REPUBLIQUE ALGERINNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université El-Hadj Lakhder – Batna

MEMOIRE

Présenté au Département des Sciences de la matière

Faculté des Sciences

Pour l'obtention de diplôme de

Magister en Physique

Option : PHYSIQUE DES MATERIAUX METALLIQUES ET SEMI-CONDUCTEURS

Par

BEDDA NAIMA

THEME

Etude des propriétés physiques des semi-conducteurs : Si, GaAs et GaAlAs. Simulation des cellules solaires à base de Si et GaAs.

Soutenue le 16 /06 / 2011 devant le Jury :

M^{r} Belgacem Bouzida Aissa	*Professeur à l'université de Batna*	Président
M^{r} Ounissi Abdelhamid	*Professeur à l'université de Batna*	Rapporteur
M^{r} Ramdane M'hamdi	*Professeur à l'université de Batna*	Examinateur
M^{r} lakhdar Dehimi	*Professeur à l'université de Biskra*	Examinateur

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

Ma mère,

Mon père,

Mes frères et mes sœurs,

Tous mes amis sans exception.

Bedda Naima

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Ce travail a été effectué sous la direction de monsieur ***Abdelhamid OUNISSI****, Professeur à l'Université de Batna. Je lui exprime particulièrement toutes mes reconnaissances pour m'avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.*

J'exprime mes sincères remerciements à monsieur ***Belgacem Bouzida Aissa****, Professeur à l'Université de Batna, d'avoir accepté de présider le Jury de cette thèse.*

Je remercie sincèrement monsieur ***lakhdar Dehimi*** *Professeur à l'Université de Biskra et monsieur* ***Ramdane M'hamdi*** *Professeur à l'Université de Batna d'avoir accepter de faire partie du Jury.*

Enfin j'exprime ma reconnaissance et ma sympathie à, mes collègues de magister, mes frères et à toute personne qui de prés ou de loin a rendu agréable mon séjour à Batna.

Sommaire

Introduction générale..... 1

Chapitre I

Les semiconducteurs- Silicium et composés III-V

I-1 Isolant, semi-conducteur et conducteur..... 2

I-2 Différents types de dopage..... 2

I-3 Courants dans les semi-conducteurs..... 3

I-4 Semi-conducteurs usuels 4

I-5 Le Silicium en électronique 5

I-5-1 Différents types de dopage..... 5

I-5-2 Obtention d'un silicium de qualité électronique..... 6

I-5-3 Silicium et Rendement des cellules solaires..... 7

I-6 Les semi-conducteurs III-V..... 10

I-6-1 Les matériaux semi-conducteurs III-V..... 10

I-6-2 Les composes III-V……..... *11*

I-6-3 La structure cristallographique des composes III-V..... 13

I-6-4 Discontinuité de bandes aux hétérojonctions "offset" ΔE_C 14

I-6-5 Nature de la bande de conduction du matériau $Ga_{(1-x)}Al_xAs$..... 16

I-6-6 Modèle d'Anderson d'une hétérojonction..... 17

Chapitre II

La conversion photovoltaïque

II-1 Introduction 21

II-2 Soleil et son énergie inépuisable..... 22

II-3 Nombre de masse (AM) 22

II-4 Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque 23

II-5 La conversion photovoltaïque 26

II-6 Cellules photovoltaïques 27

II-7 Modèle équivalent 29

II-8 Paramètres essentiels caractérisant une cellule solaire..... 32

II-9 Cellule solaire GaAs / GaAlAs..... 36

Sommaire

Chapitre III

Logiciel de simulation PC1D

III-1 Introduction 40

III-2 Le PC1D..... 40

III-3 Les paramètre du dispositif (Device)..... 43

III-4 Les paramètre des régions..... 43

III-5 Les Paramètres d'excitation..... 44

*III-6 Visualisation d*es résultats..... *45*

III-7 Identification du matériau 45

III-8 Le fonctionnement du PC1D..... 46

III-9 Structure à simuler..... 47

Chapitre IV

Simulation et Résultas

IV-1 Introduction 49

IV-2 Simulation d'une cellule à base de silicium 50

IV-2-1 Cellule solaire de type n+ / p avec et sans texturation..... 50

IV-2-2 Effet de la température sur la cellule de type n+ / p avec et texturation 52

IV-2-3 Effet du dopage de l'émetteur..... *53*

IV-2-4 Effet du dopage de la base..... *54*

IV-2-5 Cellule n+ / p avec la couche arrière dopée p+..... 54

IV-3 Simulation d'une cellule solaire à base de GaAs et GaAlAs..... 55

IV-3-1 Cellule solaire à base de GaAs avec fenêtre..GaAlAs. 55

IV-3-2 Cellule solaire à base de GaAs sans fenêtre..... 58

IV-3-3 Cellule solaire à hétérojonction GaAlAs/GaAs sans fenêtre..... 59

IV-4 Conclusion..... 62

Conclusion générale..... 63

Introduction générale

Il y a une cinquantaine d'années, l'industrie des semi-conducteurs s'est développée autour de matériaux tels que le Silicium. Et au cours des deux dernières décades des efforts de recherche importants ont été développés dans le monde pour réaliser des cellules solaires essentiellement à base de silicium et des matériaux III-V [1,2,3], produisant le kilowattheure à un prix concurrentiel par rapport aux autres sources d'énergie (pétrolière, nucléaire...).

Les cellules solaires à base des matériaux III-V, ayant des paramètres cristallins voisins et peu de défauts, ont été largement utilisées, plus particulièrement aux applications spatiales, et ce à cause de leur rendement élevé par rapport à celles du Silicium et de leur faible dégradation face aux irradiations dans l'espace [2].

En électronique rapide et en optoélectronique, les propriétés du silicium sont insuffisantes (mobilités des porteurs relativement petites et transitions électroniques indirectes au seuil d'absorption optique). Dans de telles applications, les composés semi-conducteurs III-V sont préférables. Les propriétés de ces matériaux sont donc très intéressantes pour les performances de ces dispositifs [1,2].

La recherche dans le domaine photovoltaïque est motivée principalement par l'amélioration du rendement de conversion énergétique et par la réduction du coût de réalisation.

Les performances de la cellule peuvent être améliorées par optimisation des paramètres physiques internes pour assurer à la fois un courant de court-circuit, un facteur de forme et une tension au circuit ouvert élevés.

Dans ce travail nous proposons une étude des propriétés des matériaux Silicium et composés III-V, et une application par simulation par le logiciel PC1D, d'optimisation des cellules solaires à base des matériaux III-V.

Le plan de ce travail est partagé en quatre chapitres comme suit:

Le premier chapitre, décri les propriétés des matériaux semi-conducteurs Silicium et composés III-V, ainsi que des généralités sur la jonction PN et les hètèrojonctions.

Le deuxième chapitre, décri les différents phénomènes qui interviennent lors de l'absorption du spectre solaire par la cellule solaire, et le schéma électrique équivalent de base, ainsi que les paramètres qui caractérisent une cellule photovoltaïque.

Le troisième chapitre, décri *Logiciel de simulation PC1D et son utilisation.*

Enfin nous présentons au dernier chapitre, la description de la simulation numérique, les matériaux utilisés et les résultats obtenus dans cette étude avec leurs interprétations.

I-1 Isolant, semi-conducteur et conducteur

- ***Isolant*** : Un isolant est un matériau qui limite les échanges d'énergie entre deux systèmes. On distingue: les isolants électriques, les isolants thermiques, les isolants phoniques, les isolants mécaniques. Le contraire d'un isolant est un conducteur (électricité et chaleur), ou transmetteur (mécanique et son).

En électricité comme en électronique, un isolant, aussi appelé matériau diélectrique, est une partie d'un composant ou un organe ayant pour fonction d'interdire le passage de tout courant électrique entre deux parties conductrices. Un isolant possède peu de charges libres, elles y sont piégées, contrairement à un matériau conducteur où les charges sont nombreuses et libres de se déplacer sous l'action d'un champ électromagnétique.

La faculté d'un matériau à être isolant peut aussi être expliquée par la notion de bandes d'énergie: les bandes d'énergie les plus faibles (bande de valence) sont entièrement pleines. La hauteur de la bande interdite est grande ($\geq$ 5eV). il n'y a pas de niveaux d'énergie accessibles et pas de conduction (bandes de conduction vides).

- ***Conducteurs*** *:* la dernière bande occupée est partiellement remplie, il existe beaucoup de niveaux disponibles et la conduction est grande.

- ***Semi-conducteurs*** : le taux de remplissage de la dernière bande occupée est soit très faible soit très important. La hauteur de la bande interdite est faible. La conduction est faible est varie beaucoup avec la température.

I-2 Différents types de dopage

- ***Semi- conducteur dopé n***

Matériau dopé n est un semi-conducteur dont la concentration en électrons est largement supérieure à la concentration en trous. On y a introduit généralement du phosphore, de l'Arsenic ou encore de l'Antimoine. Par exemple le cas du Silicium dans lequel on introduit de l'Arsenic (possède 5 électrons sur la couche extérieure). On associe à l'Arsenic un niveau donneur Ed dans la bande interdite très proche de la bande de conduction. L'intérêt est que pour les températures supérieure à 0°K, les atomes d'arsenic sont ionisés ce qui revient à faire passer l'électron du niveau donneur à la bande de conduction. La concentration de donneurs

sera donc supérieure à la concentration d'accepteurs (N_d-N_a >0*)* ce qui correspond à la définition d'un semi-conducteur dopé n.

A la température ambiante pratiquement tous les donneurs sont ionisés et si la concentration en atomes donneurs est N_d, la densité de porteurs libres du semi-conducteur sera :

$$\boldsymbol{n = n_0 + N_d} \quad \text{(I-1)}$$

Où n_0 est la densité d'électrons générés par le processus de rupture de liaisons de covalence qui engendre des paires électrons-trous.

- ***Semi-conducteur dopé p***

Il s'agit d'un semi-conducteur dont la concentration en trous est largement supérieure à la concentration en électrons. On y a introduit généralement du Bore, de l'Aluminium, du Gallium ou encore de l'Indium, prenons le cas du Silicium dans lequel on introduit du Bore. On associe au Bore un niveau accepteur E_a dans la bande interdite très proche de la bande de valence.

De la même façon que pour le semi-conducteur dopé *n,* la concentration en trous du semi-conducteur dopé p sera : $\boldsymbol{p = p_0 + N_a}$ (I-2)

I-3 Courants dans les semi-conducteurs

Les courants dans le semi-conducteur résultent du déplacement des porteurs de charge, électrons et trous, sous l'action de différentes forces, l'origine de ces forces étant un champ électrique (courant de conduction) ou un gradient de concentration (courant de diffusion).

Le courant de conduction est le courant que l'on rencontre dans les métaux et qui est proportionnel au champ électrique [1]:

$$J_{Cn} = q.n.\mu_n.E \quad \text{(I-3)}$$

$$J_{Cp} = q.p.\mu_p.E \quad \text{(I-4)}$$

Ces relations sont valables pour des champs électriques suffisamment faibles pour que la vitesse des porteurs reste proportionnelle au champ. Le courant total est :

$$J_{tot} = q\left(n\mu_n + p\mu_p\right)E = \sigma.E \quad \text{(I-5)}$$

Ainsi, la conductivité σ(T) et la résistivité ρ(T), sont données par :

$$\sigma(T) = q\left(n\mu_n(T) + p\mu_p(T)\right) \quad \text{(I-6)}$$

$$\rho(T) = \frac{1}{q\left(n\mu_n(T) + p\mu_p(T)\right)} \quad \text{(I-7)}$$

Considérons un semi-conducteur dopé dont la concentration en trous varie suivant un axe x. La densité de courant de diffusion en un point d'abscisse x est:

$$J_{Dp} = -q.D_p \frac{dp(x)}{dx} \qquad \text{où} \qquad D_p = \mu_p \frac{kT}{q} \tag{I-8}$$

Dp est la constante de diffusion.

Les porteurs en excès tendent à se donner une concentration uniforme. Il en est de même dans le cas des électrons de concentration *n(x)* et on a:

$$J_{Dn} = q.D_n \frac{dp(x)}{dx} \qquad \text{où} \qquad D_n = \mu_n \frac{kT}{q} \tag{I-9}$$

Lorsque les deux phénomènes existent simultanément la densité totale de courant pour les électrons et les trous est donnée, en explicitant la relation de dépendance avec la température par :

$$J_n = q.n.\mu_n E + q.D_n \frac{dn}{dx} \tag{I-10}$$

$$J_p = q.p.\mu_p E - q.D_p \frac{dp}{dx} \tag{I-11}$$

Ces relations sont valables pour des champs électriques suffisamment faibles pour que la vitesse des porteurs reste proportionnelle au champ. Le courant total est [2]:

$$J_{tot} = J_n + J_p \tag{I-12}$$

Les constantes Dp et Dn sont liées aux mobilités μ_n et μ_p par la relation d'Einstein :

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} = V_T \tag{I-13}$$

I-4 Semi-conducteurs usuels

Les semiconducteurs usuels sont essentiellement constitués d'éléments de la colonne IV et des colonnes voisines du tableau périodique de Mendeleev. On en distingue plusieurs types

- ***Les semiconducteurs élémentaires*** *:* sont des cristaux constitués d'un seul élément chimique. On rencontre des structures cristallines dites "simples" si l'élément constituant est de la colonne IV. Les deux éléments les plus importants pour l'électronique sont le silicium (Si) et le germanium (Ge), qui se cristallisent en engageant des liaisons covalentes. Le premier est l'élément le plus utilisé dans l'industrie des composants.

Le germanium, quant a lui, à été largement utilisé lors de fabrication des premières diodes et des premiers transistors, mais a été ensuite remplacé par le silicium. Il est néanmoins utilisé dans quelques applications (détection infrarouge, hétérostructures, . . .).

On rencontre également des semi-conducteurs dits "élémentaires complexes" comme le sélénium (Se, colonne VI), notamment employé pour ses propriétés photovoltaïques. Cet élément se cristallise selon une structure différente de celle du Si, mais toujours avec des liaisons à prédominance covalente.

- ***Les semiconducteurs composés*** : sont constitues de plusieurs éléments. Par exemple, les composés binaires peuvent être constitues de deux éléments distincts de la colonne IV (SiC, SiGe), d'éléments des colonnes III et V (composés III-V tels que le GaAs et le GaN) ou encore des éléments des colonnes II et VI (composés II-VI tels que le ZnS et le CdS). Les composés GaAs, GaP et GaN sont fréquemment utilisé dans la fabrication de diodes électroluminescentes. Enfin, on peut également trouver des alliages de types ternaire (AlGaAs) et quaternaire (GaInAsP), employés par exemple dans la fabrication de diodes lasers.

I-5 Le silicium en électronique

La plus grande partie des composants électroniques (cellules solaires, transistors, diodes et puce en général) sont réalisés en Silicium. Le silicium est le matériau de base de 90% de l'industrie micro-électronique.

En effet, il est possible de réaliser des plaques de Silicium monocristallin de très grande pureté et à faible coût.

Le silicium, est le semi-conducteur utilisé dans la quasi-totalité des cellules produites jusqu'à maintenant. Sous trois formes : monocristallin, polycristallin et amorphe.

I-5-1 Différents types du silicium

Le silicium utilisé pour les cellules photovoltaïques doit être d'une grande pureté, quelque soit sa forme. Comme beaucoup d'autres éléments, le silicium peut exister à température ambiante sous différentes structures, dont les deux extrêmes sont respectivement l'état amorphe et l'état cristallin (monocristallin ou multicristallin).

- ***Le silicium monocristallin***

La réalisation de nombreux dispositifs commence par la production d'une matière monocristalline de grande pureté. En particulier la fabrication de puces microélectroniques nécessitent des substrats monocristallins semi-conducteurs. La fusion de zone et le tirage en creuset (méthode de Czochralski) [3], sont les deux méthodes utilisées couramment pour obtenir des lingots monocristallins de grande pureté longs de plusieurs mètres et d'un diamètre allant jusqu'à 300mm [4], [5].

- ***Le silicium polycristallin***

On peut réaliser d'un seul coup un lingot de grandes dimensions par refroidissement directionnel d'une masse de silicium en fusion. Le lingot obtenu est composé de plusieurs gros cristaux, séparés par des joints de grain. Ce matériau, moins homogène que le silicium monocristallin, a de ce fait un rendement énergétique légèrement moins bon dans le commerce, mais sa fabrication est plus facile. Ces lingots de silicium multicristallin doivent être coupés en tranches de 200 à 400 mm.

- ***Le silicium amorphe***

Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, vitreuse, mais il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieur au silicium cristallin [3]. Une fine couche de 0,3 mm est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible.

Dans cette technologie, le silicium est produit directement sur une plaque de verre à partir du gaz silane SiH4. En fait, les plaques de verre sont placées dans une enceinte chauffée où l'on fait le vide, puis du silane est injecté et décomposé par une décharge radiofréquence; le silicium libéré se dépose alors sur les plaques. La présence d'hydrogène est également nécessaire pour la qualité du matériau (il limite le nombre de défauts en saturant les liaisons pendantes de silicium présentes à cause de la structure désordonnée). L'adjonction des dopants est réalisée par ajout de gaz la phosphine (PH_3) ou le diborane B_2H_6 au silane.

Avec ce type de matériau peu coûteux par rapport aux autres formes de silicium, on a de faibles rendements et des problèmes de stabilité apparaissent rapidement quand on l'expose au soleil et aux intempéries [6].

I-5-2 Obtention d'un Silicium de qualité électronique

Le silicium existe essentiellement sous forme oxydée (silice, sable) et nécessite d'une part d'être réduit et d'autre part, d'être purifié afin d'obtenir un matériau de qualité électronique.

- ***Réduction de la silice***

On réalise une électrolyse dans un four à arc pour atteindre une température assez élevée pour faire fondre la silice. La silice est mélangée à du carbone. Réaction principale :

$SiO_2+2C \rightarrow Si+2CO$ (I-14)

Le silicium obtenu a une pureté de 98%, il faut encore le purifier pour obtenir un matériau de qualité électronique.

- ***Purification du silicium***

La purification chimique consiste à faire une distillation à partir de $SiHCl_3$ (trichlorosilane) liquide à température ambiante. $Si(solide)+ 3HCl \rightarrow SiHCl_3 +H_2$ (gaz) (I-15)

Le rendement de la réaction est égale à 90%, c'est une première purification car des précipités chlorés ne se mélangent pas au trichlorosilane. Puis $SiHCl_3$ (qui a une température d'ébullition faible: 31.8°C) est purifié par distillation fractionnée, il est plus volatil que les chlorures des principales impuretés. Ce trichlorosilane purifié est ensuite réduit pour redonner du silicium. $SiHCl_3$ (gaz) $+H_2$(gaz) $\rightarrow$ Si (solide) $+3HCl$ (I-16)

Après la distillation, la teneur en impuretés actives est inférieure à 1ppm, le silicium est alors de qualité électronique. Le silicium pur obtenu (donc intrinsèque) doit maintenant subir un double traitement à la fois d'enrichissement en matériau dopant, afin d'en faire du silicium extrinsèque de type p ou n comportant une proportion d'une impureté connue et d'obtenir de plus un monocristal convenablement orienté. En effet, le silicium précédemment obtenu était polycristallin, il y a nécessité de le transformer en monocristallin pour améliorer sa conductivité. Cette opération est réalisée dans un four à tirage selon la procédure de Czochralski [3].

I-5-3 Silicium et Rendement des cellules solaires

Les matériaux semi-conducteurs ont la propriété de transformer la lumière en électricité. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque.

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique.

Types de cellules:

Généralement on distingue trois générations de cellules photovoltaïques en fonction des développements technologiques

- ***1ère génération***

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction p-n et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et polycristallin. Ces dernières ont un rendement inférieur par rapport aux premières, mais ont un coût de fabrication moins élevé.

- ***2ème génération***

Les couches minces ("thin films") constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque. Dans cette génération, on distingue le silicium amorphe (a-Si), le disélénium de cuivre indium (CIS), le tellurure de cadmium (CdTe), entre autres. Dans le cas de couches minces, la couche de semi conducteur est directement déposée sur un substrat (par exemple du verre). La production de ce type de cellules est moins coûteux que la première génération puisqu'elle consomme moins de matériau semi-conducteur et ne nécessite pas de passer par l'étape de transformation du silicium en "wafers". Le problème des cellules de seconde génération est le rendement moindre de ce type de cellules (6-7% et 14% en labo) et la toxicité de certains éléments (cadmium) pour leur fabrication. Cependant, cette seconde génération a beaucoup d'avantages pour des marchés de niche comme les applications en modules flexibles, avec de faibles illuminations ou avec des températures élevées.
Le disélénium de cuivre Indium (CIS) qui est au stade de la production industrielle et offre un rendement de 10 à 12 % pour ses modules commerciaux ne présente pas les problèmes de toxicité du cadmium [7].

- ***3ème génération***

La troisième génération vise à passer la limite maximale de rendement des cellules actuelles, qui est d'environ 30%. Plusieurs concepts sont envisagés pour atteindre cet objectif : superposition de multiples cellules (utilisant des bandes d'énergie différentes) cellules à concentration utilisation des photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule cellules à électrons chauds produisant plus de pairs électron/trou pour des énergies supérieures à la bande d'énergie conversion des photons pour ajuster le spectre de la lumière solaire aux caractéristiques du semi-conducteur.

- ***Rendement des cellules:***

Le rendement d'une cellule est le rapport entre l'énergie électrique produite par cette cellule et l'énergie lumineuse reçue à la surface de la même cellule.

Le rendement d'une cellule photovoltaïque serait d'environ 85% si chaque photon pouvait transférer toute son énergie à un électron. Cependant, ce n'est pas le cas vu que le transfert d'énergie peut se faire uniquement selon la bande d'énergie propre à chaque semi-conducteur. Ainsi, les photons avec une énergie inférieure à cette valeur type ne pourront participer à l'effet photovoltaïque et leur énergie sera convertie en chaleur. De plus, les photons avec plus d'énergie ne peuvent transmettre que l'énergie propre au semi-conducteur et tout excès est dès lors perdu. Dans les cellules actuelles, ces 2 effets limitent le rendement théorique des cellules à 50% [7].

Type	***Rendement cellule (en labo)***	***Module (en labo)***	***Module (commercial)***	***Niveau de développement***
1ère génération				
Silicium monocristallin	***24,70%***	***22,70%***	***12-20%***	***Production industrielle***
Silicium polycristallin	***20,30%***	***16,20%***	***11-15%***	***Production industrielle***
2e génération				
Silicium amorphe	***13,40%***	***10,40%***	***5-9%***	***Production industrielle***
Silicium cristallin en couche mince		***9,40%***	***7%***	***Production industrielle***
Source : Systèmes solaires, le journal des énergies renouvelables, numéro Hors-série spécial recherche solaire - Juillet 2006 (ref 10001).				

Tableau I-1. Rendement et niveau de développement des cellules solaires à base de Silicium.

Dans le cas des cellules solaires réalisées à partir du silicium, ce sont les cellules solaires au silicium monocristallin qui offrent le meilleur rendement (19%), suivies par celles au silicium polycristallin (15%). Le rendement des cellules au silicium amorphe ne dépasse pas 9% et diminue sensiblement avec le temps.

Les cellules, combinées en série et en parallèle pour obtenir la tension et l'ampérage voulu, sont encapsulées entre une plaque de verre et un coffrage métallique pour former des "modules" photovoltaïques. Cependant, les cellules peuvent également être intégrées dans la structure même d'un bâtiment : entre des parois vitrées, ce qui permet de créer des jeux

d'ombre en fonction de l'espacement des cellules, ou dans des tuiles du toit. Ceci offre aux architectes de nouvelles possibilités esthétiques. Ces modules, appelés plus couramment panneaux ou capteurs convertissent donc directement, et sans pièce mobile, l'énergie solaire en électricité. Leur rendement énergétique, de 10 à 18 %, n'est pas du tout ridicule lorsqu'on sait que celui d'une centrale thermique traditionnelle, brûlant du charbon ou du fioul, ne dépasse guère 35%, celui d'un groupe électrogène tourne autour de 25%.
Le développement de cette filière n'est donc pas freiné uniquement par son rendement mais aussi par son coût.

I-6 Les semiconducteurs III-V

Après les spectaculaires résultats enregistrés dans la technologie silicium dans l'électronique et en particulier dans le domaine de la micro-électronique, la recherche de composants électroniques présentant des propriétés de transport supérieures à celles du silicium, conduit la plupart des grands laboratoires de recherches à s'intéresser à des nouveaux matériaux et en particulier les composés semiconducteurs III-V.
C'est alors qu'une nouvelle classe de matériaux fait son apparition, basés sur la création d'un potentiel dans un cristal par :

- la modulation du dopage.
- la variation de composition d'un alliage.
- la combinaison des deux méthodes précédentes.

I-6-1 Les matériaux semi-conducteurs III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la III colonne et d'un élément de la V colonne de la classification périodique de Mendeliev. Le tableau I-2 regroupe un extrait de cette classification (les chiffres en haut et bas représentent respectivement le nombre atomique et la masse atomique). Ainsi de nombreux composés binaires peuvent être réalisés. On peut obtenir un semi-conducteur si la somme des électrons des deux espèces est égale à 8 électrons.

III	IV	V
${}^{5}_{10,81}B$	${}^{6}_{12,01}C$	${}^{7}_{14,01}N$
${}^{13}_{26,98}Al$	${}^{14}_{28,09}Si$	${}^{15}_{30,97}P$
${}^{31}_{69,74}Ga$	${}^{32}_{72,59}Ge$	${}^{33}_{74,92}As$
${}^{49}_{114,82}Sn$	${}^{50}_{118,69}Sn$	${}^{51}_{121,75}Sb$

Tableau I-2 Extrait de la classification périodique des éléments.

Par exemple : - Ga : le nombre d'électron de valence est 3 électrons.

- As : le nombre d'électron de valence est 5 électrons.

Donc GaAs est un semi-conducteur car la somme des électrons des deux espèces (Ga et As) est égale à 08 électrons. Telle que (GaAs) il satisfait à la condition du Bragg ($2d \sin\theta = n\lambda$), qui représente la loi de déplacement des électrons.

I-6-2 Les composés III-V

- ***Les composés binaires***

Parmi tous les composés binaires possibles, tous n'ont pas le même intérêt potentiel. L'étude de leurs propriétés, et en particulier de la structure de bandes montre que les éléments les plus légers donnent des composés dont laquelle la bande interdite est large et indirecte, et dans laquelle la masse effective des électrons est élevée.

Les composés contenant du bore, de l'aluminium ou de l'azote entrent dans cette catégorie; ils ont en général peu d'intérêt pour l'électronique rapide [2], qui demande des semi-conducteurs à forte mobilité de porteurs comme l'optoélectronique où une structure de bande directe est nécessaire pour que les transitions optiques soient efficaces [2].

A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le thallium ou le bismuth donnent des composés à base de Galium (GaAs, GaSb) ou d'indium (InP, InAs, InSb) dont les propriétés sont les plus intéressantes.

- ***Les composés ternaires et quaternaires :***

L'intérêt pratique des semi-conducteurs III-V est encore considérablement renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre élément de la même colonne. On sait par exemple obtenir des alliages ternaires, ou quaternaires qui sont identifié de la façon suivante :

ternaires s'il y a substitution de 2 atomes sur l'un des sous réseaux, soit $A_xA'_{(1-x)}B$. Exemple $Ga_xIn_{(1-x)}P$, lorsque la composition exacte importe peu, on écrit tout court GaInP .

quaternaires 1+3 s'il y a substitution de 3 atomes sur l'un des sous réseaux

soit $A_xA'_yA''_{(1-x-y)}B$ exemple $Ga_xIn_yAl_{(1-x-y)}As$

quaternaires 2+2 s'il y a substitution de 2 atomes sur chacun des deux sous réseaux soit $A_xA'_{(1-x)}B_yB'_{(1-y)}$. exemple $Ga_xIn_{(1-x)}P_yAs_{(1-y)}$.

Naturellement, selon le cas, la solution solides est ternaires ou quaternaire.

La plupart des solutions solides ainsi réalisées sont complètes, la loi de Vegard (relation linéaire entre le paramètre de réseau et la composition) est approximativement suivie, et on observe une évolution progressive et régulière des propriétés (dont la bande interdite et les paramètres cristallins) en fonction du taux de substitution. La figure (I-1) montre les bandes interdites Eg des principaux composés III-V en fonction des paramètres cristallins [8],[9]. En continu : bandes interdites directes, en tirets : bandes interdites indirectes; les discontinuités sont dues au changement de structures.

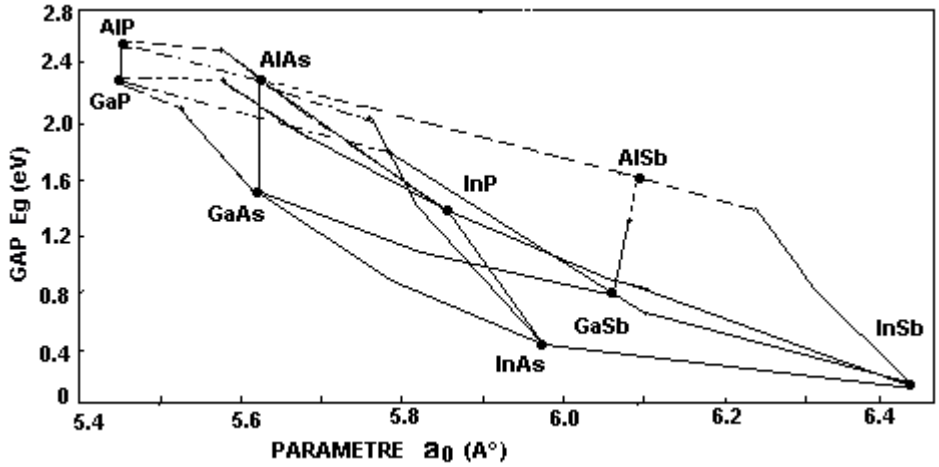


Figure I-1 Bandes interdites des principaux composés III-V et paramètres cristallins [8],[9].

Ce diagramme montre qu'il est possible d'obtenir des matériaux dont la largeur de bande interdite est variable, et donc les propriétés optiques, varient dans une large gamme.

Il existe cependant une contrainte importante pour la fabrication de ces matériaux, qui sont réalisés en couches minces par croissance épitaxie sur un substrat binaire, le paramètre cristallin doit être très proche de celui du substrat. Le diagramme de la figure I-1, permet de connaître la composition de tout alliage ternaire susceptible d'être épitaxie en couche mince sur des substrats binaires.

Des déviations sont observées quand les rayons atomiques sont nettement différents, mais ces dernières années ont apporté une version beaucoup plus optimiste du problème : on s'est en effet aperçu que des accords de maille considérables peuvent être tolérés et ne conduisent pas à des dislocations, si l'on se borne à des couches très minces. C'est ainsi que les systèmes contraints GaAs/GaInAs, GaAS/GaInAs/GaAlAs ont pu être réalisés avec une excellente qualité [1].

La raison scientifique principale qui motive l'intérêt croissant pour ces composés est donc le contrôle de la structure de bande électronique, et par conséquent l'élargissement des

limites de réalisation d'hétérostructures de grandes qualités, par profit de l'évolution des techniques de croissance épitaxiale.

I-6-3 La structure cristallographique des composés III-V

La plupart des matériaux III-V se cristallisent dans la structure sphalérite dite "Zinc Blende" présentée sur la figure (I-2). Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant, est constituée de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées, l'un étant constitué des atomes de l'élément III, l'autre des atomes de l'élément V [8,10,11,12] .
Ces deux sous-réseaux sont décalés l'un par rapport à l'autre le long de la diagonale du cube, d'une quantité ($\mathbf{a_0}/4$, $\mathbf{a_0}/4$, $\mathbf{a_0}/4$), $\mathbf{a_0}$ étant le paramètre cristallin, c'est-à-dire la langueur de l'arête du cube élémentaire.

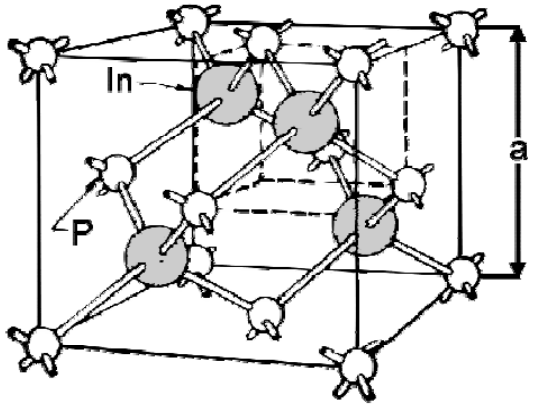


Figure I-2 Réseau cristallin dans la structure Zinc-blende.

De ce fait dans les matériaux III-V, les liaisons ne sont pas simplement covalentes comme dans le Silicium. Elles reposent sur le transfert d'électrons des atomes du groupe V sur ceux du groupe III. Cette répartition est à l'origine du caractère partiellement covalent des liaisons (semi-conducteur polaires). Cette composante ionique de la liaison est importante, elle se manifeste par la présence de moments dipolaires électriques qui interagissent avec le rayonnement électromagnétique de grande longueur d'onde, au même titre qu'il y a interaction entre les cristaux ioniques et la lumière infrarouge [13].

- Réseau réciproque. La zone de Brillouin

Les fonctions d'ondes électroniques et les énergies correspondantes sont fonction du vecteur d'onde de l'électron. Ainsi la structure de bandes d'énergie du semi-conducteur doit être représentée dans l'espace réciproque et dans les différentes directions des vecteurs d'onde *K*.

Le réseau réciproque associe à la structure de type zinc blende est cubique centré. Sa maille élémentaire qui correspond à la première zone de Brillouin à la forme d'un octaèdre tronqué par les six faces d'un cube. Figure I-3.

Elle présente un centre d'un symétrique à l'origine (noté G) et des axes de symétrie:

Les axes <100> à symétrie d'ordre 4(Δ)

Les axes <111> à symétrie d'ordre 6(Λ)

Les axes <011> à symétrie d'ordre 2(Σ).

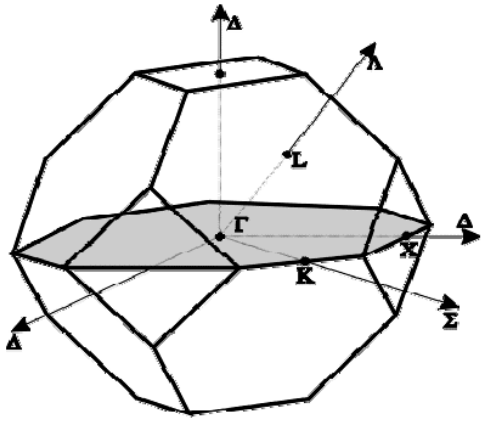


Figure I-3 Première zone de Brillouin d'un cristal Zinc blende [8, 11,12].

Les points de rencontre de chacun de ces axes avec les frontières de la zone de Brillouin jouent un rôle essentiel dans la théorie des bandes. On les note généralement de la manière suivante:

Points X de cordonnées (2π/a, 0, 0) sur les axes <100>.

Points L de cordonnées (π/a, π/a, π/a) sur les axes <111>.

Points K de cordonnées (0, 3π/2a, 3π/2a) sur les axes <011>.

La forme et le volume de la zone de Brillouin ne dépendent que de la géométrie du réseau de Bravais, sans égard à la composition chimique ou au nombre d'atomes dans la cellule unitaires. La zone de Brillouin est une cellule unitaire primitive de réseau réciproque d'importance fondamentale pour l'étude des propriétés électroniques des cristaux, en particulier dans les semi-conducteurs [13].

I-6-4 Discontinuité de bandes aux hétérojonctions "offset" ΔE_C :

Plusieurs types d'hétérojonction sont envisageables figure I-4; le système le plus utilisé actuellement GaAlAs/GaAs est du type I.

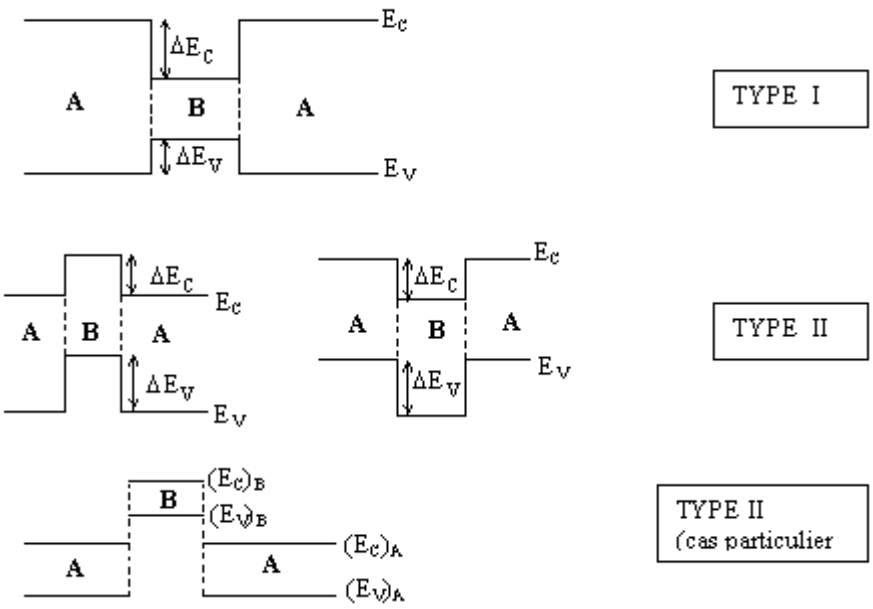


Figure I-4 : Divers types d'hétérojonctions définis par la position relative des Bandes des semi-conducteurs A et B ; le type I est le plus utilisé [14),[15].

Les discontinuités de bandes (ou "offsets" de bandes) aux hétérojonctions (ΔE_C, ΔE_V) sont certainement les paramètres à la fois les plus importants mais aussi les plus difficiles à déterminer. En fait le problème est très complexe, d'autant plus que la dépendance éventuelle des "offsets" de bandes en fonction de la technologie de croissance, de l'orientation cristallographique, ou même de la séquence de croissance est peu connue.

Les principales théories permettant de prédire ces discontinuités de bandes sont des théories dites "linéaires" ; elles supposent qu'il existe une énergie absolue, spécifique, associée à chaque bord de bandes de tout semi-conducteur. Les "offsets" de bandes sont alors simplement les différences entre les énergies absolues de chaque bande pour chacun des deux semi-conducteurs. Par exemple pour la bande de conduction :

$$\Delta E_C\,(A/B) = E_C\,(B) - E_C\,(A). \qquad \text{(I-17)}$$

En fait cette hypothèse de linéarité est bien évidemment une approximation et on devait écrire : $\Delta E_C\,(A/B) = E_C\,(B) - E_C\,(A) + \delta(A/B)$. (I-18)

Où $\delta(A/B)$ est une correction ne pouvant être exprimée linéairement en fonction des propriétés individuelles des semi-conducteurs A et B, mais est une caractéristique propre à la combinaison A/B.

Compte tenu de l'hypothèse de linéarité, la propriété de transitivité des discontinuités de bandes aux hétérojonctions se déduit immédiatement, et l'on a :

ΔE_C (A/C) = ΔE_C (A/B) + ΔE_C (B/C). (I-19)

Cette règle, couramment admise, est cependant difficile à vérifier expérimentalement ; elle à été très bien vérifiée sur certaines hétérostructures. Mais la détermination expérimentale des discontinuités de bandes aux hétérostructures est toujours un problème d'actualité et ce même pour des systèmes bien connus comme le cas de l'hétérostructure GaAlAs/GaAs.

I-6-5 Nature de la bande de conduction du matériau $Ga_{(1-x)}Al_xAs$:

Pour que deux matériaux puissent former une *bonne* hétérojonction, il est d'abord nécessaire que les paramètres de maille soient aussi voisins que possible. A cet effet, le matériau $Ga_{(1-x)}Al_xAs$ est très intéressant car, lorsque x varie de 0 à 1, c'est à dire lorsque l'on passe de GaAs à AlAs, la structure de bande passe d'un gap direct de valeur 1.43 eV à un gap indirect de valeur 2.16 eV, alors que la constante de maille passe de 5.653 A° à 5.661 A°, soit une variation < 0.2%.

Ainsi il est possible de faire croître toutes les compositions sur GaAs avec un accord de maille convenable [13].

La constante de maille et les bandes d'énergies en fonction de la composition (x) de l'aluminium sont données par [12], [16] :

Constante de maille (en A°) $a = 5.6533 + 0.0078x$ (I-20)

Bande interdite (en eV) $Eg = 1.424 + 1.155x + 0.37x^2$. (I-21)

Affinité électronique (en eV) $$\chi = \begin{cases} 4.07 - 1.1x & 0 \le x < 0.44 \\ 3.64 - 0.14x & 0.44 < x \le 1 \end{cases}$$ (I-22)

Discontinuité de Ec (en eV) $$\Delta Ec = \begin{cases} 0.67x + 0.27x^2 & 0 \le x < 0.44 \\ 0.475 - 0.31x & 0.44 < x \le 1 \end{cases}$$ (I-23)

Discontinuité de Ev (en eV) $$\Delta Ev = \begin{cases} 0.413x + 0.166x^2 & 0 \le x < 0.44 \\ 0.413x + 0.166x^2 & 0.44 < x \le 1 \end{cases}$$ (I-24)

Les deux figures (I-5) et (I-6) illustrent la nature, et la variation du minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence en fonction de la composition de l'aluminium (x) du composé ternaire $Ga_{(1-x)}Al_xAs$, et son effet sur les vallées Γ, L et X .

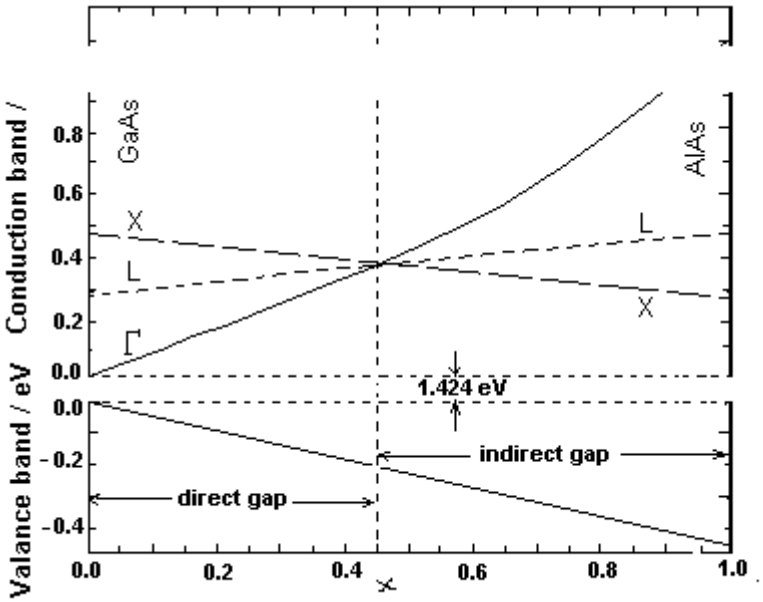


Figure I-5 : Variation du minimum de la bande de conduction, et le Maximum de la bande de valence du composé $Al_xGa_{(1-x)}As$ en fonction de (x) [15].

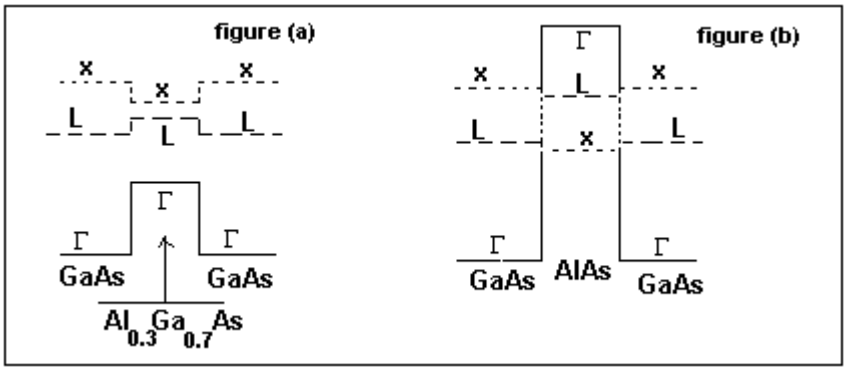


Figure I-6 barrière et puits dans l'hétérojonction $GaAS/Al_xGa_{(1-x)}As$ [15] :

Cas où x = 0.3 et la vallée Γ est la barrière la plus basse.

Cas où x = 1 et la vallée X est la barrière la plus basse.

I-6-6. Modèle d'Anderson d'une hétérojonction

Ce modèle simple proposé par Anderson (1962) [18], est basé sur l'étude d'une hétérojonction à partir du diagramme des bandes d'énergies dans la structure, il suppose l'hétérojonction idéale, à savoir abrupte et dépourvue de charges d'interface, dues par exemple à un désaccord des mailles cristallines, c'est-à-dire le courant est entièrement dû à l'injection de porteurs au dessus des barrières existantes dans les bande de conduction, et de valence après jonction des semi-conducteurs considérés.

Soient S.C1 et S.C2, deux semi-conducteurs, le premier de type (n), et le second de type (p), caractérisés par les affinités électroniques χ_1 et χ_2, les gaps (E_{G1}) et (E_{G2}), et les travaux d'extraction φ_1 et φ_2; en l'absence de tout contact, les diagrammes énergétiques dans chacun des semi-conducteurs, sont représentés sur la Figure I-7. Les deux semi-conducteurs étant indépendants, la distribution des électrons dans chacun d'eux est indépendante de l'autre, de sorte que les distributions sont caractérisées par deux niveaux de Fermi différents E_{F1} et E_{F2} .

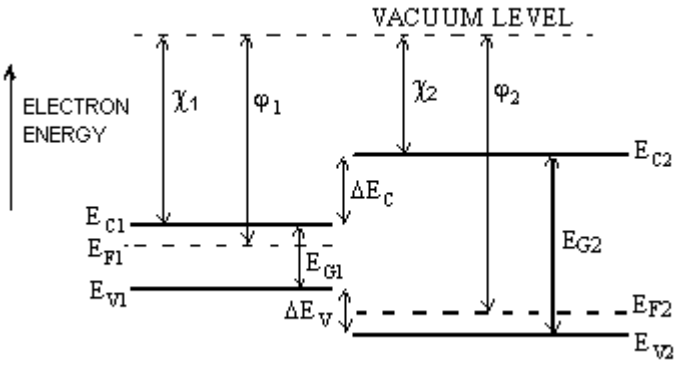


Figure I-7 : diagramme énergie bande de deux Semi-conducteurs isolés [17].

Lorsque les deux semi-conducteurs, sont mis en contact, il y a transfert des électrons du semi-conducteur à plus fort niveau de Fermi, vers le semi-conducteur à plus faible niveau de Fermi, de manière à réaliser l'alignement des niveaux de Fermi, cet échange se fait au voisinage de la jonction et fait apparaître une charge d'espace à laquelle est associée une barrière de potentiel qui arrête la diffusion des porteurs de charges et définit l'état d'équilibre.

L'alignement des niveaux de Fermi crée des discontinuités de bande de conduction ΔE_c et bande de valence ΔE_v , données par :

$$\Delta E_c = \Delta\chi \qquad \text{(I-25)}$$

$$\Delta E_v = \Delta E_G - \Delta\chi \qquad \text{(I-26)}$$

$\Delta\chi$ et ΔE_G représentent respectivement les différences d'affinité électronique, et de bande interdite entre les deux semi-conducteurs Figure I-8.

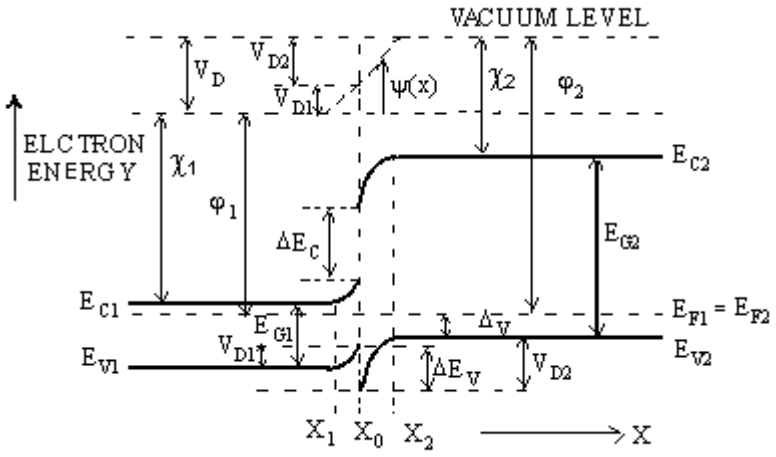


Figure I-8 : diagramme énergie bande d'une Hétérojonction à l'équilibre [18].

Quand on soumet cette hétérojonction à un voltage extérieur (Va) la résolution de l'équation de Poisson donne les largeurs de transition dans les deux semi-conducteurs :

dans la région du S.C 1 du type (n)

$$X0 - X1 = \frac{(2.Na2.\varepsilon_1.\varepsilon_2)^{1/2}.(Vd - Va)^{1/2}}{(q.Nd1.(\varepsilon_1.Nd1 + \varepsilon_2.Na2))^{1/2}} \qquad \text{(I-27)}$$

dans la région du S.C 2 du type (p)

$$X2 - X0 = \frac{(2.Nd1.\varepsilon_1.\varepsilon_2)^{1/2}.(Vd - Va)^{1/2}}{(q.Na2.(\varepsilon_1.Nd1 + \varepsilon_2.Na2))^{1/2}} \qquad \text{(I-28)}$$

La largeur totale de la région de transition est alors de :

$$W = X2 - X1 = \frac{(2.\varepsilon_1.\varepsilon_2.(Na2 + Nd1))^{1/2}.(Vd - Va)^{1/2}}{(q.Nd1.Na2.(\varepsilon_1.Nd1 + \varepsilon_2.Na2))^{1/2}} \qquad \text{(I-29)}$$

Les tensions supportées par chacune des substances semi-conductrices formant L'hétérojonction lors de l'application d'une tension extérieure (Va) sont données par :

$$Vn = Vd1 - V1 \qquad \text{(I-30)}$$

$$Vp = Vd2 - V2 \qquad \text{(I-31)}$$

Avec: Vn tension totale du S.C du type (n)

Vp tension totale du S.C du type (p)

V1 portion de Va supportée par le S.C 1 (type n)

V2 portion de Va supportée par le S.C 2 (type p).

On montre que

$$V1 + V2 = Va,\ \ V1 = K1.Va \quad \text{et} \quad V2 = K2.Va \tag{I-32}$$

Avec $K1 = 1 - K2$ et $$K2 = \frac{\varepsilon_1 . Nd1}{\varepsilon_{1.} . Nd1 + \varepsilon_2 . Na2} \tag{I-33}$$

La tension relative supportée par chacun des S.C est donnée par:

$$\frac{Vn}{Vp} = \frac{Na2.\varepsilon_2}{Nd1.\varepsilon_1} \tag{I-34}$$

Si la barrière des trous (ΔEv) est inférieure à celle des électrons (ΔEc), et si on suppose qu'il n'y a pas de collisions des trous dans la région (X0 - X1), et en considérant le flux des courants à l'équilibre on obtient la relation suivante :

$$A1.Exp(-(\Delta Ev - q.Vd1)/KT) = A2.Exp(-q.Vd2/KT) \tag{I-35}$$

Avec A1 et A2 des constantes dépendantes des niveaux d'impuretés et des masses effectives des porteurs.

Pour V2 >> KT et puisque la barrière des trous (ΔEv) est inférieure à celle des électrons (ΔEc), alors les porteurs qui dominent sont les trous et on montre dans ces conditions que la relation entre le courant et la tension est de la forme:

$$I = A.Exp(-\frac{q.Vd2}{KT}).(Exp(\frac{q.V2}{KT}) - Exp(-q.\frac{V1.}{KT})) \tag{I-36}$$

Avec $$A = Ct.S.q.Na2.(\frac{\Delta P}{\mathrm{T}p})^{1/2} \tag{I-37}$$

Ct : Coefficient de transmission

S : Surface d'injection

Cette relation est valable si le courant est constitué uniquement par les porteurs injectés d'un S.C vers l'autre.

La capacité de jonction par unité de surface associée à la région de transition est donnée par la formule suivante:

$$C = \left[\frac{q.\varepsilon_1.\varepsilon_2.Nd1.Na2}{2.(\varepsilon_1.Nd1 + \varepsilon_2.Na2).(Vd - Va)}\right]^{1/2} \tag{I-38}$$

II-1 Introduction

L'expression « énergie solaire » est généralement associée aux méthodes qui permettent d'utiliser cette énergie. Situé à 146 millions de kilomètres de la terre, le soleil est une source d'énergie extraordinairement puissante. Pour s'en faire une idée, il suffit de savoir que le soleil envoie 1,6 milliards de kilowatts à la terre chaque année. Toutefois, 40 % seulement de cette énergie atteignent effectivement la surface terrestre, le reste étant réfléchi par les couches supérieures de l'atmosphère. Ce pourcentage relativement faible que l'Homme peut récupérer et transformer en énergie utilisable est de plusieurs centaines de fois supérieur à la consommation d'énergie mondiale annuelle.

L'énergie solaire peut être utilisée de deux manières : comme source de chaleur et comme source d'électricité. Le processus de transformation du rayonnement solaire en électricité est dit « photovoltaïque » (ou PV).

L'électricité d'origine solaire photovoltaïque, est appelée à connaître un important essor qui devrait en faire l'une des sources majeures dans un bouquet énergétique nouveau au milieu du XXI^{e} siècle. Elle a fortement contribué au développement des systèmes spatiaux depuis 50 ans et joue un rôle déterminant dans les télécommunications et les télémesures. En effet, l'humanité est aujourd'hui en situation de surexploitation des capacités de la Terre et cette situation fait redouter un épuisement prochain des ressources naturelles.

Les ressources primaires fossiles massivement exploitées depuis deux siècles, sont non renouvelables au rythme de la consommation actuelle et sont sources d'émissions gazeuses à effet de serre induisant des modifications climatiques potentiellement dommageables.

Or, parmi toutes les ressources naturelles requises pour nos activités, le seul domaine dans lequel la Terre bénéficie d'un apport extérieur constamment renouvelé est précisément celui de l'énergie grâce au rayonnement reçu de son soleil. C'est particulièrement le cas de l'électricité photovoltaïque, vecteur aux très nombreuses qualités. Si cette filière énergétique récente fait figure de candidat exemplaire en théorie, sa valorisation pratique pose des problèmes très spécifiques, techniques mais aussi contextuels, dont certains ont freiné son développement avant la forte croissance observée actuellement. Son exploitation implique les contextes géophysique et énergétique, les propriétés physiques du rayonnement solaire, les propriétés technologiques des dispositifs de conversion photovoltaïque et finalement celles des systèmes et des applications qui exploitent efficacement cette énergie.

II-2 Le soleil et son énergie inépuisable

Le soleil est une gigantesque bombe thermonucléaire dont la puissance, émise sous forme de photons, représente un chiffre considérable: 3,82.1026 Watts. C'est le résultat de la combustion de 596 millions de tonnes par seconde d'hydrogène convertis en 592 millions de tonnes par seconde d'hélium. La perte, 4 millions de tonnes/seconde, se traduit sous forme de rayonnement gamma. Chaque cm² de sa surface émet une énergie de 6 kilowatts. Mais il n'arrive sur Terre que 5 milliardièmes (5.10^{-9}) de cette puissance.

Le rayonnement reçu par la Terre en incidence normale avoisine les 1400 W/m² avant d'aborder la couche atmosphérique. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre. La couche d'ozone, par exemple, absorbe une partie du rayonnement sur une large bande de l'ultraviolet au visible, et l'oxygène présente deux bandes étroites d'atténuation vers 690 et 760 nm. La vapeur d'eau enfin possède de nombreuses bandes d'absorption dans le visible et encore plus dans l'infrarouge. Le flux énergétique reçu au sol se réduit alors à 1000 W/m² avec un spectre décalé vers le rouge [19].

II-3 Nombre de masse (AM)

Pour tenir compte de l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire incident, on introduit un coefficient appelé nombre de masse (AM) défini par l'équation:

$$AM = 1/\cos(\theta) \qquad \text{(II-1)}$$

où θ est l'angle que fait le soleil avec son zénith (Figure II-1).

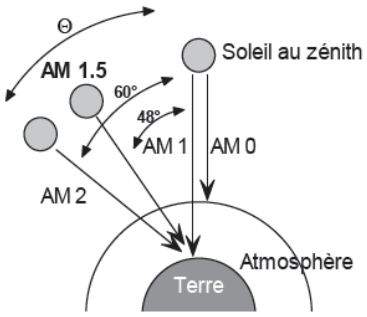


Figure II-1 Définition de la norme AM

Par définition, AM0 correspond aux conditions hors atmosphère.

Quand le soleil fait un angle de 48° par rapport au zénith, la lumière incidente est dite AM1.5.

Le nombre de masse d'air caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire (83.3 mW/cm² pour AM1.5) et de plus, sert de standard pour quantifier les performances de nouveaux dispositifs photovoltaïques.

Les conditions standards de caractérisation sont définis par les normes IEC-60904 de l'International Electrotechnical Commission (IEC) selon une distribution spectrale AM1.5 global (somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité 100mW/cm² et pour une température de cellule de 25°C.

Au sol, le rayonnement solaire a au moins deux composantes : une composante directe et une composant diffuse (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuages, sol) formant le rayonnement global. La Figure II-2 montre le spectre d'émission solaire sous AM1.5 global normalisé à 100 mW/cm² [19, 20].

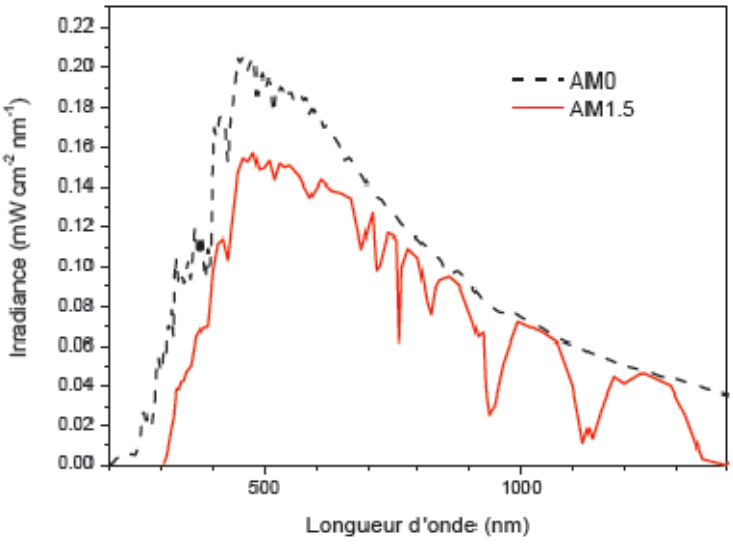


Figure II-2 Spectre d'émission solaire sous AM0 et AM1.5 [19,20]

II-4 Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque

Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentes dans chaque composant. La partie essentielle de la cellule solaire est la jonction (P-N) de deux régions semi-conductrices; cette jonction est appelée :

homojonction : si les deux régions font partie d'un même semi-conducteurs

hétérojonction : si les deux régions font partie de deux semi-conducteurs différents.

La structure d'une cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces est présentée sur la figure II-3.

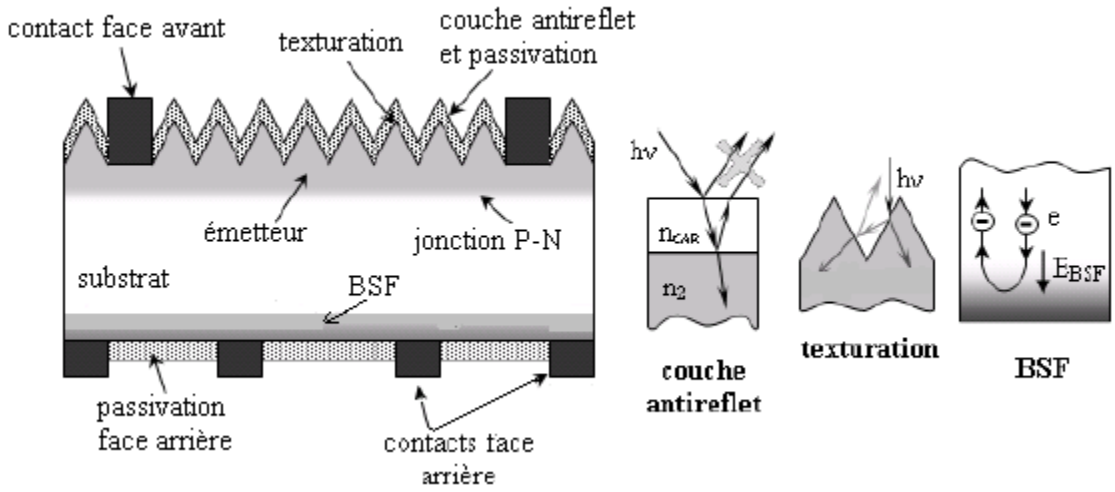


Figure II-3 Composition d'une cellule photovoltaïque [21].

- ***Passivation des faces avant et arrière***

La surface des semiconducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium (SiO2) et le nitrure de silicium hydrogéné (SiNx:H).

- ***Couche antireflet***

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) d'épaisseur (d_{CAR}) et d'indice de réfraction n_{CAR} est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces. Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{(2.N+1)}{4.n_{CAR}} \quad ; \quad N = 0, 1, 2, \ldots \qquad \text{(II-2)}$$

On obtiendra l'annulation des deux faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et l'interface CAR/semiconducteur (deux rayons réfléchis en opposition de phase). Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents)[21].

Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque : TiO2, SiO2, ZnS, MgF2, SiNx, etc [21,22].

- ***Texturation de la surface***

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique.

L'insertion sur la figure II-3 présente le principe de réflexions multiples propre à la texturation. Le relief de la surface entraîne une baisse de la réflexion en face avant : un rayon arrivant à incidence normale (par rapport au plan de la cellule) sur une pyramide sera réfléchi sur la face d'une pyramide adjacente, cette double réflexion sur les pyramides diminue le coefficient de réflexion totale, qui ne vaut plus R mais R^2. D'autre part, un rayon d'incidence normale sera transmis dans la cellule avec un angle de réfraction θ différent de 0°. Le trajet de ce rayon au sein du silicium sera donc augmenté d'un facteur $1/\sin\theta$ par rapport au cas d'une surface plane et perpendiculaire à l'éclairement, ce qui aura pour effet d'augmenter la part de photons absorbés par le matériau, la texturation de la surface entraîne un piégeage plus important de la lumière pénétrant dans la cellule. Sur la face arrière de la cellule, il existe un angle d'incidence critique θc à partir duquel le rayon est totalement réfléchi et prolonge son trajet au sein du semiconducteur, augmentant là aussi l'absorption des photons. En appliquant la loi de Descartes, on trouve que cet angle vaut 17° dans le cas du silicium dans l'air. Ce phénomène est particulièrement important dans le cas des cellules de faible épaisseur, et peut être renforcé par une texturation de la face arrière et/ou une couche antireflet sur cette même face.

Différents procédés sont utilisés pour texturer la surface du silicium : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, [23] acides [24]), texturation mécanique [25] (laminage à froid sous un peigne dentelé), texturation laser [25].

- ***Contacts face avant et arrière***

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique I=f(V) du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement [26].

Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multicristallin, les contacts sont généralement

réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées.

- ***Couche BSF***

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction P^+ / p) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée.

II-5 Conversion Photovoltaïque

- ***Effet photovoltaïque***

Découvert en 1839 par Henry Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Il repose sur la technologie des semi-conducteurs.

Lorsqu'un matériau semi-conducteur de gap **Eg**, est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons d'énergie **hν**, constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures de la bande de valence ont tendance à être " arrachés / décrochés " :

- Si **hν < Eg** l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau, l'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.
- Par contre, si **hν ≥ Eg** , une partie des électrons ne revient pas à son état initial et passent dans la bande de conduction et devenir libres, les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

Cet effet va engendrer au sein de la structure du semi-conducteur la création de paire électron-trou. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N de la jonction PN. Ainsi, une d.d.p entre les faces extérieures de la jonction est créée : la photopile est prête à fonctionner figure II-4.

Le terme photovoltaïque vient du grec " phos, photos " qui désigne la lumière et de " voltaïque ", mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité.

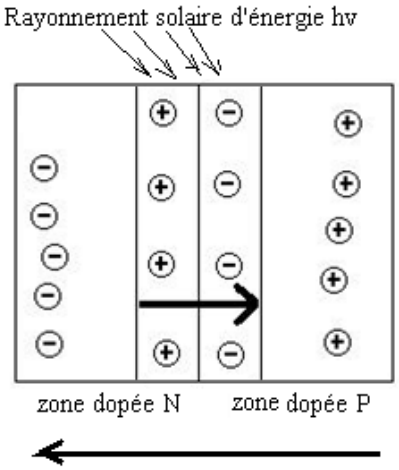


Figure II-4 Sous l'effet de la barrière de potentiel, les porteurs de charge excités sont repoussés sur les bords de la jonction, ce qui entraîne la création d'une tension à l'extérieur de la jonction PN.

II-6 Cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photo-sensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs, son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque.

En effet, une cellule solaire est constituée essentiellement d'une jonction N/P (figure II-5), de deux couches minces et dopées différemment :

• Pour la couche N, apport d'électrons périphériques

• Pour la couche P, déficit d'électrons.

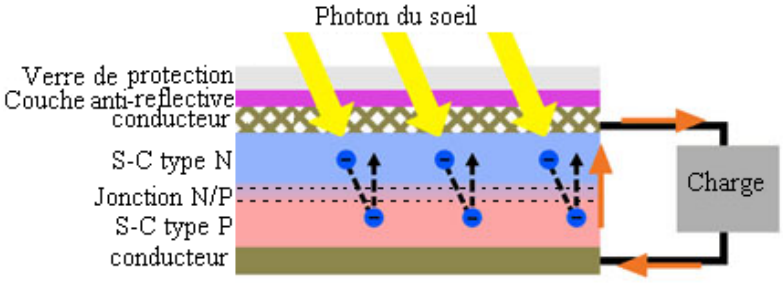


Figure II-5 : Schéma d'une cellule solaire élémentaire

Ces deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche n) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux.

Une couche anti-reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée et un verre de protection (totalement transparent).

- ***Principe***

Pour créer un courant électrique, il est nécessaire de dissocier les paires électrons -trous photogénérées et de les collecter dans un circuit électrique extérieur avant qu'elles ne se recombinent librement au sein du matériau. La séparation des paires électrons-trous est en général réalisée dans les cellules photovoltaïques par la création d'une barrière de potentiel dans le semi-conducteur. Les types de barrières les plus communes sont l'homojonction (jonction p/n dans le même semi-conducteur), hétérojonction (jonction p/n entre deux matériaux différents) et barrières Schottky (métal/ semiconducteur). Dans le cas des cellules photovoltaïques, l'homojonction par sur-dopage du silicium est la solution la plus utilisée. La cellule photovoltaïque homojonction est une jonction p-n de grande surface qui transforme le rayonnement solaire en électricité. La conversion photovoltaïque dans une cellule solaire repose sur

- l'absorption de la lumière et la génération des paires électron-trous et
- la diffusion et la séparation des paires électron/trous créées et leur renvois par le champ électrique de la jonction, vers les régions où elles seront majoritaires (figure II-6), c.-à-d. les électrons vers l'émetteur (région type N) et les trous vers la base (région type P).

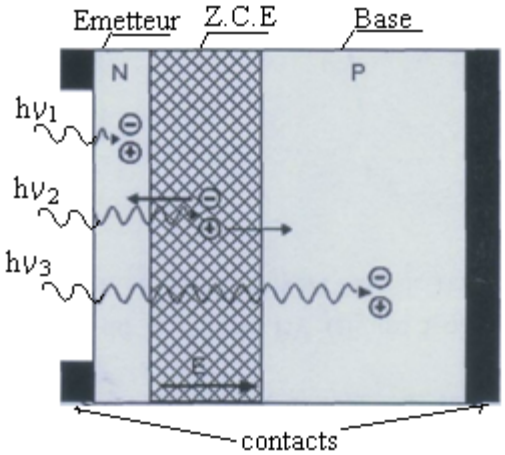


Figure II-6 Structure d'une cellule photovoltaïque éclairée

Considérons une jonction PN recevant un rayonnement monochromatique de fréquence ν, telle que hν > Eg. Si les photons incidents interagissent avec les électrons de la bande de valence en leurs communicant leur énergie, ceux-ci passent dans la bande de conduction laissant des trous dans la bande de valence.

Le rayonnement incident excite des paires électron-trou. Les électrons créés dans la région P et les trous engendrés dans la région N diffusent, seuls atteignent la zone de charge d'espace et les porteurs libérés de part et d'autres de la jonction à une distance inférieure à leur longueur de diffusion L_n des électrons *(L_p des trous)*; pris et accélérés par le champ électrique E ils traversent

la zone de transition. La région N reçoit des électrons et se charge négativement; la région P accepte des trous et devient positive. La figure II-7 représente la Jonction PN éclairée et chargée d'une résistance R_c.

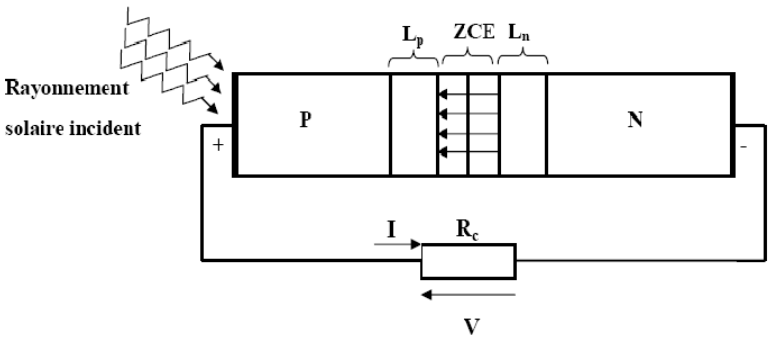


Figure II-7 Jonction PN éclairée et chargée d'une résistance R_c

Lorsqu'on relie les deux cotés de la jonction à une charge Rc le courant I la parcourt et une d.d.p V apparaît à ses bornes : $V=V_P - V_N = RI$, le courant traverse la jonction de N vers P, il est donc négatif. $I = I_{cc} - I_d(V)$ (II-3)

Avec:

I_{cc} : courant de court circuit.

I_d (V) : courant d'obscurité de la diode.

Eclairer la jonction revient à la polariser en direct, ce qui se traduit par une injection de porteurs minoritaires, tandis que la concentration des porteurs majoritaires n'est pas modifiée. Le courant I est dû à la diffusion des porteurs minoritaires par rapport à l'équilibre. La jonction PN éclairée est un convertisseur d'énergie électromagnétique en énergie électrique

II-7 Modèle équivalent

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant Iph, proportionnel à l'éclairement, ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes. Le courant I issu de la cellule s'écrit alors :

$$I = I_{ph} - I_{SC}\left(e^{\frac{q(U+R_S.I)}{KT}} - 1\right) - \frac{U+R_S.I}{R_{Sh}} \quad \text{(II-4)}$$

$$I_d = I_{SC}\left(e^{\frac{q(U+R_S.I)}{KT}} - 1\right) \quad \text{(II-5)}$$

Avec :

U : tension aux bornes de la cellule.

I_{ph} : photocourant, ou courant généré par l'éclairement.

I_{sc} : courant de saturation de la diode.

R_s : résistance série.

R_{sh} : résistance shunt.

k : constante de Boltzmann.

q : charge de l'électron.

T : température absolue de la cellule.

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque sous éclairement est approximé au niveau électrique par le schéma équivalent de la figure II-8.

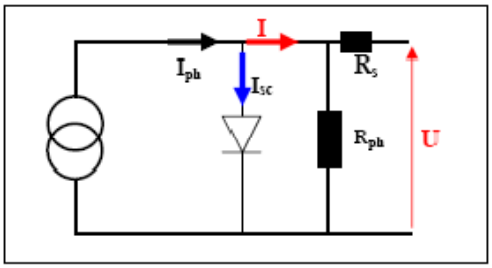


Figure II.8 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant I_{ph} généré par un éclairement.

Enfin, les deux résistances modélisent les pertes internes :

Résistance série Rs : modélise les pertes ohmiques du matériau.

Résistance shunt Rsh : modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

Idéalement, on peut négliger Rs.I devant U, puis travailler avec un modèle simplifié (figure II-9):

$$I = I_{ph} - I_{SC}\left(e^{\frac{qU}{KT}} - 1\right) - \frac{U}{R_{Sh}} \qquad \text{(II-6)}$$

Comme la résistance shunt est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut encore négliger le courant dévié dans Rsh. On obtient :

$$I = I_{ph} - I_{SC}\left(e^{\frac{qU}{KT}} - 1\right) \qquad \text{(II-7)}$$

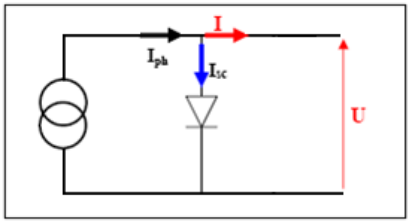


Figure II-9 Schéma équivalent simplifié

Le rendement Energétiques est définit quant à lui comme le rapport entre cette puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur le module photovoltaïque.

Si S est la surface de ce module (en m^2), et E l'éclairement (en W/m^2), le rendement énergétique s'écrit: $$\eta = \frac{P_m}{E.S} \quad \text{(II-8)}$$

P_m est la puissance maximum mesurée dans les conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire sous un spectre AM1.5, une température de 25°C, et un éclairement de 1000 W/m^2.

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est dans le cas général assez faible, de l'ordre de 10 à 20%. Des rendements plus importants ont été obtenus à l'aide de nouveaux matériaux (en laboratoire, l'arséniure de gallium AsGa donne des rendements supérieurs à 25%) ou de techniques expérimentales (technologies multicouches), souvent difficiles et coûteuses à mettre en ouvre. Cependant, le matériau photovoltaïque le plus utilisé est le silicium, qui représente une solution économique. Pour de telles cellules, le rendement énergétique ne dépasse pas les 15%.

D'après les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, on peut déduire d'autres paramètres :

• Le courant de court circuit Icc (la charge est en court-circuit). En pratique ce courant est très proche du photocourant I_{ph} .

• La tension de circuit ouvert Vco (la charge est en circuit ouvert).

• Entre ces deux extrêmes, il existe un optimum donnant la plus grande puissance P_{max} ou MPP (Maximum Power Point).

• Le facteur de forme qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique, soit le rapport :

$$FF = \frac{P_m}{V_{CO}.I_{CC}} \quad \text{(II-9)}$$

II-8 Paramètres essentiels caractérisant une cellule solaire

- ***La courbe courant-tension d'une cellule PV***

La courbe caractéristique I(V) d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le courant de court-circuit Icc jusqu'au courant de la tension du circuit ouvert Vco (figure II-10).

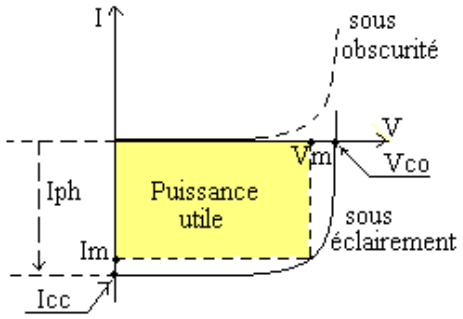


Figure II-10 Caractéristiques I=f(V) sous obscurité et sous éclairement d'une cellule PV

- ***Courant de court-circuit***

Si les deus électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par un champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit I_{cc} qui correspond au photocourant I_{ph} généré par le rayonnement. Pour une distribution spectrale donnée, ce photocourant est proportionnel à l'irradiation du rayonnement incident et à la surface active de captation. Il définit la quantité de pair électron trou générée G qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion L_n et L_p, donné par la relation:

$$I_{ph} = q.G.(L_n + L_p) \qquad \text{(II-10)}$$

- ***Tension de circuit ouvert***

Si la cellule est laissée en circuit ouvert, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, induisant une autopolarisation de la jonction dans le sens passant. Cette autopolarisation induit un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au photocourant. La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert Vco. C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photocourant, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = \left(\frac{kT}{q}\right).\ln\left[\left(\frac{I_{cc}}{I_0}\right)+1\right] \qquad \text{(II-11)}$$

- ***La puissance caractéristique d'une cellule PV***

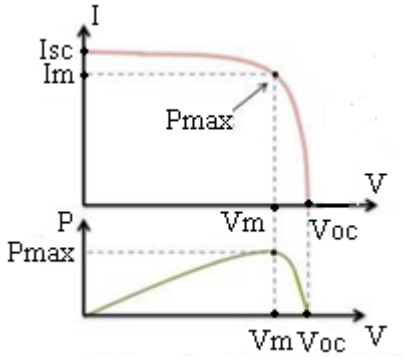


Figure II-11 Puissance d'une cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairement, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc..), la puissance électrique P disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque (figure II-11) est égale au produit du courant continu fourni I par une tension continue donnée V : $P = V. I$ (II-12)

P : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

V: Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV.

- ***La puissance max***

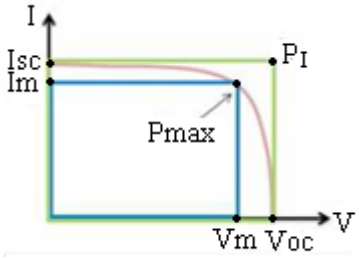


Figure II-12 Puissance maximum d'une cellule PV

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum idéale P_I correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{CO} multipliée par le courant de court-circuit I_{CC} (figure II-12):

$$P_I = P_{\text{max idéale}} = V_{CO}. I_{CC} \quad \text{(II-13)}$$

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie", et la tension au point de puissance maximum $V_{(Pmax)}$ est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{CO}, de même

que le courant fourni $I_{(Pmax)}$ est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{CC}. $P_{max} = V_m . I_m$ (II-14)

- ***Facteur de forme***

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée P_{max} et la puissance idéale P_I , on le note : $$FF = \frac{P_{max}}{P_I} = \frac{V_m . I_m}{V_{co} . I_{cc}} \quad \text{(II-15)}$$

- ***Rendement de conversion d'énergie***

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_0. On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P_0 :

$$\eta_m = \frac{V_m . I_m}{P_0} = FF . \frac{V_{co} . I_{cc}}{P_0} \quad \text{(II-16)}$$

Ce rendement dépend essentiellement des caractéristiques intrinsèques du semiconducteur de base de la cellule solaire (figure II-13)

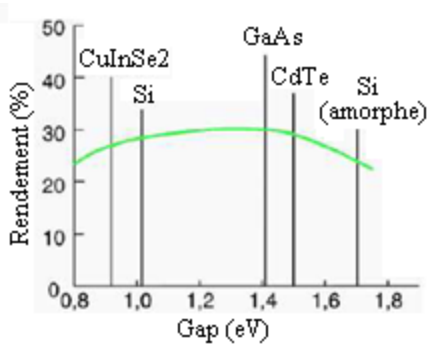


Figure II-13 Rendement énergétique en fonction de la bande interdite (Eg) (de différentes cellules PV))[27].

- ***Réponse spectrale***

La sensibilité des cellules solaires à la lumière traduite par la réponse spectrale, chaque longueur d'onde génère un photocourant correspond au nombre de photons incidents ayant la même énergie sur la surface. La réponse spectrale est le rapport entre la densité de courant collecte et la densité de photons incidente, pour chaque longueur d'onde du rayonnement lumineux. La réponse spectrale dépend beaucoup plus des propriétés optiques des matériaux

solaires que de la distribution spectrale de la lumière reçue, son optimisation exige une amélioration au niveau de la surface avant et même arrière (Light Trapping). Les deux formes de la réponse spectrale (IQE, EQE) sont fortement liées à la recombinaison en surface et en volume, à la longueur de diffusion des porteurs et à l'épaisseur de la région concernée.

Supposons que le flux de photons incidents est F (λ), une portion de ce flux se réfléchit, si R(λ) est le coefficient de réflexion pour la longueur d'onde λ et la partie F (λ) [1-R (λ)] pénètre dans le matériau, figure II-14 .

La réponse spectrale interne est définie comme le nombre de paires électron-trou collectés sous les conditions de court-circuit relatif au nombre de photons pénétrant dans le matériau [27]:

$$SR(\lambda)=\frac{J(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]}=\frac{J_p(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]}+\frac{J_n(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]}+\frac{J_{dr}(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} \qquad \text{(II-17)}$$

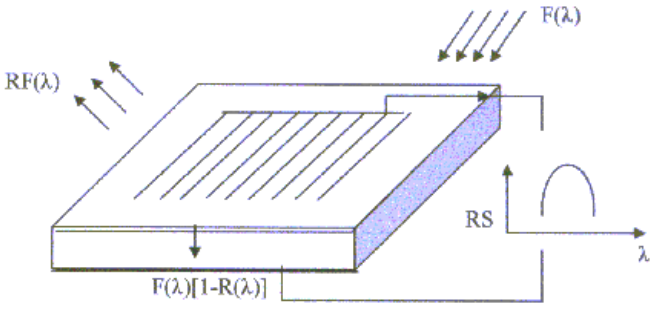


Figure II-14 : Réponse spectrale [27].

Cependant, la réponse spectrale externe n'est autre que la réponse interne, mais prend en compte la réflexion de la lumière au niveau de la surface avant, c'est-à-dire, le rapport entre le nombre de paires électron-trou collectées par la jonction par unité de temps et de surface et le nombre de photons incidents par unité de temps et de surface [27].

$$SR(\lambda)_{ext}=SR(\lambda)[1-R(\lambda)]=\frac{J(\lambda)}{qF(\lambda)} \qquad \text{(II-18)}$$

$$SR(\lambda)_{ext}=(1-R-T)SR(\lambda)_{\text{int}} \qquad \text{(II-19)}$$

Où T représente la transmission des photons à travers le matériau solaire.

On introduit aussi la notion de sensibilité spectrale SS (A /W), définie comme suit [28] :

$$SS_{\text{int}}(\lambda)=\frac{J(\lambda)}{F(\lambda)[1-R(\lambda)].h.\upsilon} \qquad \text{(II-20)}$$

$$SS_{ext}(\lambda)=\frac{J(\lambda)}{F(\lambda).h.\upsilon} \qquad \text{(II-21)}$$

La figure II-10 illustre la réponse spectrale d'une cellule Si N/P de résistivité 1 Ohm-cm avec les différentes contributions des régions de la cellule : base, émetteur, et la région de déplétion. La plupart des porteurs génèrent dans la base issue de longueurs d'onde longues à cause des mauvaises propriétés optiques du silicium. La contribution de la région de déplétion est considérable dans l'intervalle [2.0 - 2.9] eV pour une cellule de 1 Ohm-cm, mais n'atteint jamais la contribution de l'émetteur même si la résistivité de la base est plus élevée et la jonction plus étroite. Cette contribution diminue pour des résistivités plus faibles et des jonctions plus larges. Dans un matériau solaire à gap indirect, par exemple, le silicium, la contribution majeure au courant total provient de la base.

Les trois régions d'une cellule à base de silicium (gap indirect) contribuent au photocourant comme suit [27] :

La base contribue par 85% photocourant total (500nm<λ).

L'émetteur génère plus de 15% du courant total (λ<400nm).

La contribution de ZCE est négligeable (400<λ<500nm).

II-9 Cellule solaire GaAs / GaAlAs

Les dispositifs photovoltaïques récents tendent à convertir convenablement le maximum de l'énergie lumineuse en électricité et réduire efficacement les pertes électriques et optiques, et optimiser les propriétés des surfaces. Les structures photovoltaïques liées aux exigences technologiques et industrielles, doivent se rapprocher d'une cellule idéale et minimiser les pertes dans les contacts ohmiques, de la réflexion et la recombinaison (amélioration de la qualité cristalline). Dans cette optique, la technologie photovoltaïque a vu plusieurs variantes au niveau des structures solaires ces dernières années grâce aux méthodes d'élaboration et aux techniques de dépôt et du traitement thermique.

- ***Structure***

La structure adaptée est composée essentiellement d'une cellule n-p à base de GaAs de type **p**, sur la quelle est déposée une couche fenêtre GaAlAs de type **n**.

Entre le substrat et la cellule on a inséré une couche BSF (Back Surface Field) dopée **p+**, qui a pour rôle de la création d'un champ électrique retardé en face arrière, qui permet d'abaisser la valeur effective de la vitesse de recombinaison et par conséquent d'améliorer les caractéristiques électriques de la cellule, figure II- 15.

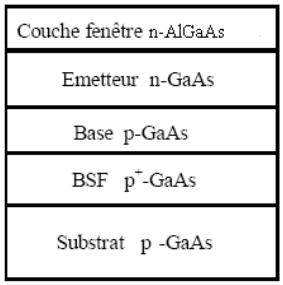


Figure II-15 Structure de la cellule solaire GaAs(n) /GaAs(p) avec fenêtre GaAlAs(n) .

Les couches fenêtres ayant une fraction molaire élevée souffrent du problème d'oxydation. Cependant, pour assurer un bon contact métallique sur cette couche, deux options différentes ont été développés [29]. L'une consiste à ouvrir une fenêtre dans la couche $Ga_{(1-x)}$ $Al_{(x)}$ As et le contact métallique est effectué directement sur le GaAs. La deuxième option la plus réussit consiste à déposer une couche GaAs fortement dopée sur la fenêtre et seulement sous les grilles métalliques, alors que la couche antireflet couvre le reste de la surface ; cette couche est dite « cap layer ».

Le souci d'avoir une meilleure absorption des photons, nécessite le dépôt d'une couche ARC, puis la texturisation de la surface avant de cette couche en formant des pyramides avec un angle optimale de 54.74° qui est compris dans l'intervalle (54-72°) des meilleurs angles d'incidence .

En ce qui concerne la couche antireflet, on utilise généralement une double couche MgF2/ZnS.

La couche antireflet MgF2/ZnS réduit la réflexion à mois de 2%.

Les caractéristiques de ces couches sont présentées dans le tableau suivant :

Couche	Epaisseur	Indice de réfraction
MgF_2	110nm	1.38
ZnS	55nm	2.3

Tableau II-1 Caractéristique de la couche antireflet MgF2/ZnS [29].

- ***Cellule solaire GaAs / GaAlAs à gradient de concentration.***

Les cellules solaires à base de GaAs et à fenêtre GaAlAs sont, le plus souvent, basées sur une jonction p-n obtenue par diffusion d'un dopant de type p (Zn ou Be) dans le GaAs de type n au cours de la croissance du GaAlAs a partir d'un bain GaAlAs-dopant [30]. Ce type de jonction permet de différencier la jonction électrique de l'interface métallurgique et, ainsi, d'améliorer sa qualité. Par ailleurs, il y a création d'un gradient de concentration de porteurs favorable dans la zone p. La croissance de la fenêtre $\mathbf{Ga_{(1-x)}}$ $\mathbf{Al_{(x)}As}$ est, en général, obtenue par un processus classique(step-cooling, equilibrium cooling ou supercooling) conduisant a une composition en

aluminium homogène a travers la couche. Son rôle principal est de diminuer la vitesse de recombinaison à la surface du GaAs. Par contre, les photons d'énergie élevée du spectre solaire y sont absorbés.

La présence d'un gradient de concentration à travers cette couche, la composition en aluminium augmentant vers la surface, permet grâce au champ électrique ainsi créé de réduire les pertes dues aux recombinaisons en volume et en surface. Le champ électrique E ***[E =(1/q)(dEg/dx), Eg : bande interdite]*** ne peut être augmenté qu'en diminuant l'épaisseur de la fenêtre car la variation de la bande interdite Eg est limitée à une valeur proche de 0,8 eV ***[de 1.4 eV (GaAs) à 2.26 eV (AlAs)]***. Il faut donc réaliser une couche graduelle (figure II-15) bien fine dont la composition en surface sera fixée par la teneur en aluminium du bain d'épitaxie.

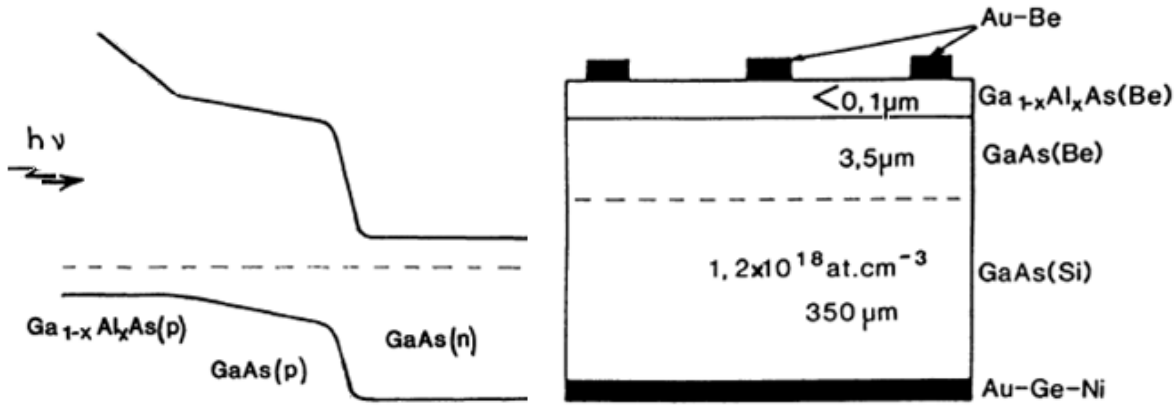


Figure II-15 *a - Diagramme des bandes d'énergie présentant : un gradient de porteurs dans GaAs(n)et un gradient de bande interdite dans la fenêtre GaAlAs(p). b- Structure d'une cellule solaire GaAs / GaAlAs* [30].

- ***Tandem solaire***

Les cellules solaires à une seule jonction ne permettent pas d'exploiter convenablement le spectre solaire, le spectre solaire est très large, et comme plusieurs matériaux solaires ayant une faible absorption dans le bleu et dans l'infrarouge ; il faut empiler plusieurs cellules dans l'ordre décroissant du gap, figure II-16 [31] . La réponse spectrale dans les tandems s'élargit le long du spectre de l'infrarouge vers le bleu et même le violet. La tension de circuit ouvert V_{co} des tandems solaires atteint des valeurs très optimisés, par exemple le tandem à trois jonctions de InGaP/GaAs/Ge a une tension de 2,1V, il peut exploiter de 300 vers 1900 mm, citons quelques

tandems qui offrent des rendements élevés, AlGaAs/GaAs, GaAs/Ge, AlGaAS/Si et InP/InGaAs [31,32].

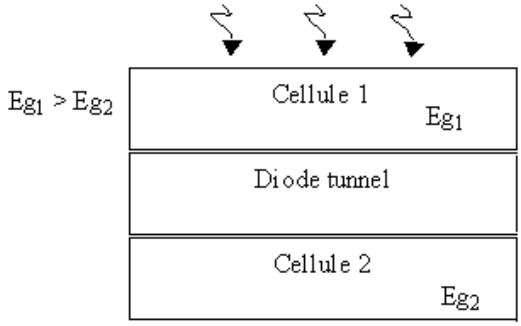


Figure II-16 Tandem solaire à deux jonctions [28].

III-1 Introduction

En principe, n'importe quel programme numérique capable de résoudre les équations de base des semiconducteurs peut être employé pour modéliser les photopiles solaires à couches minces. Parmi ces programmes de simulation, le PC1D.

le PC1D à une réputation internationale dans la recherche photovoltaïque, il a été développé à l'université « New South Wales de Sydney » en Australie ; il est l'un des pionniers dans ces domaines. Son utilisation est très pratique, il permet de simuler n'importe qu'elle structure photovoltaïque, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en jouant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc.…). Les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, donc c'est un gain de temps et d'argent.

III-2 Le PC1D

Le PC1D a été développé en 1985 (première version) et 1988 deuxième version [33], ADEPTF[34] et AMPS[35]. Les équations de base sont l'équation de Poisson, reliant la charge au potentiel électrostatique, et les équations de continuité pour les électrons et les trous. Cependant, plusieurs options additionnelles doivent être réunies dans le programme quand on veut simuler des photpiles solaires à couches minces. Il devrait être capable de prendre en compte la présence de plusieurs couches dans la cellule; le phénomène de recombinaison à l'interface des couches, introduit par les discontinuités dans les bandes d'énergie (E_c et E_v). Il devrait aussi, traiter correctement le problème de recombinaison et les centres de génération-recombinaisons dans les états profonds dans le volume des couches. Il devrait être aussi capable de calculer et simuler des mesures électro-optiques effectuées généralement sur les piles solaires à couches minces, non seulement la caractéristique I(V), mais également la réponse spectrale et les mesures de capacité C(V) et C(f). En fin, il devrait fournir la convergence au moins pour les structures les plus communes des cellules à couches minces. Toutes ces options sont mises en application dans le programme de simulation SCAPS [36].

- ***Aperçu du logiciel***

La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la Figure III.1.

Pour visualiser les résultats de la simulation, il faut d'abord introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation, et ensuite exécuter le programme de la simulation, ce qui permet de visualiser les résultats sous forme de données ou de graphes.

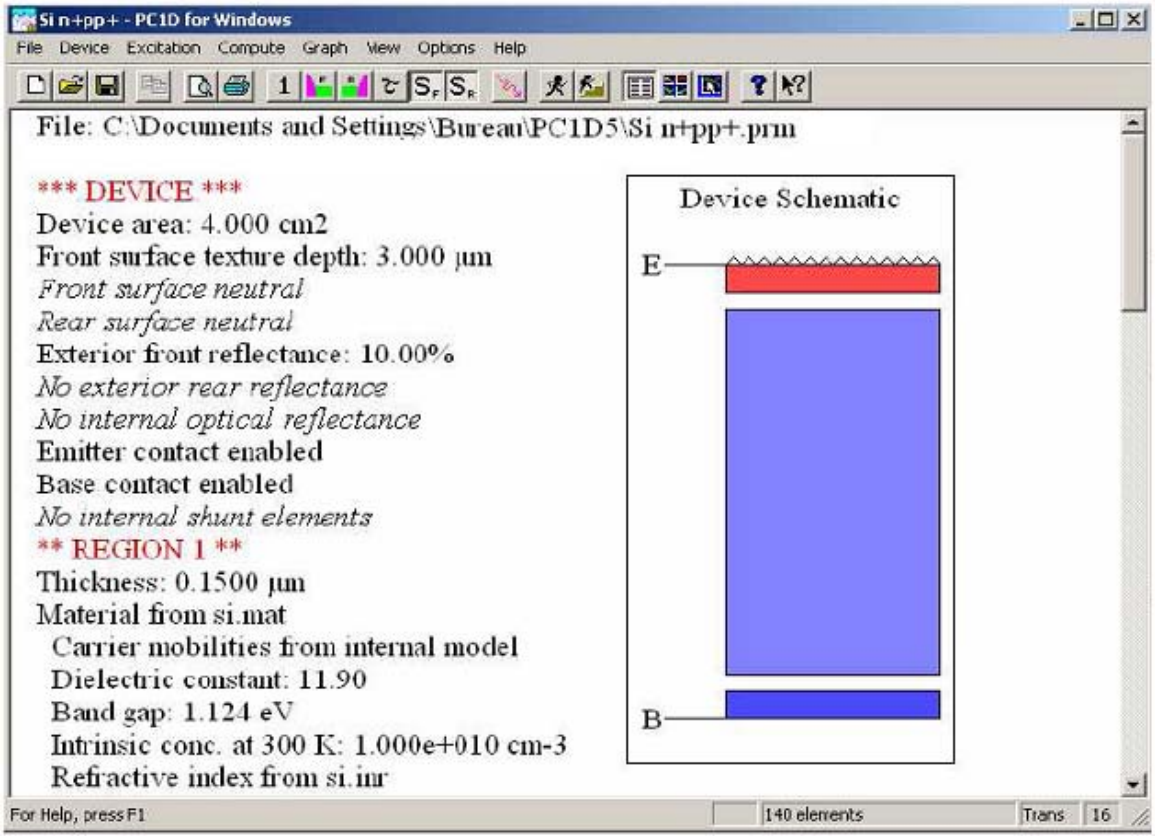


Figure III.1. Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique

La figure III-2 représente une cellule solaire homojonction n+/ p , émetteur dopé n+ et la base dopée p.

La figure III-3 représente le profile de la densité du dopage de l'émetteur en fonction de la distance à partir du front avant, l'épaisseur de la cellule est de 300 µm mais seulement les quelques premiers µm sont dopés, ces quelques µm constitues l'émetteur, le reste représente la base dopée p, et le tous constitue la jonction P-N.

DEVICE
Device area: 100 cm^2
Front surface texture depth: 3 µm
No surface charge
Exterior Front Reflectance: 10%
No Exterior Rear Reflectance
Internal optical reflectance enabled
Front surface optically rough
Emitter contact enabled
Base contact: 0.015 Ω
Internal conductor: 0.3 S
REGION 1
Thickness: 300 µm
Material from si.mat
Carrier mobilities from internal model
Dielectric constant: 11.9
Band gap: 1.124 eV
Intrinsic conc. at 300 K: 1×10^{10} cm^{-3}
Refractive index from si.inr
Absorption coeff. from si300.abs
Free carrier absorption enabled
P-type background doping: 1.513×10^{16} cm^{-3}
1st front diff.: N-type, 2.87×10^{20} cm^{-3} peak
No 2nd front diffusion
No rear diffusion
Bulk recombination: $\tau_n = \tau_p = 7.208$ µs
Front-surface recom.: S model, $S_n = S_p = 1\times10^{6}$ cm/s
Rear-surface recom.: S model, $S_n = S_p = 1\times10^{5}$ cm/s

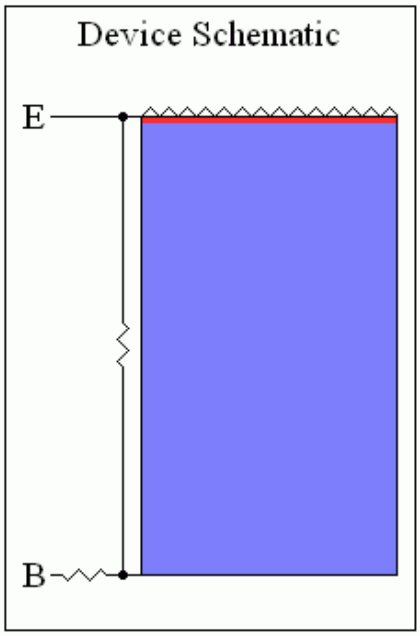


Figure III.2. Fenêtre du logiciel PC1D

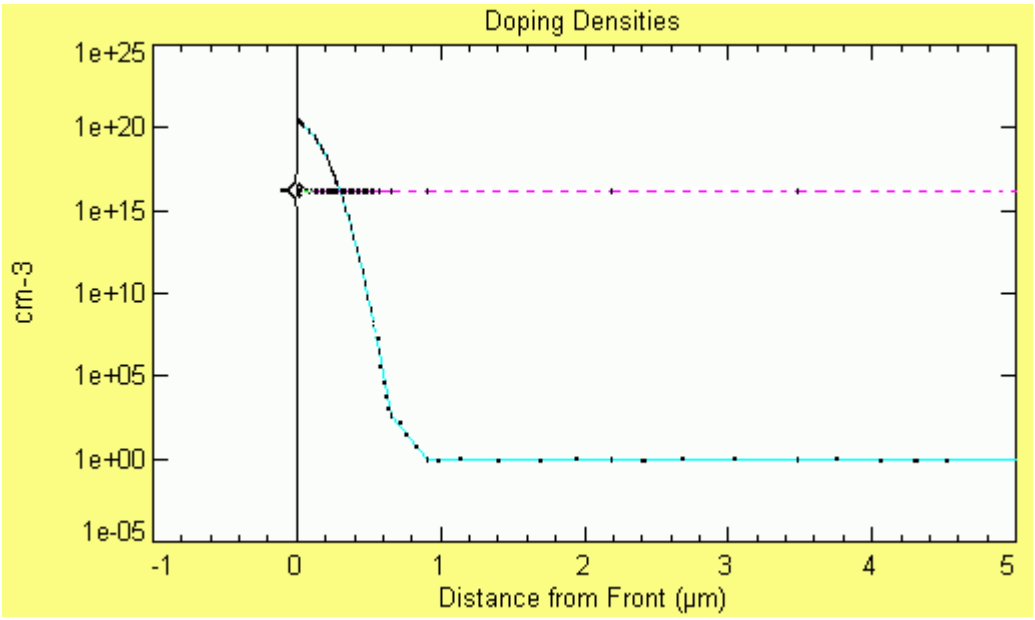


Figure III.3 Profile de la densité du dopage de l'émetteur en fonction de la distance

III-3 Les paramètres du dispositif (Device)

- Aire du dispositif (Device) : la surface du dispositif est très importante car elle influe sur le photocourant d'une manière appréciable. On peut choisir par exemple une surface de $4cm^2$.
- Surface texturée : les surfaces texturées utilisées dans toutes les structures étudiées sont composées de micro pyramides inversées de profondeur (depth) 3µm et d'angle facial 54,74°. La texturisation est très importante, car elle permet de diminuer les pertes par réflexion du rayonnement incident. On peut texturer seulement la face avant, si l'autre face est considérée à l'obscurité.
- Les deux faces sont considérées comme neutres, du fait qu'il n'y a pratiquement pas de charges aux interfaces, c.à.d. qu'il n'y a pas de barrière de potentielle aux surfaces.
- Les couches antireflets, elles sont généralement de la silice (SiO2), elle peut être remplacée par d'autres matériaux qui sont transparent au spectre solaire et qui sont donnée dans le logiciel sous forme de fichiers.
- Réflectance optique interne : elle est négligée dans notre simulation, nous considérons que les surfaces qui sont spéculaires et non diffuses.
- Par défaut, l'émetteur et la base sont connectés au circuit, tandis que le collecteur est déconnecté.
- Quatre résistances shunt peuvent êtres introduits, chacune d'elle peut être conducteur, diode ou condensateur. Dans notre cas nous considérons qu'il n'y a pas d'élément qui peut shunter le circuit.

III-4 Les paramètre des régions

- L'épaisseur de l'émetteur est relativement mince par rapport à la base. Dans le cas du silicium elle varie sur un intervalle compris entre 0,1µm et 2,5µm.
- Le matériau utilisé: les paramètres qui le décrivent, sont stockés dans des fichiers d'extension (*.mat), ils sont fournit avec le logiciel dans une diskette. Les paramètres stockés dans ce fichier sont :

  -La mobilité : le modèle utilisé est le modèle de Thuber et al 1981.

  -La constante diélectrique.

  -L'énergie de gap (eV).

  -La concentration intrinsèque (cm-3).

-L'indice de réfraction.

-Coefficient d'absorption α : le modèle utilisé est celui de Rajkanan et al 1979.

-Absorption des porteurs libres: l'équation décrivant l'absorption des porteurs dans le cas du Silicium cristallin est donnée par [37, 38] :

$\alpha = (2{,}6.10^{-27} .n.\lambda^3) + (2{,}7.10^{-24} .p.\lambda^2)$ avec :

n : concentration en électrons (cm-3), p : concentration en trous (cm-3) et λ longueur d'onde du rayonnement en nanomètres.

- Type et concentration de dopage: de type n ou p, la concentration maximale est de $10^{19}cm^{-3}$ Ce logiciel présente quatre profil de dopages: le profil uniforme, le profil exponentiel, le profil gaussien et le profil erfc.
- Les recombinaisons en volume: le modèle utilisé est basé sur la statistique de Read Shockley-Hall décrivant les recombinaisons par pièges, situées dans la bande de valence.
- Les recombinaisons face avant et arrière.

III-5 Les Paramètres d'excitation

- Deux fichiers intégrés dans le logiciel permettent de simuler la caractéristique courant-tension et autre caractéristiques en utilisant le fichier « One-Sun.exc », ou la réponse spectrale en utilisant le fichier « Scan-qe.exc ».
- Le mode d'excitation : il y a trois modes d'excitation (en équilibre, stationnaire et transitoire). Pour une bonne simulation numérique, le mode transitoire est recommandé.
- Dans la plus part des cas on choisit la température ambiante, T=25°C.
- Il y a deux sources de Thevenin identiques, l'une pour la base et l'autre pour le collecteur.
- Seulement la face avant est éclairée (coté n), par un flux lumineux d'une intensité de 0,1 W/cm^2. Pour avoir la réponse spectrale, le logiciel fait un balayage sur l'intervalle de longueurs d'onde compris entre [300, 1200] nm. Pour avoir la caractéristique, il utilise directement le fichier d'aire masse « am 15g.spc ».

La seconde source peut être désactivée, dans le cas où la face arrière n'est pas éclairée.

III-6 Visualisation des résultats

Les résultats que nous pouvons visualiser en utilisant le fichier d'excitation « One-Sun.exc » du PC1D sont :

-La courbe de la caractéristique I(V).

-La valeur du courant de court circuit.

-La valeur de la tension en circuit ouvert.

-La valeur de la puissance maximale.

Et ceux obtenus avec le fichier « Scan-qe.exc » sont :

-La valeur de courant de court circuit.

-La valeur de tension à circuit ouvert.

-La valeur de la puissance maximale.

-Le rendement.

III-7 Identification du matériau

L'identification du matériau GaAs par exemple est effectuée de la manière suivante :

- La mobilité des porteurs : le simulateur offre deux choix à l'utilisateur, le premier choix prend la mobilité des porteurs constante, cependant, la deuxième possibilité considère la mobilité à travers son modèle interne à 300k.
- La constante diélectrique relative: est fixée à 13.18
- La largeur de la bande interdite Eg : 1.424 eV
- La concentration intrinsèque à 300k : 2.59.106 cm-3
- L'indice de réfraction : le simulateur propose deux possibilité, la valeur constante n=3.66, ou bien la valeur variable à partir du fichier externe GaAs.inr, ce fichier comprend une liste des longueurs d'onde, et chaque longueur d'onde ayant son indice de réfraction.
- Le coefficient d'absorption : comme dans le cas de l'indice de réfraction, le PC1D propose une valeur constante, ou bien le fichier GaAs.abs qui prend en considération la variation de ce coefficient en fonction de la longueur d'onde λ.
- L'absorption des porteurs libres : le PC1D prend en considération l'effet de l'absorption parasite des porteurs libres.
- Le dopage de la base : le PC1D permet d'introduire volontairement la valeur du dopage, il spécifie ainsi leur type (p ou n), il détermine les valeurs correspondantes de la résistivité, la diffusivité et la mobilité pour chaque niveau de dopage.
- Le dopage de l'émetteur : on peut introduire les valeurs de dopage et spécifier leur profil, ainsi que le type de l'émetteur (p ou n). La profondeur de la jonction et la résistance de surface sont déterminées par le simulateur.
- Le dopage des autre couches : le simulateur PC1D nous offre aussi la possibilité de rajouter à la cellule des couches en vue d'améliorer ses performances, comme couche BSF par exemple.

- La vitesse de recombinaison en volume : généralement, la durée de vie des porteurs minoritaires dépend fortement du dopage, néanmoins, pour les niveaux de dopage élevés, pour nos cellules, elle est prise constante et égale à 0.102 μs[39],
- La vitesse de recombinaison en surface Sn=Sp=106 cm/s [39],
- La longueur de diffusion : elle varie avec le dopage de la base et la durée de vie des porteurs

III-8 Le fonctionnement du PC1D

Après l'introduction de toutes les données nécessaires au matériau étudié, ainsi que la configuration de la cellule solaire, le simulateur permet d'obtenir des résultats.

Le fonctionnement du PC1D nécessite plusieurs critères à respecter :

1- Le choix des gammes de valeurs des différents paramètres n'est pas aléatoire, elles doivent être réalisables par la technologie.

2- Pour des considérations numériques, les valeurs à introduire, doivent être comprises dans des intervalles biens déterminés.

3- Pour une convergence rapide, il est indispensable de minimiser au maximum la taille des éléments finis, et choisir un nombre adéquat des itérations.

4- Le bon choix des paramètres numériques.

5- Une initialisation convenable des différents paramètres de la simulation.

Ces critères sont nécessaires dans chaque simulation, mais ils ne sont pas suffisants.

Plusieurs fichiers externes sont aussi obligatoires pour exécuter le programme, nous citons, à titre d'exemple, la sélection des fichiers caractérisant chaque matériau, tels que celui du coefficient d'absorption (*.abs), et celui de l'indice de réfraction (*.inr).

Le choix des fichiers d'excitation (*.exc) sont aussi nécessaires avant l'exécution, ces fichiers spécifient l'étude à faire, soit en obscurité (dark-iv-exc), ou bien sous illumination, dans le dernier cas on trouve deux fichiers (one-sun.exc, scan-qe.exc).

La sélection du fichier (one-sun.sxc) permet le calcul des caractéristiques (**I-V, P-V**) on obtient également le rendement η et le facteur de forme FF. Le fichier (scanqe. exc) permet le calcul de la réponse spectrale.

Ils existent plusieurs spectres solaires standards, chacun d'eux spécifie l'endroit de l'étude, par exemple, dans les études spatiales on choisi le spectre AM0, l'air masse AM1.5 pour les applications terrestres.

Le PC1D utilise trois spectres différents (am0.spc, am1.5g.spc, am1.5.spc).

III-9 Structure à simuler

Quelque soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un bon rendement. Habituellement, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils de dopage, la configuration des contacts et le confinement optique. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent, bien sûr, de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau du substrat (duré de vie, mobilité), de la qualité des contacts ohmiques, de la vitesse de recombinaison en surface (faces avant et arrière), etc... L'optimisation da la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum.

La simulation numérique est couramment utilisée pour l'optimisation des cellules solaires. En effet, elle présente les avantages suivants :

Elle permet d'éviter la fabrication de plusieurs prototypes de cellules avec des paramètres différents ; elle est indépendante de la technologie utilisée (on peut donc faire varier largement les paramètres) ; on peut séparer l'influence de chaque zone de la cellule dans le cas de paramètres interdépendants (par exemple: mobilité, longueur de diffusion et durée de vie).

La simulation a donc été largement utilisée dans le cadre de ce travail afin de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires, de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximum. La difficulté majeure réside dans le grand nombre de paramètres influençant le rendement de la structure. En effet, la cellule solaire peut être décrite par les paramètres suivants :

les dimensions géométriques des contacts et des régions diffusées (largeur de l'émetteur et du BSF, espacement entre l'émetteur et le BSF) ; l'épaisseur du substrat ; les niveaux de dopage (substrat, émetteur, BSF, …) ; profondeur du dopage pour les régions diffusées (émetteur, BSF…) ; les paramètres qui interviennent dans les modèles de recombinaison (taux de recombinaison pour les faces avant et arrière, durée de vie des porteurs minoritaires) ; les coefficients de réflexion pour les faces avant et arrière.

Un émetteur classique dopé à $10^{17}cm^{-3}$ pour la réalisation des cellules solaires, nécessite une épaisseur importante pour une bonne collecte de porteurs. Par contre, les nouveaux émetteurs utilisés actuellement sont dopés à $10^{19}cm^{-3}$ et nécessite une faible épaisseur. Ce type d'émetteur est appelé Emetteur Transparent et dispose d'un phénomène de diffusion très important.

La structure de base du logiciel PC1D est composée essentiellement d'une cellule n-p, elle peut être constituée d'une seule région dopée n et p (homojonction) ou de plusieurs régions de différents semiconducteurs (hétérojonction), le PC1D admet au maximum cinq régions, par exemple la figure III-4 représente une cellule de cinq régions: couche fenêtre (n^+ - AlGaAs), émetteur (n-AlGaAs), base (p-GaAs), BSF (p^+ - GaAs), et substrat (p - GaAs).

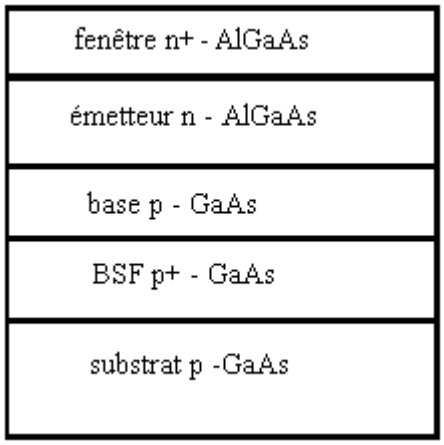


Figure III-4 Structure de la cellule solaire étudiée.

IV-1 Introduction

Des améliorations importantes concernant les performances des cellules solaires ont été réalisées ces dernières années, grâce à l'application des logiciels de simulation qui précède l'étape pratique de réalisation.

La plupart des perfectionnements concernant les cellules solaires à base de silicium a pour origine l'amélioration de leurs structures: surfaces texturisées pour le piégeage de la lumière et une passivation de surface ou interface (SiO2/Si) pour réduire la vitesse de recombinaison en surface,... La difficulté majeure réside dans le grand nombre de paramètres influençant le rendement de la structure photovoltaïque.

Le rendement élevé des cellules solaires à base des composés III-V est obtenu par l'utilisation de plusieurs couches semiconductrices et la possibilité d'agir les concentrations de chaque élément constituant ces couches semiconductrices pour obtenir les conditions optimums. Par exemple l'introduction d'une fenêtre AlGaAs pour la réduction de la vitesse de recombinaison en surface et l'introduction d'une couche BSF (**B**ack **S**urface **F**ield) qui a pour rôle la création d'un champ électrique retardé en face arrière, qui permet d'abaisser la valeur effective de la vitesse de recombinaison et par suite l'amélioration du facteur de forme ce qui se traduit par une amélioration du rendement de la cellule, et par conséquent l'amélioration des caractéristiques électriques de la cellule.

Optimiser une cellule solaire, ce traduit par la recherche d'un meilleur rendement de puissance de la cellule, en agissant sur les différents paramètres de la cellule, qui peuvent aboutir à une réalisation pratique.

Le PC1D est capable d'offrir des informations sur le comportement des cellules solaires à homojonction et à hétérojonction et de décrire les nombreux mécanismes qui interviennent dans ces cellules.

A partir des paramètres physiques et géométriques des cellules et à l'aide du simulateur PC1D, l'étude des cellules solaires, ainsi que l'optimisation de leurs performances peuvent être étudiées

Les structures ont été étudiées sous le spectre solaire AM1.5, avec P_0 =100mW/cm^2 et une surface de 1 cm^2. Les mesures des paramètres photovoltaïques ont été effectuées dans le cas d'une résistance série nulle et une résistance shunt infiniment grande.

L'optimisation des différents paramètres de la cellule à étudier est obtenue suivant la puissance maximale de la simulation, en faisant varier chaque fois un seul paramètre de chaque couche constituant la cellule. Les paramètres étudiés sont l'épaisseur et le dopage.

La version de PC1D utilisée ne permet pas de faire varier la concentration (x) de l'Aluminium du composé ternaire $Ga_{(1-x)}Al_{(x)}As$, nous utilisons donc que le composé disponible $Ga_{(0.7)}Al_{(0.3)}As$.

IV-2 *Simulation d'une cellule solaire à base de Silicium*

IV-2-1 Cellule solaire de type n+ / p avec et sans texturation

- ***Paramètres utilisés après optimisation et résultats de simulation***

DEVICE
Device area: **1 cm^2**
Front surface texture depth: **3 µm**
No surface charge
Exterior Front Réflectance: **10%**
No Exterior Rear Réflectance
Internal optical réflectance enabled
Front surface optically rough Emitter contact enabled
Base contact: **0.015 Ω**
No internai shunt éléments
REGION 1
Thickness: **300 µm**
Material from: **si.mat**
Carrier mobilities from internal model
Dielectric constant: **11.9**
Bandgap: **1.124eV**
Intrinsic conc. at 300 K: **$1x10^{16}$ cm^{-3}**
Refractive index from **si.inr**
Absorption coeff. from **si300.abs**
Free carrier absorption enabled
P-type background doping: **$1.513xl0^{16}$ cm^{-3}**
1 st front diff.: **N-type**, **$2.87x\ 10^{20}$ cn^{-3} peak**
No 2nd front diffusion
No rear diffusion
Bulk recombination: $\tau_n = \tau_p = 7.208$ µs
Front-surface recom.: S model, $S_n = S_p = 1x10^6$ cm/s
Rear-surface recom.: S model, $S_n = S_p = Ix1O^5$ cm/s
EXCITATION
Excitation from **one-sun.exc**
Excitation mode: **Transient, 16 timesteps**
Température: **25°C**
Base circuit: Sweep from **-0.8 to 0.8 V**
*Collecter circuit: **Zéro***
Primary light source enabled
Constant intensity: **0.1 W cm^{-2}**
Spectrum from **aml5g.spc**
Secondary light source disabled
RESULTS
Short-circuit Ib: **-0.0320 amps**
Max base power out: **0.0157 watts**

Device chematic

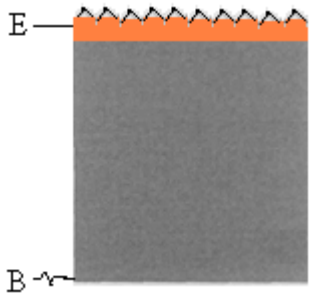


Figure IV-1 Cellule solaire de type n/p avec texturation.

Open-circuit Vb: **0.5935 volts**

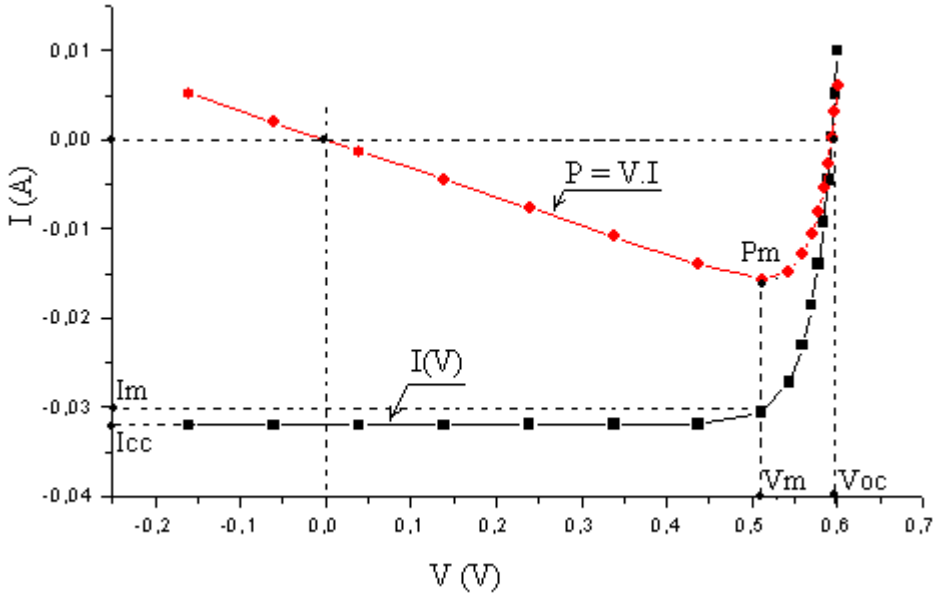


Figure IV-2 Caractéristique I(V) et puissance de la cellule n+/p avec texturation.

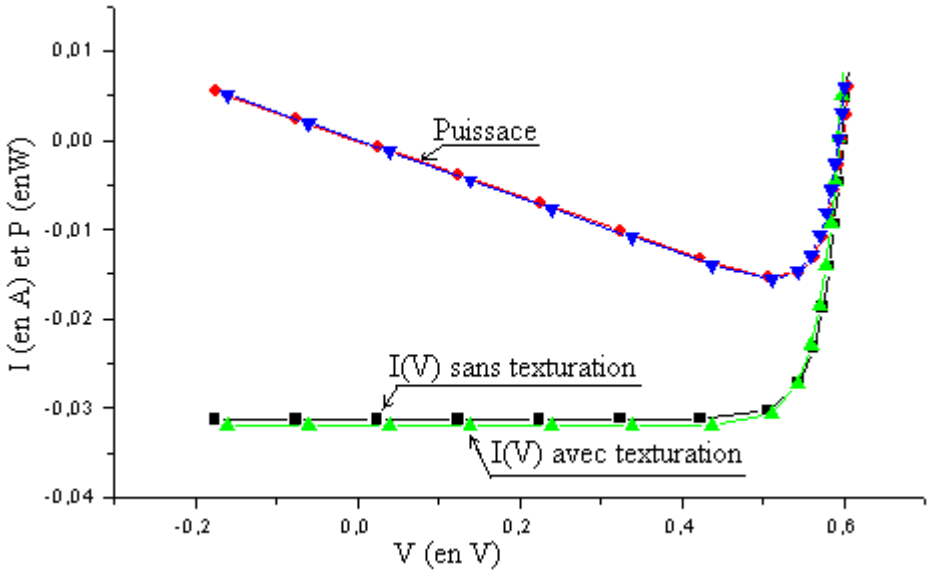


Figure IV-3 Effet de la texturation sur la caractéristique I(V) de la cellule n+/p.

Facteur de forme FF et rendement en puissance η_m

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée par la cellule ***P = V.I*** et la puissance du rayonnement solaire incident P_0.

On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale $P_{max} = V_m.I_m$ et la puissance P_0 : $\eta_m = \frac{V_m.I_m}{P_0}$

La valeur de P_0 est de 0.1W par cm^2 de surface de la cellule
(P_0 est une donnée du logiciel PC1D).
Le facteur de forme FF traduit l'effet de la forme de la courbe de la caractéristique I(V) sur le rendement de la cellule, plus la courbe est proche du rectangle, plus FF est proche de 1.
FF est donné par la relation

$$FF = \frac{P_{max}}{P_I} = \frac{V_m.I_m}{V_{co}.I_{cc}} \qquad \text{Ce qui donne} \quad \eta_m = \frac{V_m.I_m}{P_0} = FF.\frac{V_{co}.I_{cc}}{P_0}$$

RESULTATS (avec texturation)
Courant court-circuit I_{CC} : **-0.0320 amps**
Puissance Max : **0.0157 watts**
Tension circuit-ouvert V_{C0} : **0.5935 volts**
FF = 0.82
η_m = *16 %*

RESULTATS (sans texturation)
Courant court-circuit I_{CC} : **-0.0312 amps**
Puissance Max : **0.0155 watts**
Tension circuit-ouvert V_{C0} : **0.5987 volts**
FF = 0.8
η_m = *15%*

On remarque une légère amélioration de la puissance maximale pour une cellule de 1 cm^2 qui peut être plus grande si on augmente la surface. La face avant (face éclairée) est texturée en pyramides inversées, cette texturation permet une réduction importante du coefficient de réflexion et ainsi des pertes optiques dans la cellule.

IV-2-2 Effet de la température sur la cellule de type n+ / p avec texturation

La même cellule précédente avec différentes températures.

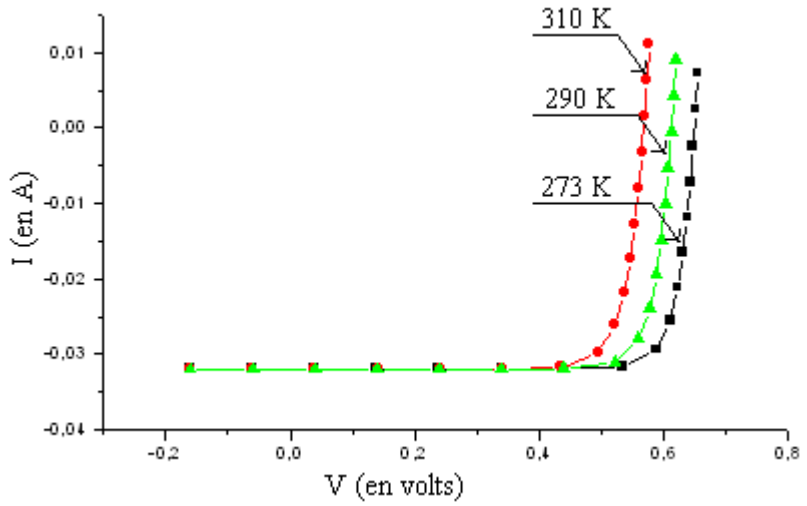


Figure IV-4 Effet de la température la caractéristique I(V) de la cellule n+/p.

	Icc	*Pmax*	*Voc*
273 °K	-0,032	0,0174	0,6482
290 °k	-0,032	0,0163	0,6114
310 °k	-0,032	0,0147	0,5672

La température agit sur la tension de circuit-ouvert ce qui influe sur la puissance et par conséquent sur le rendement.

IV-2-3 Effet du dopage de l'émetteur

La même cellule *n+/p* à la température 300 K, avec différents dopages de l'émetteur.

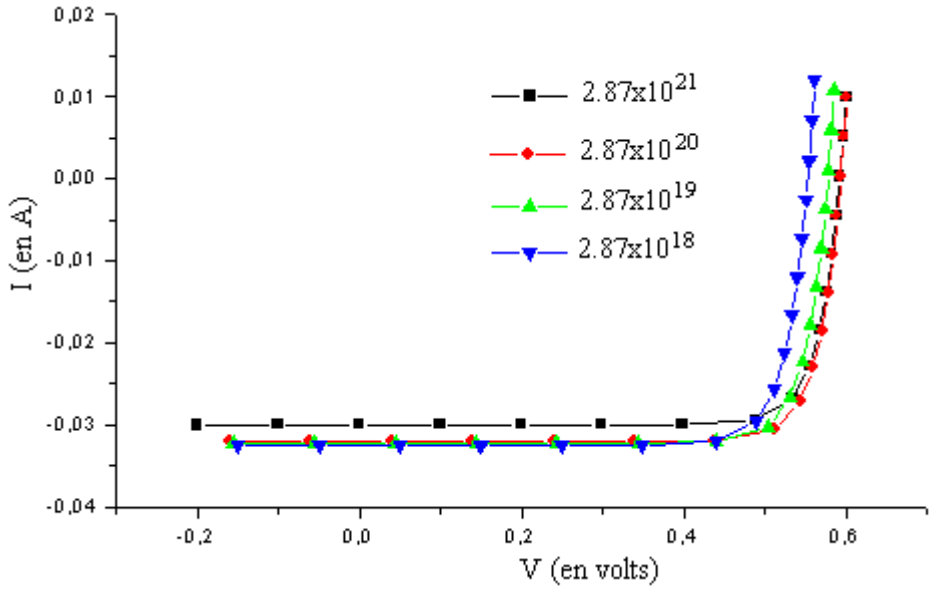


Figure IV-5 Effet du dopage de l'émetteur sur la caractéristique I(V) de la cellule n+/p.

	Icc	*Pmax*	*Voc*
$2{,}87x10^{21}$ cm^{-3}	-0,030	0,0146	0,5929
$2{,}87x10^{20}$ cm^{-3}	-0,032	0,0157	0,5935
$2{,}87x10^{19}$ cm^{-3}	-0,0322	0,0153	0,5779
$2{,}87x10^{18}$ cm^{-3}	-0,0325	0,0145	0,5528

IV-2-4 Effet du dopage de la base

La même cellule *n+/p* à la température 300 K, avec différents dopages de la base.

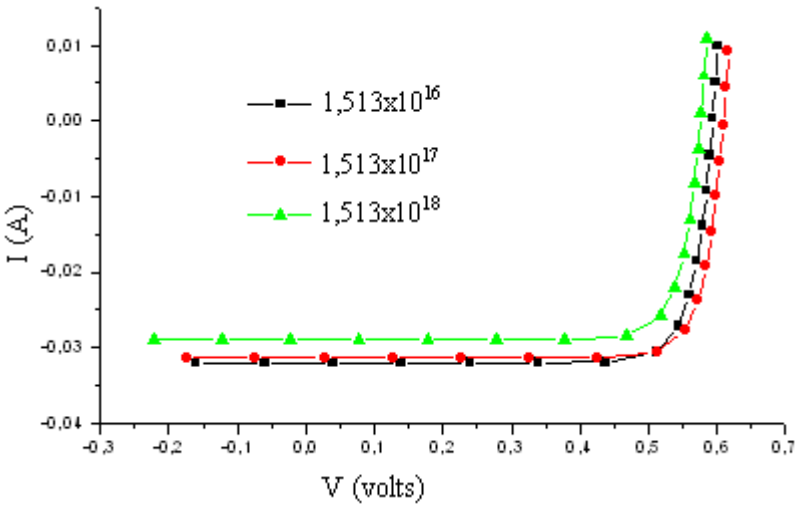


Figure IV-6 Effet du dopage de la base sur la caractéristique I(V) de la cellule n+/p.

	Icc	*Pmax*	*Voc*
$1{,}513x10^{16}$ cm^{-3}	-0,032	0,0157	0,5935
$1{,}513x10^{17}$ cm^{-3}	-0,0313	0,0158	0,6092
$1{,}513x10^{18}$ cm^{-3}	-0,0289	0,0135	0,5755

IV-2-5 Cellule n+/p avec la couche arrière dopée p+

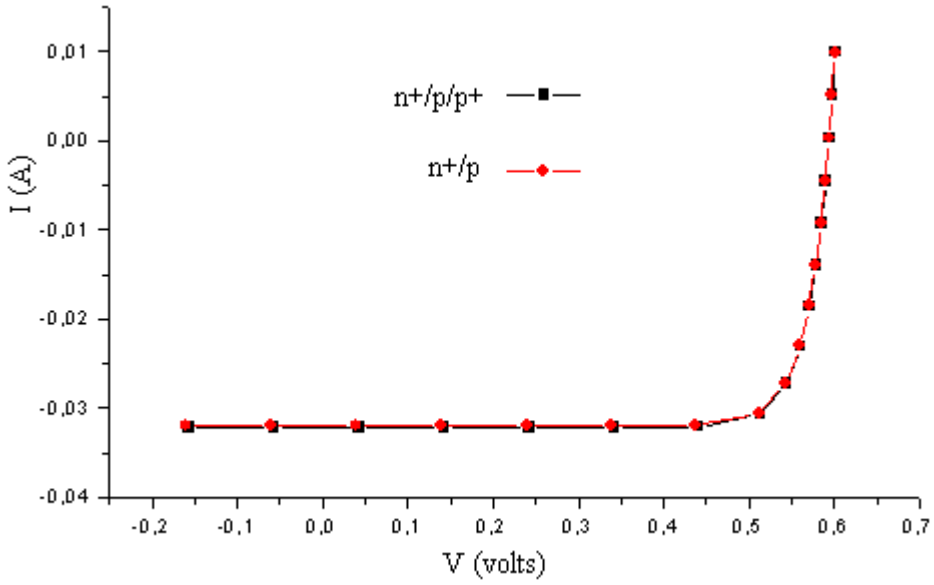


Figure IV-7 Caractéristique I(V) de la cellule avec et sans couche arrière dopée p+

	Icc	*Pmax*	*Voc*
n+/p	-0,0320	0,0157	0,5935
n+/p/p+	-0,0321	0,0158	0,5940

IV-3 *Simulation d'une cellule solaire à base GaAs et GaAlAs*

La structure adaptée est composée essentiellement d'une cellule n-p à base de GaAs : Deux couches de GaAs, une dopée n représente l'émetteur et l'autre dopée p représente la base. Un substrat de type p et entre le substrat et la cellule on a inséré une couche BSF (**B**ack **S**urface **F**ield) dopée p+, qui a pour rôle de la création d'un champ électrique retardé en face arrière, qui permet d'abaisser la valeur effective de la vitesse de

recombinaison et par conséquent d'améliorer les caractéristiques électriques de la cellule. Un schéma de la structure est illustré dans la figure IV.8.

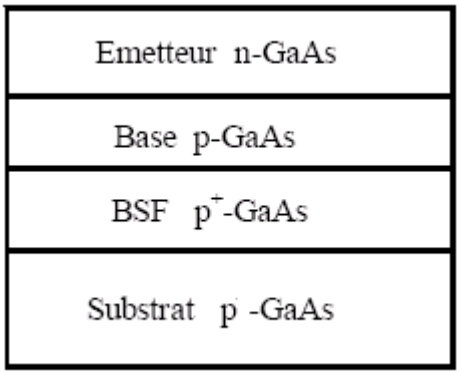


Figure IV-8 Structure de la cellule solaire étudiée

IV-3-1 Cellule solaire à base de GaAs avec fenêtre GaAlAs

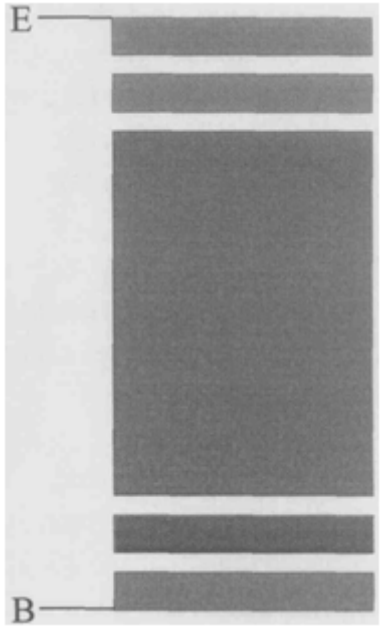
La fenêtre est représentée par une couche d'épaisseur très faible, de $Ga_{(0.7)}Al_{(0.3)}As$ dopée n+ , déposée sur l'émetteur (GaAs-n) figure IV-9.

- ***Paramètres utilisés après optimisation et résultats de simulation***

File: E:\PClD.v5.9\pcld5\PClD5\ounissi_h2.prm
(Double-click to add a description)
DEVICE
Device area: **1 cm²**
No surface texturing
No surface charge
No Exterior Front Réflectance
No Exterior Rear Réflectance
No internai optical réflectance
Emitter contact enabled
Base contact enabled
No internal shunt éléments
REGION 1
Thickness: **0.1 µm**
Material from **al3ga7as.mat**
Carrier mobilities from **internai mode**l
Dielectric constant: **12.24**
Bandgap: **1.817 eV**
Intrinsic cône, at **300 K: 1754 cm⁻³**
Refractive index: **3.81**
Absorption coeff. from **internal model**
Nofree carrier absorption
P-type background doping: **1x10¹⁶ cm⁻³**
1 st front diff. : **N-type**, **6x 10¹⁷ cm⁻³** peak
No 2nd front diffusion
No rear diffusion
Bulk recombination: **$\tau_n = \tau_p$ = 1000 µs**
No Front-surface recombination

Device Schematic

No Rear-surface recombination
REGION 2
Thickness: **0.1 µm**
Material from **gaas.mat**
Carrier mobilities from **internal model**
Dielectric constant: **13.18**
Bandgap: **1.424eV**
Intrinsic conc, at **300 K: 2.59x10^{6} cm^{-3}**
Refractive index: **3.66**
Absorption coeff. from **internal model**
No free carrier absorption
P-type background doping: **1x10^{16} cm^{-3}**
1 st front diff. : **N-type, 1x10^{17} cm^{-3}** peak
No 2nd front diffusion
No rear diffusion
Bulk recombination: **$\tau_n = \tau_P$ = 1000 µs**
No Front-surface recombination
No Rear-surface recombination
REGION 3
Thickness: **2 µm**
Material from **gaas.mat**
Carrier mobilities from **internal model**
Dielectric constant: **13.18**
Bandgap: **1.424eV**
Intrinsic conc, at **300 K: 2.59x10^{6} cm^{-3}**
Refractive index: **3.66**
Absorption coeff. from **internal model**
Nofree carrier absorption
P-type background doping**: 3x10^{17} cm^{-3}**
1 st front diff. : **P-type, 3 x 10^{17} cm^{-3}** peak
No 2nd front diffusion
No rear diffusion
Bulk recombination: **$\tau_n = \tau_P$ = 1000 µs**
No Front-surface recombination
No Rear-surface recombination
REGION 4
Thickness: **0.2 µm**
Material from **gaas.mat**
Carrier mobilities from **internal model**
Dielectric constant: **13.18**
Bandgap: **1.424eV**
Intrinsic conc, at **300 K: 2.59x10^{6} cm^{-3}**
Refractive index: **3.66**
Absorption coeff. from **internal model**
No free carrier absorption
P-type background doping: **1x10^{16} cm^{-3}**
1 st front diff. : P-type, **3 x 10^{18} cm^{-3}** peak
No 2ndfront diffusion
No rear diffusion
Bulk recombination: **$\tau_n = \tau_P$ = 1000 µs**
No Front-surface recombination
No Rear-surface recombination
REGION 5
Thickness: **0.2 µm**
Material from **gaas.mat**
Carrier mobilities from **internal model**
Dielectric constant: **13.18**
Bandgap: **1.424eV**
Intrinsic conc, at **300 K: 2.59x10^{6} cm^{-3}**
Refractive index: **3.66**
Absorption coeff. from **internal model**



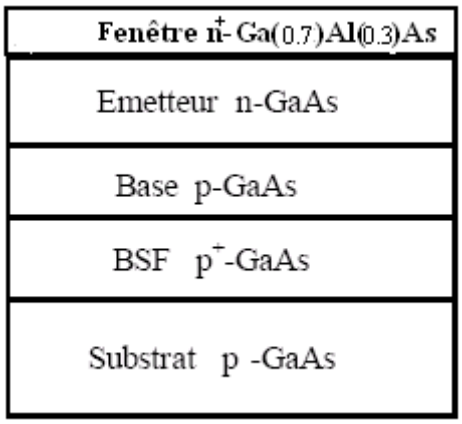


Figure IV-9 Cellule solaire à base de GaAs avec fenêtre GaAlAs

Free carrier absorption enabled
P-type background doping: **1x10^{16} cm^{-3}**
No front diffusion
No rear diffusion
Bulk recombination: **$\tau_n = \tau_P$ = 1000 µs**
No Front-surface recombination
No Rear-surface recombination
EXCITATION
Excitation from **one-sun.exc**
Excitation mode: **Transient, 16 timesteps**
Température: **25°C**
Base circuit: Sweep from **-0.8 to 0.8 V**
Collecter circuit: Zéro
Primary light source enabled
Constant intensity: **0.1 W cm^{-2}**
Spectrum from **am15g.spc**
Secondary light source disabled
RESULTS
Short-circuit Ib: **-0.0313 amps**
Max base power out: **0.0300 watts**
Open-circuit Vb: **1.079 volts**

La figure IV-10 représente la caractéristique I(V) et puissance de la cellule à base de GaAs avec fenêtre $Ga_{(0.7)}Al_{(0.3)}As$, tracée a partir des résultats de la simulation.

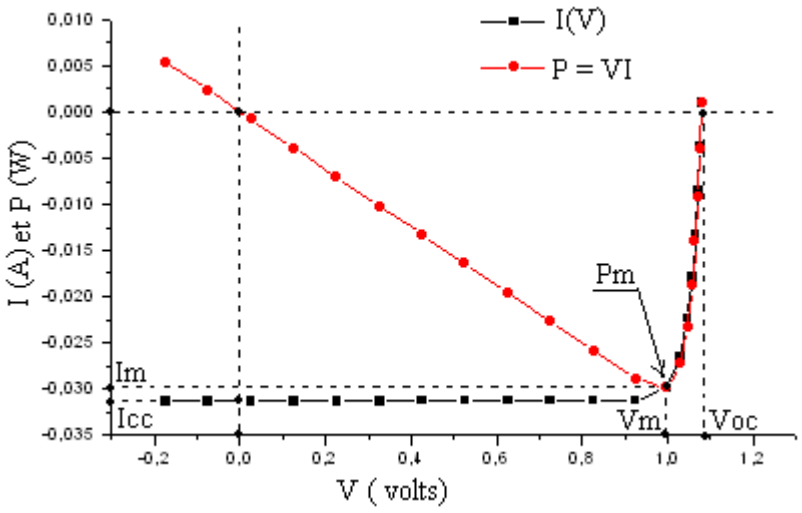


Figure IV-10 Caractéristique I(V) et puissance de la cellule à base de GaAs avec fenêtre GaAlAs

IV-3-2 Cellule solaire à base de GaAs sans fenêtre

La couche $Ga_{(0.3)}Al_{(0.7)}As$ qui représente la fenêtre est éliminée.

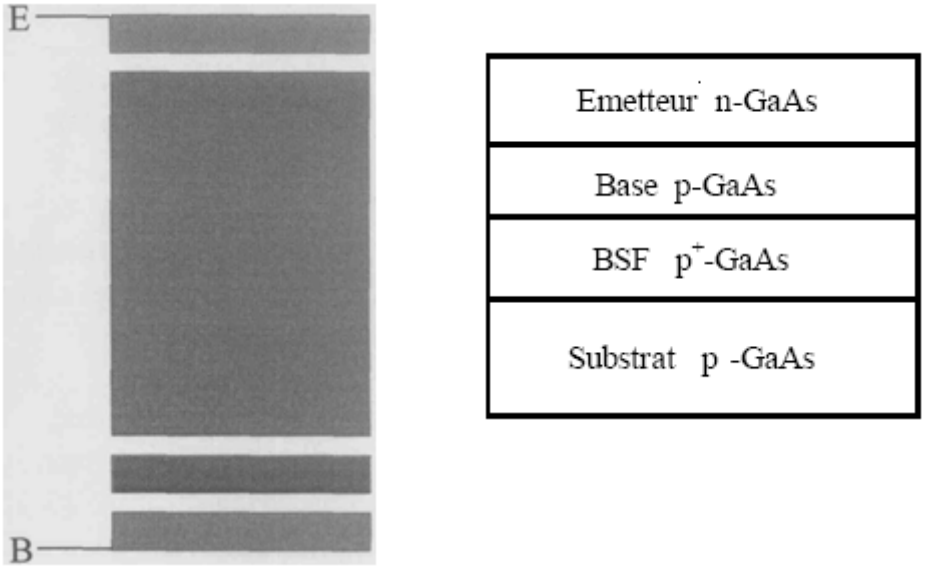


Figure IV-11 Cellule solaire à base de GaAs sans fenêtre

RESULTATS (avec fenêtre)
Courant court-circuit I_{CC}: **-0.0313 amps**
Puissance Max : **0.0301 watts**
Tension circuit-ouvert V_{CO} : **1.08 volts**
FF = 0.89
η_m = *30 %*

RESULTATS (sans fenêtre)
Courant court-circuit I_{CC} : **-0.0313 amps**
Puissance Max : **0.0300 watts**
Tension circuit-ouvert V_{CO} : **1.079 volts**
FF = 0.89
η_m = *26,7 %*

IV-3-3 Cellule solaire à hétérojonction GaAlAs/ GaAs sans fenêtre

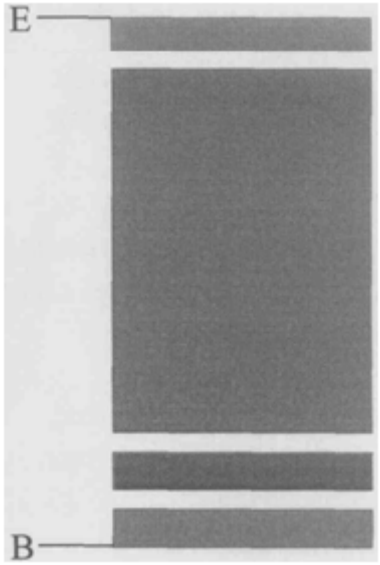
La structure adaptée est composée essentiellement d'une cellule à hétérojonction ***GaAlAs-n/GaAs-p*** à base de GaAs et de GaAlAs. Entre le substrat GaAs-p une couche BSF dopée p+ est insérée. Un schéma de la structure est illustré par la figure IV-12.

- ***Paramètres utilisés après optimisation et résultats de simulation***

File: E:\PClD.v5.9\pcld5\PClD5\ounissi_h5.prm
(Double-click to add a description)
DEVICE
Device area: **1 cm²**
No surface texturing
No surface charge
No Exterior Front Réflectance
No Exterior Rear Réflectance
No internai optical réflectance
Emitter contact enabled
Base contact enabled
No internal shunt éléments
REGION 1
Thickness: **0.1 µm**

Material from **al3ga7as.mat**
Carrier mobilities from **internai mode**l
Dielectric constant: **12.24**
Bandgap: **1.817 eV**
Intrinsic cône, at **300 K: 1754 cm^{-3}**
Refractive index: **3.81**
Absorption coeff. from **internal model**
Nofree carrier absorption
P-type background doping: **1x10^{16} cm^{-3}**
1 st front diff. : **N-type, 6x 10^{18} cm^{-3}** peak
No 2nd front diffusion
No rear diffusion
Bulk recombination: **$\tau_n = \tau_P$ = 1000 µs**
No Front-surface recombination
No Rear-surface recombination
REGION 2
Thickness: **3 µm**
Material from **gaas.mat**
Carrier mobilities from **internal model**
Dielectric constant: **13.18**
Bandgap: **1.424eV**
Intrinsic conc, at **300 K: 2.59x10^{6} cm^{-3}**
Refractive index: **3.66**
Absorption coeff. from **internal model**
No free carrier absorption
P-type background doping: **3x10^{17} cm^{-3}**
1 st front diff. : **N-type, 3x10^{17} cm^{-3}** peak
No 2nd front diffusion
No rear diffusion
Bulk recombination: **$\tau_n = \tau_P$ = 1000 µs**
No Front-surface recombination
No Rear-surface recombination
REGION 3
Thickness: 0.1 **µm**
Material from **gaas.mat**
Carrier mobilities from **internal model**
Dielectric constant: **13.18**
Bandgap: **1.424eV**
Intrinsic conc, at **300 K: 2.59x10^{6} cm^{-3}**
Refractive index: **3.66**
Absorption coeff. from **internal model**
Nofree carrier absorption
P-type background doping**: 1x10^{16} cm^{-3}**
1 st front diff. : **P-type, 3 x 10^{18} cm^{-3}** peak
No 2nd front diffusion
No rear diffusion
Bulk recombination: **$\tau_n = \tau_P$ = 1000 µs**
No Front-surface recombination
No Rear-surface recombination
REGION 4
Thickness: **0.4 µm**
Material from **gaas.mat**
Carrier mobilities from **internal model**
Dielectric constant: **13.18**
Bandgap: **1.424eV**
Intrinsic conc, at **300 K: 2.59x10^{6} cm^{-3}**
Refractive index: **3.66**
Absorption coeff. from **internal model**
Free carrier absorption enabled
P-type background doping: **1x10^{16} cm^{-3}**
No front diffusion

Device Schematic



Emetteur	n- Ga(0.7)Al(0.3)As
Base	p-GaAs
BSF	p^{+}-GaAs
Substrat	p -GaAs

Figure IV-12 Structure de la cellule solaire hétérojonction GaAlAs-n / GaAs-p.

No rear diffusion
Bulk recombination: $\tau_n = \tau_P = 1000\ \mu s$
No Front-surface recombination
No Rear-surface recombination
EXCITATION
Excitation from **one-sun.exc**
Excitation mode: **Transient, 16 timesteps**
Température: **25°C**
Base circuit: Sweep from **-0.8 to 0.8 V**
Collecter circuit: Zéro
Primary light source enabled
Constant intensity: **0.1 W cm^{-2}**
Spectrum from **am15g.spc**
Secondary light source disabled
RESULTS
Short-circuit Ib: **-0.0317 amps**
Max base power out: **0.0303 watts**
Open-circuit Vb: **1.080 volts**

La figure IV-13 représente la caractéristique I(V) et puissance de la cellule hétérojonction $Ga_{(0.7)}Al_{(0.3)}As$-n/GaAs-p , tracée a partir des résultats de la simulation.

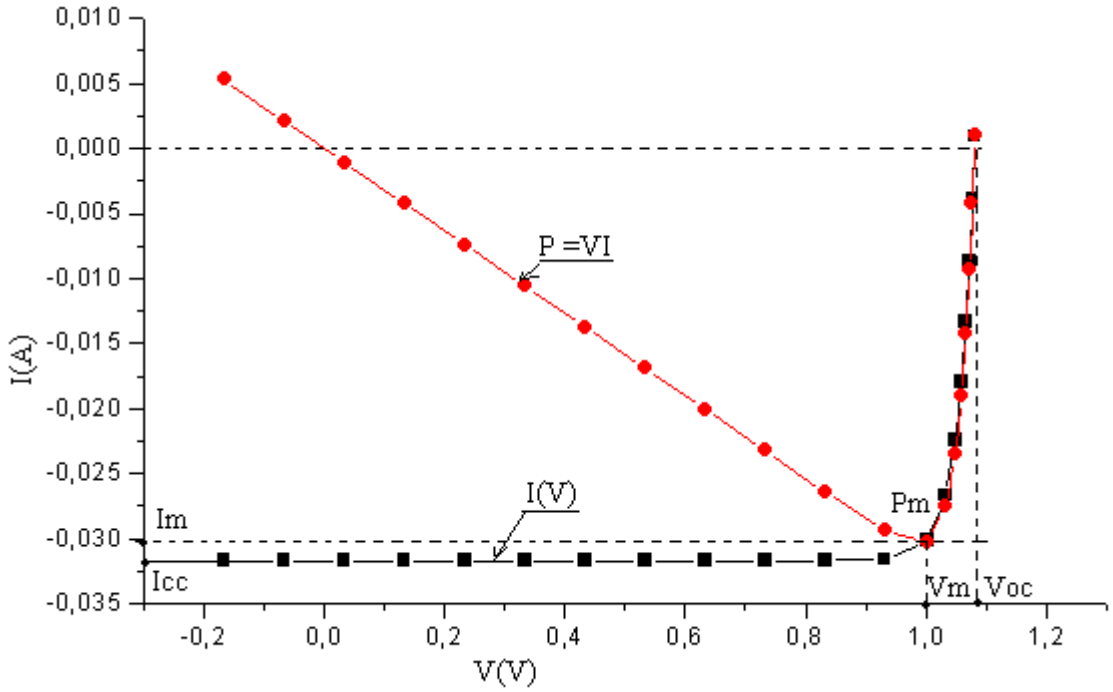


Figure IV-13 La caractéristique I(V) et puissance de la cellule

hétérojonction $Ga_{(0.7)}Al_{(0.3)}As$-n/GaAs-p.

RESULTATS
Courant court-circuit I_{CC} : **-0.0317 amps**
Puissance Max : **0.0303 watts**
Tension circuit-ouvert V_{C0} : **1.080 volts**
FF = 0.885
$\eta_m = 30.3\ \%$

IV- Conclusion

Quelque soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un bon rendement. Habituellement, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les profils de dopage. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent, bien sûr, de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau, de la vitesse de recombinaison en surface (faces avant et arrière), etc… L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum.

Nous nous sommes intéressés à l'étude de l'influence de l'épaisseur et du dopage des différentes couches : fenêtre, émetteur, base, BSF et substrat sur le rendement des cellules photovoltaïques à base de silicium et à base de GaAs.

D'après les résultats, on remarque que les grandeurs photovoltaïques de la cellule solaire à hétérojonction GaAlAs/GaAs, sont nettement meilleures que celles à homojonction à base de GaAs et à celles à base de silicium.

L'amélioration est enregistrée surtout dans le courant de court circuit et le rendement de conversion. Avec l'utilisation d'une couche fenêtre de type $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$, on augmente la tension du circuit ouvert de la cellule et le rendement.

Conclusion générale

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plus part des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent générer de paire électron-trou, et sont donc perdus. Le rendement d'une cellule dépend aussi à la base du nombre de photons y pénétrant.

La simulation a été largement utilisée dans le cadre de ce travail afin d'étudier les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires à base de silicium et à base du composé GaAs, dans le but d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximum.

Du point de vu technologique, Les cellules solaires à base de GaAs donnent une tension en circuit ouvert plus grande et un meilleur rendement que les cellules solaires à base de Si.

Le rendement des cellules solaires à base de silicium reste principalement limité par une faible valeur de FF et une faibles valeur de Icc. Ce phénomène peut être attribué à une résistance série importante.

L'utilisation des alliages AlGaAs dans les cellules solaires prend une nouvelle dimension lorsqu'ils sont utilisés en couches minces, car le rapport performance / coût atteint avec de telles cellules est supérieur à celui d'une cellule au silicium pour la même épaisseur, mais les rendements atteints sont encore faibles par rapport à ce que l'on attend d'une cellule solaire, à cause de la faible épaisseur de la couche.

Les cellules solaires à base d'hétérojonction, en particulier le $Ga_{(1-x)}Al_{(x)}As/GaAs$, donnent des rendements et des réponses spectrales meilleures que celle à homojonction. Cela est attribué à la réduction de la vitesse de recombinaison en surface.

Bibliographie

[1] S. M. SZE, *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, 1981.

[2] H.Mathieu, *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques*, Masson, Paris, 1996.

[3] A. Laugier et J.A. Roger, *Les photopiles solaires, thechniques et documentations*, Paris (1981).

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

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

[6] Frédéric Mazen, Thèse de doctorat de l'INSA-Lyon, "*Etude de la nucléation et de la croissance de nanocristaux de silicium élaborés par depôt chimique en phase vapeur pour dispositifs nanoélectroniques* ", 2003.

[7] Thibaut DESRUES, Thèse de doctorat en science des matériaux de l'INSA-Lyon, "*Développement de cellules photovoltaiques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière*", 2009.

[8] Gerald Bastard, *Wave mechanics applied to semiconductor heterostructures*, Les éditions de physique, paris, (1988).

[9] CAPPY. A, *Propriétés physiques et performances potentielles des composants submicroniques à effet de champ : structures conventionnelles et à gaz d'électrons*, Thèse d'état, Université de Lille France. (1986).

[10] S.Laval .Physique des semi-conducteurs III-V, Ecole d'été d'optoélectronique(2002).

[11] Peter Y.YU,Manuel Cardona. Fundamentals of semiconductors Physics and materials properties. Springer (2001).

[12] C. Kittel .Introduction a la physique de l'état solide, Dunode (1972)

[13] Francis Levy. Traité des matériaux. Physique et technologie des semiconducteures. Presses polytechniques et universitaires Romandes(1995).

[14] O. Krebs and P. Voisin, Phys. Rev. Lett. 77, 1829 (1996).

[15] John H. Davies, *The physics of low-dimensional semiconductors*, Cambridge University Press, 1998.

[16] WOLNY. M. et SELLE. D., *Introduction aux composants à hétérostructures, l'onde électrique*, mai-juin, vol 70, 3, 1990, pp. 59-74.

[17] L. Esaki et R. Tsu, IBM J. Res. Dev. 14, 61 (1970).

[18] ANDERSON. R. L., *Experiment on Ge-GaAs hétérojonctions, solid state electronics,* vol1.5, 1962, pp. 341-351

---

[19] Rémi de BETTIGNIES, Thèse de doctorat de l'Université d'Angers, *cellules photovoltaiques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugué*, 2003.

[20] Park Y., Choong V., Gao Y., Hsieh B. R. and Tang C. W., *Work function of indium tin oxide transparent conductor measured by photoelectron spectroscopy*, *Appl. Phys. Lett.* 1996, *68*, 2699-2701.

[21] Nichiporuk Oleksiy , Thèse de doctorat de L'INSA de Lyon, *Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaiques à contacts arrières interdigités*, 2005.

[22] Jianhua Zhao, Aihua Wang, Pietro P. Altermat, Stuart R. Wenham and Martin A. Green , *24% efficiency perl silicon solar cell: Recent improvement s in high efficiency silicon cell research* , solar En.Mat.&sol.Cells, 1996, Vol. 41/42, pp. 87-99.

[23] Zhenqiang Xi, Deren Yang et al, *Investigation of texturization for monocrystalline silicon solar cells with different kinds of alkaline* , Renewable Energy, 2004, Vol. 29, pp. 2101-2107.

[24] M. J. Stoks, A. J. Carr and A. W. Blakers, *texturing of poycrystalline silicon solar* , Solar En.Mat.&Sol.Cells, 1996, Vol. 40, pp. 33-42.

[25] P. Fath , C. Borst et al, *progress in novel high-throughput mechanical texturization technology for highly efficient multicrystalline silicon solar cells* , Solar En.Mat.&Sol.Cells, 1997, Vol. 48, pp. 229-236.

[26] M. Bashahu and A. Habiarimana, Review and test of methods for determination of the *solar cell series resistance* , Renewable Energy, 1995, Vol. 6, pp. 129-138.

[27] Mohamed Bouaouina, *Contribution à l'étude et à l'optimisation des performances des cellules solaires à base de GaAs et de Si,* Mémoire de magister en physique énergétique. Université de Constantine (2001).

[28] Gerald Bastard, Wave mechanics applied to semiconductor heterostructures, Les éditions de physique, paris, (1988).

[29] Antonio Luque, *Compound Semiconductor Solar Cells*, Adam Hilger, Bristol, UK. (1989).

[30] M. Bouauoina, Thèse de Magister en physique, Université de Constantine, Algérie (2001).

[31] L. Mayet, M. Gavand, D. Dutartre et A. Laugier, *Elaboration par épitaxie en phase liquide isotherme de photopiles solaires performantes à hétérostructure graduelle GaAlAs/GaAs* , J. Physique Lett. 45 (1984) L-873 - L-876.

[32] M. Sehal, Thèse de Magister, Ines de S.B. Abbes, Algeria(1986).

---

[33] P. A. Basore et al., "*PC-1D version 2: Enhanced numerical solar cell modelling*"., IEEE Photovoltaic Speialists Conf., (1988), 389.

[34] Y. Lee, J. Gray, Proc.12th Euro.Photovoltai Sol.Energy.Conf., Amesterdam. The Netherlands, April 1994., Stephens, UK:1561-1564.

[35] P. McElhany and J. Arch, Appl.Phys., (1988), 64:1254.

[36] M. Burgelman, P. Nollet and S. Degrave, "*Modelling polyristalline semiconductor solar cells*", Thin Solid Films., 362-361(2000),pp.527-532.

[37] Ioannou D.E. and Dimitriadis C.A., *A SEM -EBIC minority-carrier diffusion-length measurement technique,* IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-29, n°3, 1982, pp. 445-450.

[38] Yassine Sayad, Thèse de doctorat de l'INSA-Lyon, "Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière-matière ", 2009.

[39] M. A. Vonchen, III-V epitaxial lift-off investigated by multi-release layers 17th European photovoltaic conference (2001).