cas de l'Erbium, aussi comme la matrice se trouve pardessous on ne touche pas au spectre excitation de la cellule, de plus lors que on ajoute un revêtements par-dessus une cellule une faible partie du spectre est réfléchie et comme on la vue dans le chapitre II, la réflectance doit être la plus faible ainsi si celle-ci est très faible dans le cas idéal on aura toujours un apport positif, mais dans le cas des terres rares comme on la vue dans le chapitre III l'Europium et le plus approprier mais avec cet condition de réflexion et du faite qu'on touche aux spectre qui sera absorbé par la cellule solaire on risque d'avoir une perte et non pas un gain mais on peut utiliser les métaux de transitions car il peut carrément shifté (décalé) une grande partie du spectre (de UV et une partie du visible) vers le domaine d'absorption optimal des cellules solaire ainsi on aura un apport beaucoup plus élevé.

On en conclue que les terres rares ont un effet sur le spectre solaire favorable aux cellules solaire et un apport positif via le processus up-conversion mais très faible via le processus downconversion ou on peut utiliser les métaux de transition

Ainsi on a prouvé par simulation que la modification du spectre solaire peut avoir un impact positif sur la caractéristique I(V) d'une cellule solaire et sur son rendement

Perspective :

- L'avantage de ces revêtements dopé en terres rares est qu'ils existent sous plusieurs forme et s'adapte car ce domaine et d'actualité n'oubliant pas que plusieurs industrie comme la transmission est surtout la médicine l'utilisé déjà avec des molécules organique aux quel on introduit des ligan notamment des terres rares pour diagnostique plusieurs maladie. Ainsi on peut utiliser ce genre de technologie pour améliorer les rendements des cellules solaire de 3 em génération (colorant ou organique)
- Comme on la vue plus l'épaisseur de la face sensible est faible plus les performances des cellules solaire augmente or actuellement ont une technologie en cours de développement qui a pour but le freinage de ions charger peut être utilisé dans le dopage afin d'avoir une forte injection d'impuretés a de très faible profondeur de l'ordre de quelque nm
- Dans notre cas on peut utiliser des cellules à base de l'InP de substrat type n en couche mince car elle est moins couteuse que celle a double-jonction aussi Indium et le Phosphore possède des propriétés de fluorescence intéressent qu'on peut exploiter aussi une bonne compatibilité avec plusieurs matériaux auxquelles et on peut y introduire des nano particule fluorescente comme les plasmant pour avoir plus d'absorption.
- On ce qui concerne les deux revêtements, celle de dessus doit être la plus transparente possible dans le cas idéal un indice de réfraction inferieur a 1 comme les méta matériaux, dopé en métaux de transition qui shift le domaine du spectre solaire 280-650 vers 700-900 pour le cas des cellule Si et InP et on ce qui concerne la matrice du dessous, elle doit être surtout transparent aux IR, et on peut utiliser un co-dopage des terres rares (comme Er-Yb) pour avoir une meilleur absorption des IR donc une plus grande émission dans le visible et pour amplifier cette fluorescence on peut introduire des nano-cristaux a côté des terré rares, avec les conditions requise on pourras avoir une bonne multiplication des photon émise et bien sûr il faut un revêtements entièrement réfléchissant par-dessous la matrice dopé pour reflété vers la jonction.

Merci

Référence :

[1]- Shmidt *Handbook Series on Semiconductor Parameters*, **vol.1**, M. Levinshtein, S. Rumyantsev and M. Shur, ed., World Scientific, London, 1996

[2]- Ouddah Mourad « étude du Silicium poreux destiné aux cellules solaire », Thèse, Université Mentouri Constantine, (2009).

[3]- Vincent FROGER Couches minces de chalcogénures de zinc déposées par spray-CVD assisté par rayonnement infrarouge pour des applications photovoltaïques

[4]- W. Schokley and W.T. Read « Statistics of the recombination of holes and electrons », Article, Phys Rev. 87, pp 835-842, (1952).

[5]- M.J. Kerr, A. Cuevas « General parameterization of Auger recombination in crystalline silicon », Article, J. Appl. Phys. 91, pp 2473-2480, (2002).

[6] Bo Fan « Verres et céramiques luminescents pour améliorer le rendement des cellules solaires PV »

[7]- PC1D Version 5: 32-bit Solar Cell Modelling on Personal Computers, 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, Sep-Oct 1997, pp.207-210.

[8]- PC-1D version 2: enhanced numerical solar cell modelling Rover, D.T.; Basore, P.A.; Thorson, G.M. IEEE 1985, p. 703

[9]- Dargys A. and J. Kundrotas Handbook on Physical Properties of Ge, Si, GaAs and InP, Vilnius, Science and Encyclopedia Publishers, 1994

[10]- Numerical modelling of textured silicon solar cells using PC-1D, Paul A. Basore IEEE Trans. Elec. Dev., 37(2) 337 (1990)

[11]- PC-1D Version 3: Improved speed and convergence, Paul A. Basore IEEE 1991, p. 299-302.

Solar cell modelling on personal computers, Rover, D.T.; Basore, P.A.; Thorson, G.M. [12]- help PC1D5.9 et 6.2

[13]- Henry Mathieu. Physique des semi-conducteurs et des composants electroniques, Masson, (1987).

[14]- S.M. Sze and K. K. Ng, 'Physics of Semiconductor Devices', Third Edition, John Wiley and Sons, Interscience, 2006.

[15]- J. Merigeona, O. Maalejb, B. Boulardb, A. Stanculescuc, L. Leontied, D. Mardared, M. Girtana; "Studies on Pr3+–Yb3+ codoped ZBLA as rare earth down convertor glasses for solar cells encapsulation" Optical Materials, Volume 48, October 2015

[16]- Jean-Claude G. Bünzlia, b, , , Svetlana V. Eliseevaa, c, "Lanthanide NIR luminescence for telecommunications, bioanalyses and solar energy conversion", Journal of Rare Earths, Volume 28, Issue 6, December 2010

[17]- Memoires Master des etudiant de chalal (a completer)

[18]- Mémoire de master de S. Amrouch, département de physique UMBB, 2015, H. Zanane 2013.

[19]- Référence des propriétés des matériaux http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/InP/

et http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/Si/

[20]- Rapport "Minority-Carrier Lifetime in InP as a Function of Light Bias" NASA Technical Memorandum 106821 de la National Aeronautics and Space Administration