

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique
Spécialité Micro-Electronique

présenté par

BELATTOU YOUCEF

&

ZAHAFI MOHAMED

Étude et simulation d'une cellule solaire cœur coquille à base d'une jonction PIN en GaAs

Proposé par : M_r Nacer Said

Année Universitaire 2017-2018

Remerciements

Nos remerciements vont, en premier lieu, à Allah le tout puissant de nous avoir accordé la puissance, la volonté et la persévérance pour terminer ce modeste travail.

Nous n'aurions pas pu accomplir ce travail seules. Ce sont les compétences, la disponibilité et les encouragements de toutes les personnes qui nous entourent qui nous ont permis de poursuivre et d'achever cette maîtrise. Nous tenons donc à remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué de près comme de loin et de quelque façon que ce soit à la réalisation de ce travail.

Nous adressons tous d'abord nos vifs remerciements, nos reconnaissances et nos profonds respects à notre encadreur Mr NACER SAID pour nous a constamment guidé tout long de notre projet et pour les précieux conseils qu'il nous a donné, et pour sa serviabilité, sa disponibilité et ses conseils constructifs.

Nous exprimons de même nos remerciements les plus sincères aux honorables membres de jury d'avoir accepté d'être examinateurs.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos professeurs qui nous ont soutenus durant notre formation à l'université USDB.

Finalement, nous ne pouvons passer sous silence l'incroyable support que nos Familles, nos amis et nos collègues nous ont donné. Pour leur patience et leur constante écoute malgré la nature du sujet, pour leur support et leurs Encouragements, nous les remercions.

ملخص: الطاقة الكهروضوئية المبنية على تحويل الإشعاع الكهرومغناطيسي الشمسي إلى كهرباء هي أحد مصادر الطاقة المتجددة. مع التطبيقات المختلفة للطاقة الشمسية الكهروضوئية في المجالات الأرضية والفضائية، أصبح تحسين كفاءة التحويل للخلايا الشمسية أمراً ضرورياً. يهدف هذا العمل إلى دراسة ومحاكاة الخلايا الشمسية قلب-قالب المبنية على أساس وصلة PIN لمادة GaAs باستخدام برنامج COMSOL. بعد دراسة مواد أشباه الموصلات ومبدأ تشغيل وخصائص الخلايا الشمسية، تمت دراسة تأثير المعالم الهندسية (طول الخلية وسمك المنطقة الداخلية) على خصائص الخلية. تظهر نتائج المحاكاة أن كفاءة الخلية الشمسية قلب-قالب المبنية على أساس وصلة PIN لمادة GaAs تصل إلى قيمة قصوى تبلغ 23.89٪ لسمك 0.5µm وبطول 1µm.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية ، أشباه الموصلات ، وصلة PIN ، قلب-قالب ، السمك ، الطول.

Résumé: L'énergie photovoltaïque basée sur la conversion du rayonnement électromagnétique solaire en électricité, représente l'une des ressources énergétiques renouvelables. Avec les diverses applications de l'énergie solaire photovoltaïque dans les domaines terrestre et spatial, l'amélioration de l'efficacité de conversion des cellules solaires devient indispensable. Ce travail a pour but d'étudier et simuler une cellule solaire cœur-coquille à base d'une jonction PIN GaAs en utilisant le logiciel COMSOL. Après avoir présenté les matériaux semi-conducteurs, le principe de fonctionnement et les caractéristiques d'une cellule solaire, l'influence des paramètres géométriques (longueur de la cellule et épaisseur de la zone intrinsèque) sur les caractéristiques de la cellule a été étudiée. Les résultats de simulation montrent que le rendement de la cellule solaire cœur coquille à base d'une jonction PIN GaAs atteint une valeur maximale 23.89% pour une épaisseur de 0,5 µm et une longueur de 1 µm.

Mots clés : cellule solaire, semi-conducteur, jonction PIN, cœur-coquille, épaisseur, longueur.

Abstract: Photovoltaic energy based on the conversion of solar electromagnetic radiation into electricity is one of the renewable energy resources. With the various applications of photovoltaic solar energy in the terrestrial and space domains, the improvement of the conversion efficiency of solar cells becomes essential. This work aims to study and simulate a shell-core solar cell based on a PIN GaAs junction using the COMSOL software. After presenting the semiconductor materials, the operating principle and the characteristics of a solar cell, the influence of the geometrical parameters (length of the cell and intrinsic zone thickness) on the characteristics of the cell was studied. The simulation results show that the efficiency of the shell core solar cell based on a PIN GaAs junction reaches a maximum value of 23.89% for a thickness of 0.5 µm and a length of 1 µm.

Key words: photovoltaic, semiconductor, PIN junction, core-shell, thickness, length.

Listes des acronymes et abréviations

n : La concentration des électrons dans la bande de conduction

n_i : La concentration des porteurs libres intrinsèques

T : La température

P : La concentration des trous

A : Constante spécifique du matériau

N_d : La concentration de dopants donneurs ionisés dans le matériau N

E_c : Energie de la bande de conduction

E_v : Energie de la bande de valence

E_F : Energie de niveau de fermi

N_a : La concentration de dopant accepteurs

K_B : Constant de Boltzmann ΔE_n .

E_g : Energie de la bande interdite

λ : Longueur d'onde

h : constant de Planck

c : La vitesse de la lumière dans le vide

m^* : masse effective

K : vecteur d'onde

m_l^* : masse effective de l'électron de la vallée considérée dans son mouvement

m_t^* : masse effective de l'électron dans son mouvement dans le plan perpendiculaire

γ : Paramètre du luttinger

m_{hh} : masse effective isotropes

m_{lh} : masse effective isotropes

n_0 : Densités à l'équilibre

p_0 : Densités à l'équilibre

τ_0 : Durée de vie de recombinaison du porteur

μ : La mobilité

q : Charge de l'électron

D : Constant de la diffusion

J_n : Le courant de diffusion

S : Vitesse de recombinaison en surface
 Δn : La densité de porteurs excédentaires
dx : gradient à la surface
R : Coefficient de réflexion
 λ_g : Longueur d'onde du seuil d'absorption
 m_0 : La masse de l'électron dans le vide
 j_{dr} : Le courant
 j_{diff} : Le courant de diffusion
 E_c : Energie cinétique
E : Energie de photon
 W_s : La largeur de bande interdite
 V_n : Le Potentiel de diffusion dans le matériau N
 V_p : Le potentiel de diffusion dans le matériau P
 V_0 : Le potentiel de diffusion de la jonction PN
ZCE : Zone de Charge d'espace
V : Le potentiel de polarisation imposé aux bornes de la jonction
J : La densité de courant total traversant la cellule dans l'obscurité
 I_{cc} : Courant de court-circuit
 V_{co} : La tension de circuit ouvert
 P_m : Puissance maximal
 V_m : Tension maximal
 I_m : courant maximal
FF : Facteur de forme
 P_{in} : puissance incident
 η : rendement de conversion
A : section de la cellule solaire
L : Largueur de la cellule solaire simulée
W : L'épaisseur de Zone intrinsèque de la jonction PIN simulée

Table des matières

Introduction général.....	1
Chapitre 1 : généralités	3
1.1 Introduction	3
1.2 Généralité sur les semi-conducteurs.....	3
1.2.1. Semi-conducteur intrinsèques.....	4
1.2.2 Semi-conducteur extrinsèques.....	5
1.2.2.a Semi-conducteur extrinsèques de type N.....	5
1.2.2.b Semi-conducteur extrinsèques de type P.....	6
1.3 jonction PN.....	8
1.4 zone de charge d'espace (ZCE).....	9
1.5 Notion et structure de bande d'énergie.....	9
1.6 La bande interdite.....	11
1.7 Gap direct et Gap indirect.....	12
1.7.1 Gap direct.....	12
1.7.2 Gap indirect.....	12
1.8 Masse effective.....	12
1.8.1 Masse effective des électrons.....	13
1.8.2 Masse effective des trous.....	14
1.9 La recombinaison.....	15
1.9.1 Mécanismes de recombinaisons.....	15
1.9.2 Le taux de recombinaison.....	16

1.9.3 Vitesse de recombinaison en surface.....	16
1.10 La génération.....	17
1.10.1 Le taux de génération.....	18
1.11 Les semi-conducteurs III-V.....	18
1.11.1 Définition des semi-conducteurs III-V.....	18
1.11.2 Propriétés des matériaux III-V.....	19
1.11.3 Structure cristalline des matériaux III-V.....	19
1.11.4 Les avantages des semi-conducteurs III-V.....	21
1.12 Arséniure de gallium « GaAs »	21
1.12.1 Structure de bande électronique du GaAs.....	22
1.12.2 Propriétés électroniques du GaAs.....	23
1.13 Etude du Coefficient d'absorption d.....	24
1.14 La structure à jonction PIN.....	25
1.14.1 Photo détecteur p-i-n	25
1.15 Conclusion.....	26
Chapitre 2 Généralité sur les cellules photovoltaïques.....	27
2.1 Introduction.....	27
2.2 Le rayonnement solaire.....	27
2.2.1 Composition de rayonnement solaire.....	29
2.2.1 Composition de rayonnement solaire.....	29
2.2.2 Radiation d'un corps noirs.....	29
2.3 La technologie photovoltaïque.....	30

2.3.1 L'effet photovoltaïque	31
2.3.2 Définition d'une Cellule Photovoltaïque	32
2.3.3 Principe de fonctionnement d'une Cellule photovoltaïque.....	32
2.3.4 Conversion de la lumière en électricité.....	33
2.3.4.a Absorption de la lumière dans le matériau	34
2.3.4.b Transfert de l'énergie des photons aux charge électrique.....	35
2.3.4.c La collecte des charge.....	36
2.4 Architecture de la cellule photovoltaïque.....	37
2.5 Caractéristique des cellules photovoltaïque.....	38
2.5.1 Caractéristique électrique d'une cellule solaire.....	38
2.5.1.a L'équilibre thermodynamique.....	38
2.5.1.b Hors équilibre thermodynamique	39
2.5.2 La modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	40
2.5.3 Caractéristique (I.V) d'une cellule solaire.....	40
2.5.4 Caractéristique (I. V) sous obscurité.....	41
2.5.5 Caractéristique sous ensoleillement.....	42
2.5.6 La tension de circuit ouvert (V_{co}).....	42
2.5.7 Le courant de court-circuit (I_{cc}).....	42
2.5.8 La puissance maximale P_{max}	42
2.5.9 Le facteur de forme (FF).....	43
2.5.10 Le rendement de conversion(η).....	43
2.6 Cellule solaire à structure PIN.....	43

2.7 Cellule solaire cœur-coquille à base d'une jonction PIN.....	45
2.7.1 Architecture des cellules solaires planaire vs jonction radiale.....	46
2.8 Conclusion.....	46
Chapitre 3 Simulation et résultat.....	47
3-1 Introduction	47
3-2- Description de la structure simulée.....	48
3-3- Paramètres de la structure	49
3-4 Principe et l'objectif de la simulation.....	50
3-5 Irradiation d'un corps noir	50
5-6 L'absorption	51
3-7 Etude de la variation de la longueur L.....	51
3-7-1 Photo-courant I_{ph} de la cellule.....	51
3-7-2 Courant de court-circuit I_{cc} de la structure.....	52
3-7-3 Tension de circuit ouvert V_{co} de la cellule.....	53
3-7-4 Caractéristique courant-tension $I(V)$	54
3-7-5 Puissance délivrée par la cellule solaire $P(V)$	54
3-7-6 Puissance maximale délivrée par la cellule.....	55
3-7-7 Le facteur de forme	56
3-7-8 Rendement	57
3-8 Etude de la variation de l'épaisseur W	58
3-8-1 Photo-courant I_{ph} de la cellule.	58

3-8-2 Courant de court-circuit I_{cc} de la structure	59
3-8-3 Tension de circuit ouvert V_{co} de la cellule	59
3-8-4 Caractéristique courant-tension $I(V)$ de la cellule	60
3-8-5 Puissance délivrée $P(V)$ par la cellule solaire	60
3-8-6 Puissance maximale P_{max} et puissance incidente P_{in}	61
3-8-7 Facteur de forme	62
3-8-8 Rendement	63
3-9 Conclusion	64
Conclusion générale.....	65
Bibliographie.....	66

Liste des figures

Chapitre 1 Cellule photovoltaïque à base de structure cœur/coquille d'une jonction PIN

Figure 1.1 : Diagrammes des atomes de silicium.....	4
Figure 1.2 : Silicium dopé au phosphore. a. $T = 0$ K. b. $T = 50$ K. [3].....	6
Figure 1.3 : bande d'énergie de semi-conducteur extrinsèque de type N.....	6
Figure 1.4 : Silicium dopé au Bore. a. $T = 0$ K. b. $T = 50$ K. [3].....	7
Figure 1.5 : bande d'énergie de semi-conducteur extrinsèque de type p.....	7
Figure 1.6 : La jonction PN.....	8
Figure 1.7 : La zone de charge d'espace(ZCE).....	9
Figure 1.8 : représentations schématiques du gap direct et du gap indirect [8].....	9
Figure 1.9 : Bande énergie de quelques semi-conducteurs usuels [10].....	10
Figure 1.10 : Structure de bande d'énergie du : A -gap indirect et B -gap direct.....	12
Figure 1.11 : Les mécanismes de recombinaisons.....	16
Figure 1.12 : Mailles cristallographiques des structures Diamant et Zinc Blende [23]...	20
Figure 1.13 : Évolutions de l'énergie de bande interdite et du paramètre cristallin des alliages de composés III-V. [24].....	20
Figure 1.14 : Semi-conducteur composé : GaAs[3].....	22
Figure 1.15 : Structure de bande électronique du GaAs dont la bande interdite est reportée en pointillés ; $E_g = 1.42$ eV à 300 K [19].....	22

Chapitre 2 Généralité sur les cellules photovoltaïques

Figure 2.1 : analyse spectrale du rayonnement solaire.....	28
Figure 2.3 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	30
Figure 2.4 : La conversion des photons en courant électrique	33
Figure 2.5 : Emission et absorption et transfert de l'énergie des photons.....	34
Figure 2.6 : La collecte des charges.....	36
Figure 2.7 : Structure d'une cellule photovoltaïque.....	38
Figure 2.8 : I_g : courant générer I_d : courant de diode I : courant disponible.....	40
Figure 2.9 : Caractéristique courant tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque dans le noir et sous éclairage.....	41
Figure 2.10 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire à structure PIN.....	44
Figure 2.11 : Structure de base d'une cellule solaire pin : a) entrée lumière haut b) entrée de côté.....	44
Figure 2.12 : schéma d'un nanofil cœur-coquille avec une jonction radiale [36].....	45
Figure 2.13 : Comparaison de la structure planaire vs la structure cœur-coquille [36].	46
Chapitre 3 Simulation et résultats	
Figure 3.1 : Coupe longitudinale de la structure.....	48
Figure 3.2 : Schéma de la structure simulé en 3D.....	49
Figure 3.3 : le flux incident F en fonction de la longueur d'onde λ	50
Figure 3.4 : variation du coefficient d'absorption α du GaAs en fonction de λ	51
Figure 3.5 : Variation du courant I_{ph} en fonction de la longueur d'onde λ pour différents longueur de la cellule L ($w=1\mu m$)	52
Figure 3.6 : variation du courant de court-circuit I_{CC} (A) en fonction de la longueur L (μm).....	53

Figure 3.7 : Variation de la tension de circuit ouvert V_{CO} en fonction de la longueur.....	53
Figure 3.8: Evolution de la caractéristique courant-tension $I(v)$ de la cellule pour différentes valeurs de longueur « L ».....	54
Figure 3.9 : Puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension de polarisation Pour différent longueurs « L ».....	55
Figure 3.10 : évolution de « P max » en fonction de « L ».....	56
Figure 3.11 : facteur de forme [%] de la cellule en fonction de « L ».....	56
Figure 3.12 : Représentation du rendement d'une cellule solaire de la structure PIN à base du matériau GaAs en fonction de la longueur « L ».....	57
Figure 3.13 : Variation du courant I_{ph} en fonction de la longueur d'onde λ pour différents épaisseurs W (μm).....	58
Figure 3.14: variation du courant de court-circuit I_{CC} (A) en fonction du l'épaisseur $W(\mu m)$	59
Figure 3.15 : Variation de la tension de circuit ouvert V_{CO} en fonction du l'épaisseur « W ».....	59
Figure 3.16: Evolution de la caractéristique courant-tension $I(v)$ de la cellule pour différentes valeurs du l'épaisseur « W ».....	60
Figure3.17 : Puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension de polarisation Pour différent épaisseurs « W ».....	61
Figure 3.18.a : évolution de « P max » en fonction de« W ».....	62
Figure 3.18.b : évolution de « Pin » en fonction de « W ».....	62
Figure 3.19 : facteur de forme de la cellule en fonction de « W ».....	63
Figure 3.20 : Représentation du rendement de la cellule en fonction de« W ».....	6

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau (1.1) : Bande interdite de quelque SC [12].....12

Tableau (1.2) : Masses effectives des électrons et des trous [15].....15

Tableau (1.3) : Extrait de classification périodique des éléments.....19

Tableau (1.4) : Propriétés et paramètres caractéristiques des principaux composés binaires III-V [21].....20

Tableau (1.5) : Quelques propriétés spécifiques du GaAs à 300 K [25].....24

Chapitre 3

Tableau (3.1) : données de la structure simulée.....50

Introduction générale

L'importance de l'énergie dans notre société est devenue évidente au cours des dernières années. Parmi les différentes énergies alternatives, l'énergie solaire a la propriété très souhaitable d'être essentiellement illimitée et de n'être ni polluante ni physiquement dangereuse [1].

L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie très puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 1000 Watt/m² [2].

Cependant l'utilisation des cellules photovoltaïques est freinée par leur rapport coût/efficacité encore trop faible aujourd'hui.

La technologie photovoltaïque transforme l'énergie solaire en énergie électrique à l'aide de semi-conducteurs. Les matériaux semi-conducteurs sont utilisés dans la fabrication des cellules photovoltaïques car ils possèdent un gap suffisamment faible pour absorber le maximum du spectre solaire. C'est la technologie qui a le plus grand potentiel, mais aussi qui nécessite le plus de développement technique. La recherche est très active dans ce domaine afin d'arriver à une meilleure exploitation de l'énergie solaire, les prix diminuent constamment et les rendements progressent.

Pour une meilleure utilisation de l'énergie solaire et production de l'électricité, il faut s'intéresser à l'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque des cellules solaires avec une réduction des coûts et une augmentation des performances, ce qui nécessite des recherches actives pour l'optimisation des paramètres de la cellule solaire.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude et la simulation d'une cellule solaire cœur-coquille à base d'une jonction PIN en matériaux GaAs.

Le premier chapitre consiste à présenter quelques propriétés des semi-conducteurs, les phénomènes de recombinaison et de génération, les propriétés de l'Arséniure de

Gallium "GaAs", sa structure de bande et son coefficient d'absorption, ainsi que la structure de la jonction PIN.

Le deuxième chapitre présente le principe de fonctionnement et les caractéristiques principales d'une cellule solaire, ainsi que les cellules solaires cœur coquille à la base d'une jonction PIN.

Dans le troisième chapitre nous présenterons les résultats de nos simulations.

Enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion.

1.1 Introduction :

La production des énergies reste toujours un des soucis de l'Homme. L'énergie photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables très prometteuse pour avoir un monde propre et non pollué. Elle présente l'intérêt de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique (génération de paires électron-trou) et exploiter tout le spectre lumineux. Plusieurs matériaux à caractère semi-conducteur sont utilisés dans cette conversion.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si), arséniure de gallium (GaAs) et plus rarement d'autres semi-conducteurs.

Nous aborderons dans ce chapitre, en premier lieu, quelques notions des semi-conducteurs en général, puis Nous présentons par la suite quelques propriétés des matériaux semi-conducteurs III-V, La structure à jonction PIN, et les structures cœur-coquille.

1.2 Généralités sur les semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

Les matériaux ayant la plus faible résistivité à température ambiante, typiquement inférieure à $10^{-5}\Omega\text{cm}$, sont les métaux (cuivre, or, argent, aluminium...).

Les matériaux dont la résistivité est typiquement supérieure à $10^8\Omega\text{cm}$ sont considérés comme isolants (le verre, le mica, la silice (SiO_2), le carbone (diamant)).

Entre les métaux et les isolants se trouvent les semi-conducteurs (SC) dont la résistivité varie de 10^{-8} à $10^4\Omega\text{cm}$ (ou plus). La conduction électrique se fait par les électrons et

les trous, ou de façon préférentielle par l'un ou l'autre type de porteurs. Un semi-conducteur peut être soit pur auquel cas il est dit <<intrinsèque>>, soit dopé par des impuretés (qui permettent de contrôler la résistivité) auquel cas il est dit <<extrinsèque>> [3].

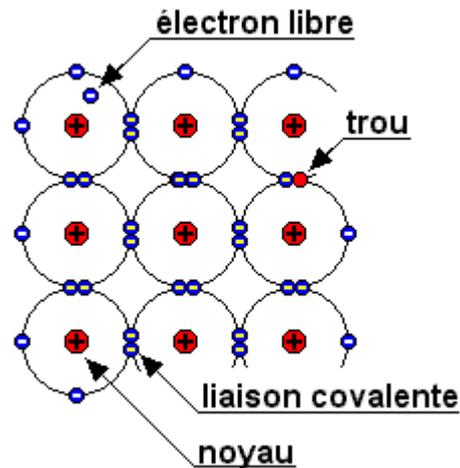


Figure 1.1 : Diagrammes des atomes de silicium

1.2.1 Semi-conducteur intrinsèque

Semi-conducteur intrinsèque est Un semi-conducteur pur sans défauts de structure, et un matériau semi-conducteur dont le comportement électrique ne dépend que de sa structure, et non de l'adjonction d'impuretés comme dans le cas du dopage. Dans un semi-conducteur intrinsèque, à chaque électron de la Bande de conduction correspond un trou dans la Bande de Valence donc :

$$n = p = n_i (T) = AT^{3/2} \exp\left(\frac{-E_G}{2KT}\right) \quad (1.1)$$

n : la concentration des électrons dans la Bande de Conduction.

p : la concentration des trous.

n_i : la concentration intrinsèque.

A : constante spécifique du matériau.

T : est la température toujours exprimée en degrés KELVIN.

1.2.2 Semi-conducteur extrinsèque

On augmente la conduction d'un semi-conducteur en le dopant avec des impuretés c'est-à-dire en introduisant dans le cristal un certain type d'atomes étrangers. Le taux d'impuretés de ces atomes est généralement très faible de l'ordre d'un atome d'impureté par 10^6 atomes du semi-conducteur. On obtient un semi-conducteur extrinsèque. [4]

1.2.2.a Semi-conducteur extrinsèque de type N

C'est le cas où les atomes étrangers sont pentavalents (antimoine, phosphore, arsenic) c.à.d. qu'ils ont 5 électrons sur la couche périphérique (de valence). Parmi ces 5 électrons, 4 vont être mis en commun avec les atomes voisins pour assurer les liaisons de valence, le 5ème, resté libre, peut se déplacer et participer à la conduction. On dit que les impuretés utilisées sont des donneurs (d'électrons). Bien que l'électron devenu libre laisse un ion positif derrière lui, celui-ci (constitué de l'atome donneur) a 8 électrons sur sa couche de valence, il n'a pas tendance à capter l'électron d'un atome voisin, ce n'est donc pas un trou (porteur) car il ne participera pas au courant de trous (par le mécanisme de déplacement de trou qui a lieu à chaque fois qu'un atome ionisé comportant un trou capte un électron de l'atome voisin pour compléter sa dernière couche). Le dopage par des atomes donneurs va donc favoriser la conduction par électrons libres au détriment de la conduction par trous. On dit que les électrons constituent les porteurs majoritaires. Comme ils sont porteurs de charge négative, le semi-conducteur extrinsèque est dit de type N.

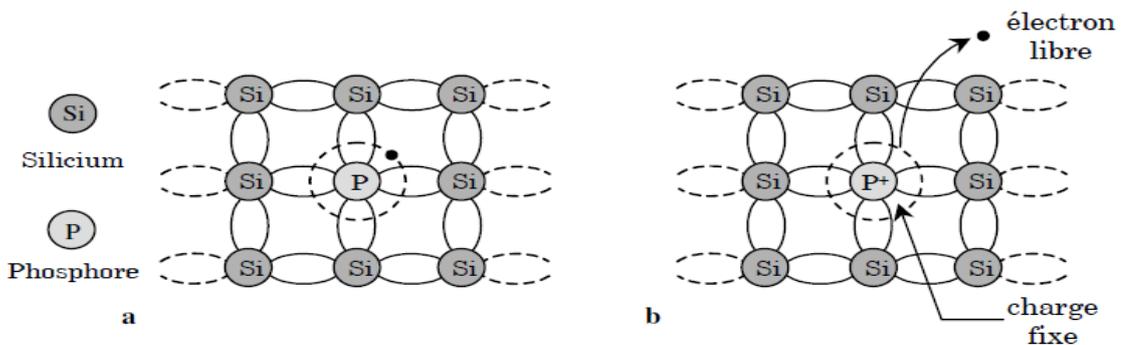


Figure 1.2 : Silicium dopé au phosphore. a. T = 0 K. b. T = 50 K. [3]

- Electrons = porteurs majoritaires / trous = porteurs minoritaires

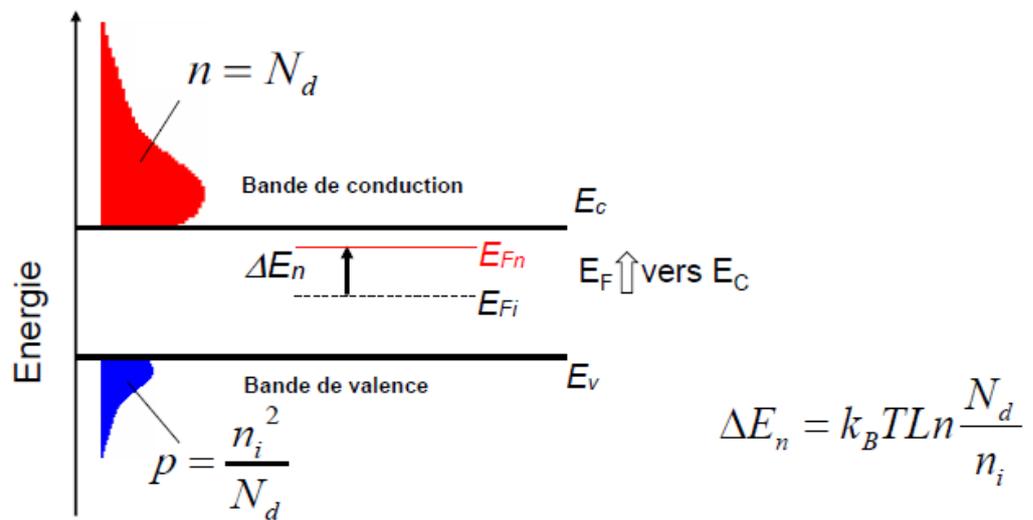


Figure 1.3 : bande d'énergie de semi-conducteur extrinsèque de type N [3].

1.2.2.b Semi-conducteur extrinsèque de type P

Les atomes d'impureté sont des accepteurs (bore, aluminium, gallium, indium), ils ont seulement trois électrons sur la couche de valence. Si on les introduit dans un cristal intrinsèque, ils mettent en commun leurs 3 électrons avec les 4 atomes du semi-conducteur qui les entourent pour former les liaisons de valence. Ils se trouvent à la fin avec 7 (3+4) électrons sur la couche de valence, cette configuration est instable et aura tendance à capter un électron d'un atome voisin pour compléter sa couche à 8 électrons. Dès que cet électron est capté, l'atome Accepteur devient un ion négatif et introduit un trou dans le cristal qui va participer à la conduction par trou. Aucun électron libre n'a été créé lors de la formation du trou, les trous sont donc beaucoup plus nombreux que les électrons, ils constituent les porteurs majoritaires et le semi-conducteur est de type P[5].

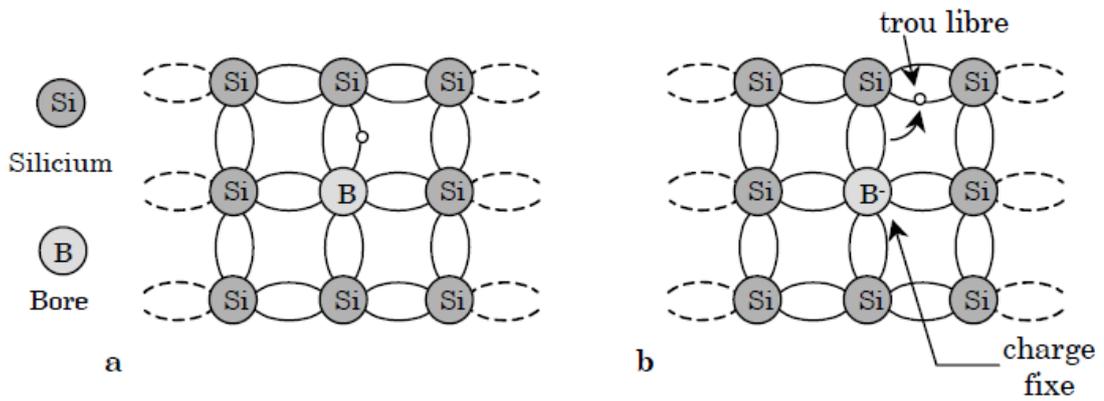


Figure 1.4 : Silicium dopé au Bore. a. T = 0K. b. T=50K. [3]

- Trous = porteurs majoritaires / électrons = porteurs minoritaires.

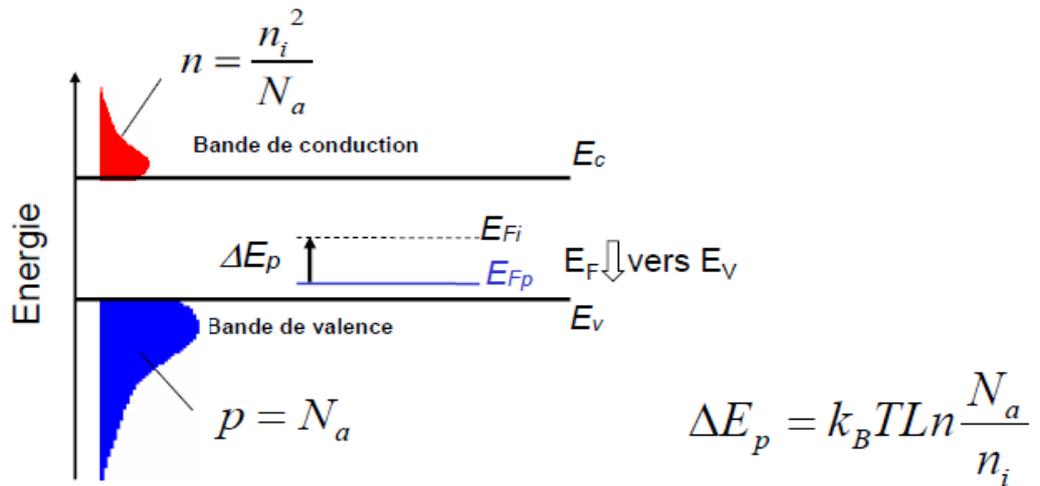


Figure 1.5 : : bande d'énergie de semi-conducteur extrinsèque de type P [3]

1.3 Jonction PN

Parmi tous les dispositifs à semi-conducteur, la jonction P-N est un composant essentiel à la fois pour ses applications directes et parce que la compréhension de sa physique permet la compréhension de nombreux autres dispositifs.

Une jonction P-N est constituée par un cristal semi-conducteur dont la concentration en impuretés profondes varie avec x pour passer d'une région de type P à une région de type N.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction (dite P-N) a été formée. La zone où la charge n'est pas nulle porte le nom de zone de charge d'espace (ZCE) [6].

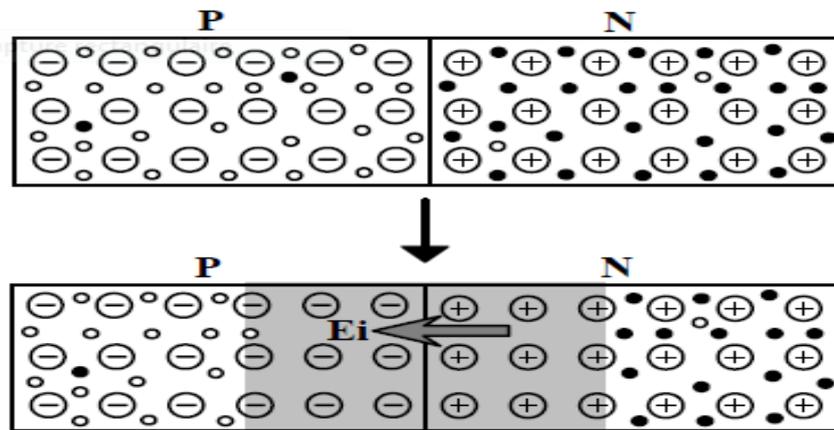


Figure 1.6 : La jonction PN [4]

1.4 zone de charge d'espace (ZCE)

La zone de charge d'espace (ZCE), appelée aussi la zone de déplétion, ou zone désertée, correspond à la région qui apparaît dans une jonction P-N, entre la zone dopée N et la zone dopée P. Elle est appelée « zone de déplétion » ou « zone désertée » parce qu'elle est dépourvue de porteurs libres, et elle est appelée « zone de charge d'espace » parce qu'elle est constituée de deux zones chargées électriquement (contrairement au reste du semi-conducteur N et du semi-conducteur P qui sont globalement neutres) [7].

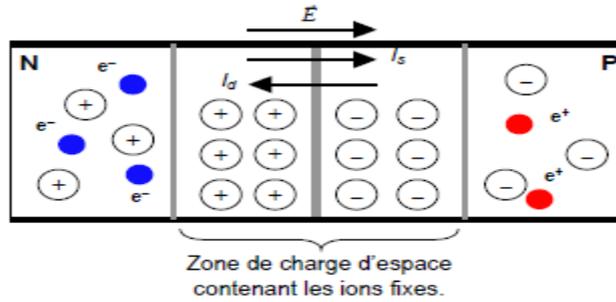


Figure 1.7 : La zone de charge d'espace(ZCE)

1.5 Notion et structure de bande d'énergie

Les bandes d'énergie donnent les états d'énergie possibles pour les électrons en fonction de leur vecteur d'onde, dans les directions de plus hautes symétries de la première zone de Brillouin. Elle se décompose en bandes de valence et bande de conduction. Ce sont la bande de valence la plus basse, la bande de conduction la plus haute, et la bande interdite qui les sépare qui déterminent principalement les propriétés de transport du semi-conducteur. [8]

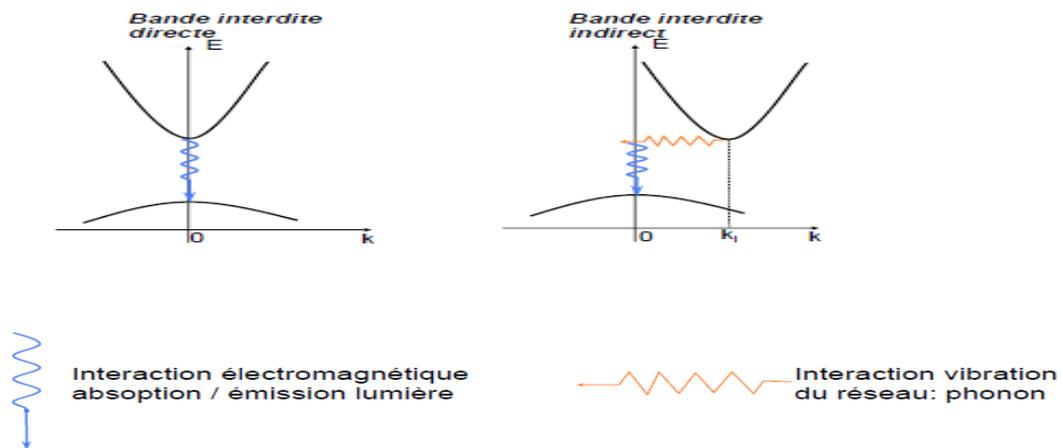


Figure 1.8 : représentations schématiques du gap direct et du gap indirect [8].

Les semi-conducteurs ont une bande de conduction (BC) et une bande de valence(BV). Les niveaux d'énergie pertinents sont ceux du dernier niveau saturé, et du premier niveau vide, Entre ces deux niveaux se trouve un trou en énergie (gap)

- La bande de valence : c'est la bande qui correspond à la bande d'énergie la plus élevée entièrement remplie d'électrons.
- La bande de conduction : est définie comme le premier niveau énergétique au-dessus de la bande de valence où accèdent les électrons excités.
- La bande interdite : cette bande représente l'énergie qu'il faut fournir à un électron pour qu'il passe de la bande de valence à la bande de conduction. [9]

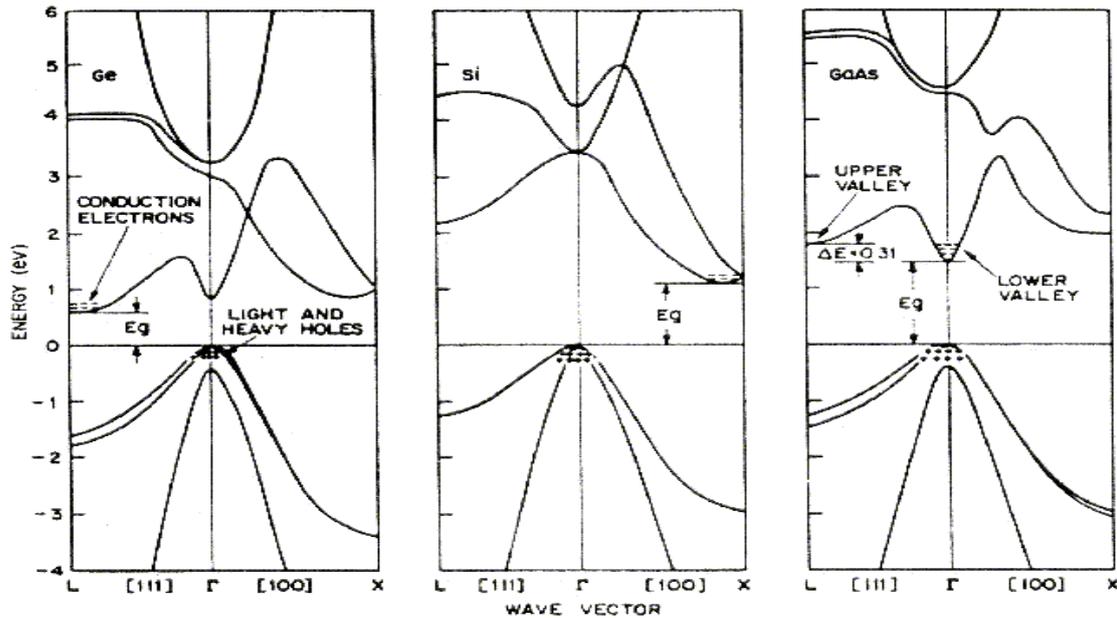


Figure 1.9 : Bande énergie de quelques semi-conducteurs usuels [10]

Ps : dépend des directions cristallographiques.

1.6 La bande interdite

La famille des matériaux semi-conducteurs, peut être classée en deux familles. Les matériaux à gap direct, comme la plupart des composés issues des colonnes III- V du tableau périodique et les matériaux à gap indirect comme le silicium (colonne IV). La bande interdite (l'énergie de gap) E_g d'un semi-conducteur détermine comment réagit une cellule solaire à la lumière.

Le tableau suivant montre les valeurs de la bande interdite de quelques semi-conducteurs. Elle est propre à chaque semi-conducteur mais selon le besoin on la change en les combinant (composés binaires, ternaires...) [11].

Matériaux	Bande interdite (eV) à 300 k
Si	1.12
Ge	0.66
GaAs	1.42
InP	1.42
CdS	2.42
CdTe	1.48

Tableau 1.1 : Bande interdite de quelques SC [12]

La bande interdite du matériau semi-conducteur détermine la longueur d'onde de la lumière nécessaire pour générer de l'énergie électrique. La relation reliant la bande interdite et la longueur d'onde est [12] :

$$\lambda (\mu\text{m}) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1,24}{E_g(\text{eV})} \quad (1.2)$$

Donc :

$$\text{Energie du photon} = 1,24 / \lambda$$

Où :

- λ : la longueur d'onde en μm .
- h : la constante de Planck,
- c : la vitesse de la lumière dans le vide
- E_g : l'énergie du gap en eV

1.7 Gap direct et gap indirect

Considérons le gap des différents semi-conducteurs. Le gap est par définition la largeur de la bande interdite, La nature du gap joue un rôle fondamental dans l'interaction du

semi-conducteur avec un rayonnement électromagnétique (en particulier lumineux), et donc dans le fonctionnement des composants utilisés en optoélectronique.

1.7.1 Gap direct

Dans les semi-conducteurs à gap direct, les électrons et les trous possèdent le même vecteur d'onde k , le maximum d'énergie de la bande de valence et aligné avec le minimum d'énergie de la bande de conduction [1]. Le minimum central de la bande de conduction correspond à des électrons de faible masse effective, donc très mobiles [9].

1.7.2 Gap indirect

Dans les semi-conducteurs à gap indirect, le maximum d'énergie de la bande de valence et le minimum d'énergie de la bande de conduction sont décalés, leurs vecteurs d'onde sont donc différents [8], leur bande de conduction correspond à des électrons de grande masse effective, donc ayant une faible mobilité [9].

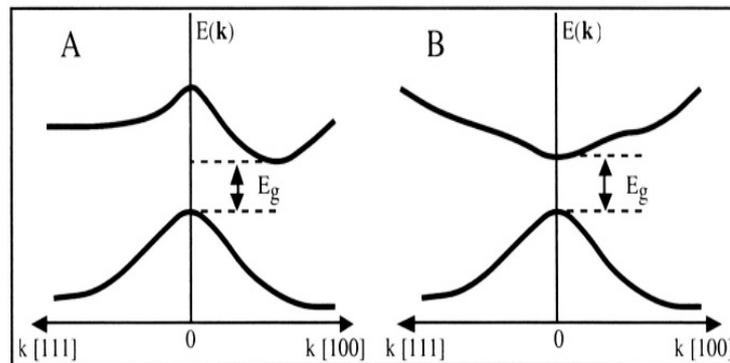


Figure 1.10 : Structure de bande d'énergie du : gap indirect A et gap direct B [9]

1.8 Masse effective

La masse effective est une notion utilisée en physique du solide pour l'étude du transport des électrons. Plutôt que de décrire des électrons de masse fixée évoluant dans un potentiel donné, on les décrit comme des électrons libres dont la masse effective varie. Cette masse effective peut-être positive ou négative, supérieure ou inférieure à la masse réelle de l'électron. [13]

La masse effective est définie par le tenseur d'ordre 2 des dérivées secondes de l'énergie E par rapport au vecteur d'onde K :

$$\left(\frac{1}{m}\right)_{i,j} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial K_i \partial K_j} \quad (1.3)$$

1.8.1 Masse effective des électrons

- **Masse effective des électrons** : elle est inversement proportionnelle à la dérivée seconde de la courbe de dispersion de l'énergie dans l'espace K^{\rightarrow} .

$$m_e^* = \frac{\hbar^2}{d^2 E / dk^2} \quad (1.4)$$

Dans le cas d'un semi-conducteur à gap direct, la bande de conduction est uni vallée, centrée en $k_0=0$ et isotrope au voisinage de k_0 . Si on appelle E_c l'énergie minimum, l'expression $E(k)$ s'écrit :

$$E(k) = E_c + \frac{1}{2} \frac{d^2 E(k)}{dk^2} \quad (1.5)$$

Où, compte tenu de la définition de la masse effective :

$$E(k) = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad (1.6)$$

Ainsi l'électron au voisinage du minimum de la bande de conduction se comporte comme un électron libre de masse m_e^* .

Dans le cas d'un semi-conducteur à gap indirect, la bande de conduction est multi vallée et anisotrope. Les expressions des masses effectives sont données par :

$$m_l^* = \frac{\hbar^2}{d^2 E / dk^2} \quad (1.7)$$

$$m_t^* = \frac{\hbar^2}{d^2 E / dk^2} \quad (1.8)$$

Avec :

- m_l^* : masse effective de l'électron de la vallée considérée, dans son mouvement suivant l'axe de révolution de l'ellipsoïde, appelée aussi masse effective longitudinale.
- m_t^* : masse effective de l'électron dans son mouvement dans le plan perpendiculaire à l'axe de révolution, appelée aussi masse effective transversale. [14]

1.8.2 Masse effective des trous

La masse effective des trous est définie comme celle des électrons, mais la bande de valence des semi-conducteurs cubique est composée de deux branches dégénérées en $K=0$.

Les énergies des trous sont comptées positivement vers le bas. La bande de plus grande courbure, bande inférieure, correspond à des trous de masse effective inférieure (bande des trous légers) et la bande de plus faible courbure, bande supérieure, correspond à celle des trous lourds.

$$m_{hh} = \frac{m^*_{hh}}{\gamma_1 + 2\gamma_2} \quad (1.9)$$

$$m_{lh} = \frac{m^*_{lh}}{\gamma_2 - 2\gamma_1} \quad (1.10)$$

Avec : γ_1 et γ_2 paramètre de Luttinger.

m_{hh} et m_{lh} : permettent de définir des masses effectives isotropes. Ils ont été calculés pour la plupart des semi-conducteurs [14].

	Trous	Electrons
Si	0.559 m_0	1.06 m_0
Ge	0.36 m_0	0.55 m_0
GaAs	0.64 m_0	0.66 m_0

Tableau 1.2 : Masses effectives des électrons et des trous [15].

1.9 La recombinaison

Le processus de génération de porteurs est équilibré par un processus de disparition appelé recombinaison [3].

Recombinaison des porteurs en excès :

Si la concentration des porteurs excède la valeur à l'équilibre, l'excès de porteurs se recombine et l'annihilation se produit. Le taux de cette annihilation est [11] :

$$(n - n_0)/\tau_0 = (p - p_0)/\tau_0 [cm^{-3}s^{-1}] \quad (1.11)$$

Avec :

- n_0, p_0 : densités à l'équilibre.
- τ_0 : durée de vie de recombinaison du porteur.

1.9.1 Mécanismes de recombinaisons

Directe (bande à bande) : l'électron passe directement de la BC à la BV

Indirecte : l'électron passe de la BC à un niveau d'énergie d'une impureté agissant comme "centre de recombinaison" et situé dans la bande interdite, puis il sera réémis vers la BV [3].

Trois mécanismes de recombinaisons fonctionnent en dépend de la nature du **SC** et la densité de dopage :

- **Recombinaisons bande à bande**, c'est la plus dominante dans les SC à gap direct et à haute densité de dopages.
- **Recombinaison AUGER** : dominante dans les SC fortement dopés.
- **Recombinaison à travers des pièges** : ou des centres de recombinaison, dominante dans les SC fortement dopés à gap indirect. [16]

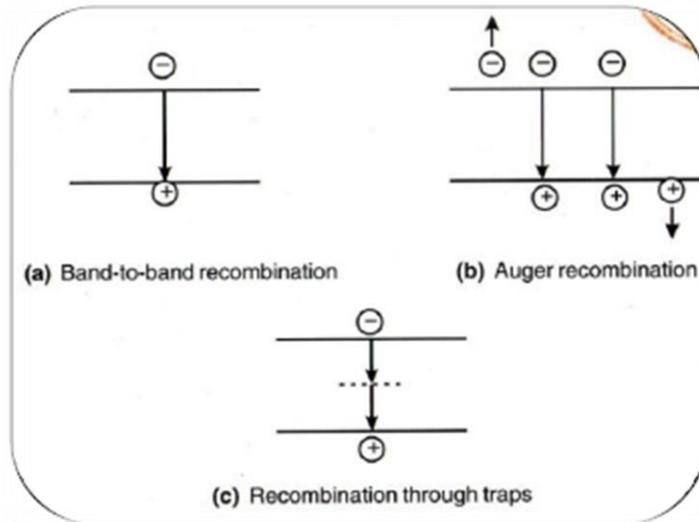


Figure 1.11 : Les mécanismes de recombinaisons [16]

1.9.2 Le taux de recombinaison

Est relié à la longueur de diffusion L qui est la distance parcourue avant de se recombiner [3] :

$$L = \sqrt{\frac{kT\mu\tau}{q}} \quad \text{ou} \quad \sqrt{D\tau} \quad (1.12)$$

Où :

k : constante de Boltzmann

μ : la mobilité

q : charge de l'électron

D : Constante de diffusion

T : température.

1.9.3 Vitesse de recombinaison en surface

En raison de phénomènes intrinsèques et extrinsèques, la surface du semi-conducteur est le siège d'états spécifiques, appelés états de surface, dont les niveaux d'énergie peuvent se situer dans le gap. [16]

Le courant de diffusion qui s'écrit:

$$J_n = \pm e D_n \frac{d \Delta n}{dx} \quad (1.13)$$

On exprime le courant j sous une autre forme :

$$J_n = e \Delta n S \quad (1.13)$$

$$S = \pm \frac{D_n}{\Delta n} \frac{d \Delta n}{dx} \quad (1.14)$$

S est appelée vitesse de recombinaison en surface.

Δn et $d \Delta n / dx$ sont respectivement la densité de porteurs excédentaires et son gradient, à la surface [3].

1.10 La génération

La génération peut être considérée comme le mécanisme inverse de la recombinaison. La génération des porteurs est un processus pour reconstituer l'équilibre d'un semi-conducteur qui a été perturbé.

La génération se produit quand il y a un déficit de la concentration en porteurs comparée à la concentration d'équilibre.

Des porteurs doivent être créés dans le semi-conducteur pour atteindre cet équilibre. Lorsqu'on expose l'une des faces de la cellule solaire sous un flux solaire, on constate immédiatement un phénomène intéressant au niveau de cette structure, la radiation lumineuse peut ainsi atteindre le cristal semi-conducteur, et en particulier la jonction. Cette radiation est capable de générer une paire électron-trou [17,18].

On peut faire une analogie entre les deux processus génération et recombinaison, autrement dit, les trois mécanismes de la recombinaison peuvent être inversés pour créer des porteurs. Il s'agit de la génération bande à bande, intrinsèque, de la génération extrinsèque par l'intermédiaire du niveau de dopage ou bien le piège âgée la génération Auger.

La génération bande à bande peut se produire quand un électron est sorti directement dans la bande de conduction. Ceci peut se produire par l'absorption de la lumière, photo-génération. Des centres d'impuretés peuvent être utilisés pour la génération, l'électron n'aurait pas besoin autant d'énergie pour atteindre la bande de conduction

comme le cas de la génération bande à bande. La génération Auger se produit souvent quand un champ électrique est appliqué [17,18].

1.10.1 Le taux de génération

Le calcul du taux de génération de paires électron-trou, $G(x)$ ($cm^{-3}s^{-1}$) s'effectue de la façon suivante. Appelant I_0 , le flux de photons ($cm^{-2}s^{-1}$) incidents sur la face éclairée du matériau et α (cm^{-1}) le coefficient d'absorption de la lumière par le matériau. A la profondeur x , ce taux de génération vaut [19] :

$$G(x) = \alpha \cdot (1 - R) I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (1.15)$$

R : coefficient de réflexion

1.11 Les semi-conducteurs III-V

Dans l'ensemble des matériaux, les semi-conducteurs III-V constituent une classe bien définie, avec des propriétés physiques particulières qui sont sources d'intérêt au plan de la connaissance fondamentale et à celui des applications.

Principalement remarquables par leurs propriétés électroniques, les semi-conducteurs III-V interviennent dans presque tous les équipements électriques et optiques [9].

En électronique rapide et en optoélectronique, les composés semi-conducteurs III-V sont préférables que d'autres [20].

1.11.1 Définition des semi-conducteurs III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la III^{ème} colonne et d'un élément de la V^{ème} colonne de la classification périodique de Mendeleïev.

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

Tableau 1.3 : Extrait de classification périodique des éléments.

1.11.2 Propriétés des matériaux III-V

On résume les propriétés des matériaux III-V dans le tableau suivant en donnant :

E_g : énergie de la bande interdite.

λ_g : longueur d'onde du seuil d'absorption.

m^*/m_0 : masse effective des électrons (où m^* et m_0 sont respectivement la masse effective et la masse de l'électron dans le vide) du bas de la bande de conduction.

a_0 : paramètre de réseau.

Composé III-V	E_g (eV)	λ_g (μm)	m^*/m_0	a_0 (\AA)	Structure de la bande interdite
BN	≈ 7.5	0.17		3.615	indirect
AlP	2.45	0.51		5.463	indirect
AlAs	2.16	0.57		5.661	indirect
AlSb	1.58	0.75	0.12	6.138	indirect
GaP	2.26	0.55	0.82	5.449	indirect
GaAs	1.42	0.87	0.063	5.653	direct
GaSb	0.72	1.85		6.095	direct
InP	1.35	0.92	0.08	5.868	direct
InAs	0.36	3.44	0.023	6.058	direct
InSb	0.17	7.30	0.014	6.479	direct

Tableau 1.4 : Propriétés et paramètres caractéristiques des principaux composés binaires III-V [21]

1.11.3 Structure cristalline des matériaux III-V

Les semi-conducteurs III-V sont obtenus, soit par tirage de monocristaux massifs, soit par croissance épitaxiale de couches minces et cristallisent dans la structure zinc blende ou würtzite [22].

La plupart des matériaux III-V ont une structure de type 'zinc-blende', Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant (C, Ge, Si, etc.), est constituée de deux sous-réseaux

cubique face centrée (CFC), l'un d'élément III et l'autre d'élément V, décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale, c'est-à-dire de $a\sqrt{3}/4$, où a représente le paramètre de maille du matériau [9].

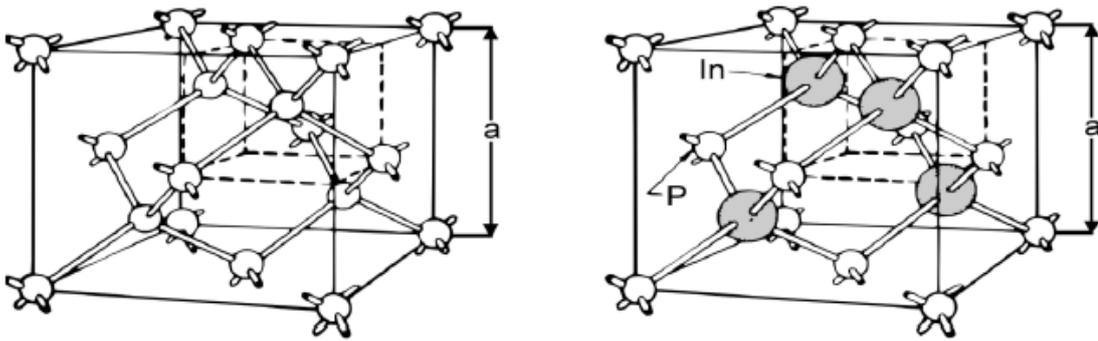


Figure 1.12 : Mailles cristallographiques des structures Diamant et Zinc Blende [23].

Structure de bande :

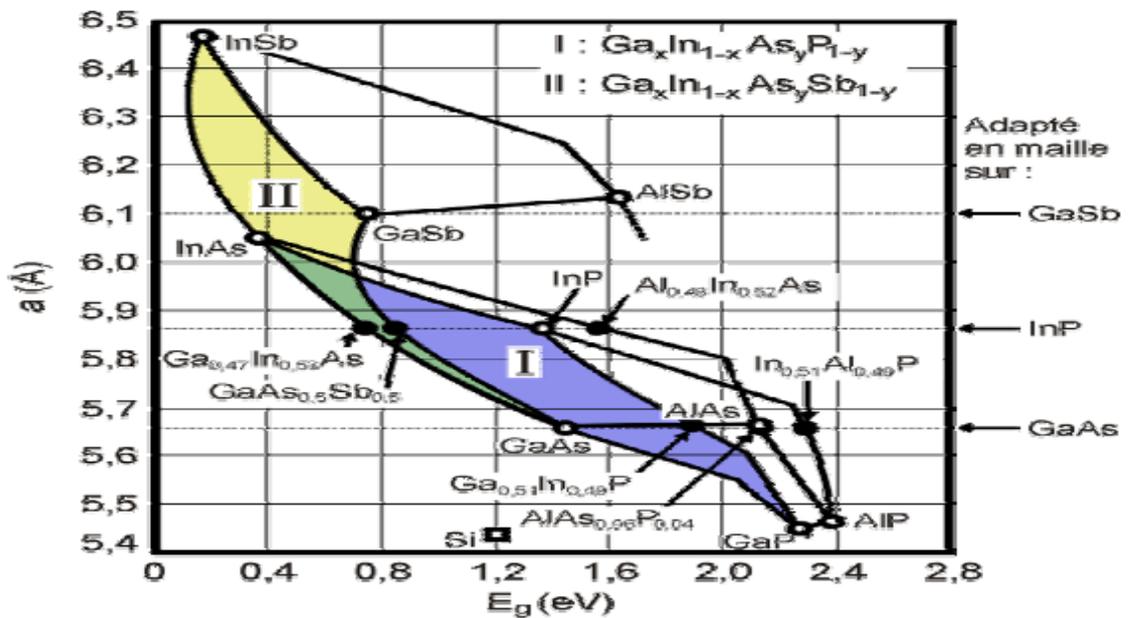


Figure 1.13 : Évolutions de l'énergie de bande interdite et du paramètre cristallin des alliages de composés III-V [24].

Les points du graphe montrent la position des composés binaires stœchiométriques, et les lignes représentent l'évolution du gap E_g et du paramètre cristallin a , en fonction de

la composition des alliages ternaires. Ce diagramme est donc très important parce qu'il permet de connaître la composition de tout alliage ternaire susceptible d'être déposé en couche mince, par épitaxie, sur un substrat binaire comme GaAs ou InP. Les matériaux III-V offrent donc une grande variété de compositions permettant de modifier leurs propriétés électroniques.

1.11.4 Les avantages des semi-conducteurs III-V

Les principaux avantages des semi-conducteurs III-V sont les suivants [9] :

- Leur propriété semi-isolant (substrat Si) permet la fabrication des circuits intégrés hyperfréquences.
- Leur résistance aux radiations.
- Leur capacité de travailler à des températures plus importantes que celle du silicium standard, ce qui est important pour les applications militaires.
- Leurs performances vitesse/consommation nettement supérieure à celles des calculateurs utilisant des circuits en silicium (applications numériques).
- Leur très vaste domaine de fréquences couvert puisqu'il s'étend de 1 GHz à plus de 100 GHz.

1.12 Arséniure de gallium « GaAs »

C'est un matériau semi-conducteurs III-V à gap direct présentant une structure cristalline cubique de type sphalérite (blende), composé de deux semi-conducteurs de la colonne III et V. Il est utilisé dans un large domaine d'application en électronique. Le GaAs est connu comme le matériau le plus adapté à la conversion photovoltaïque, grâce à sa bande interdite directe, de valeur 1,42eV, qui s'adapte bien avec le spectre solaire. La valeur de sa bande interdite est proche de la valeur idéale d'une cellule solaire mono-jonction (1,4 eV pour les spectres solaire AM1.5G (1.6 eV AM0)) [1].

Le choix d'un matériau permettant d'obtenir de hautes performances en circuits intégrés ne dépend pas uniquement de ses propriétés électriques. Il résulte d'un compromis entre différents critères tels que ses propriétés métallurgiques. La diversité de composants élémentaires réalisables, et la tenue en fiabilité. Pour la réalisation des

circuits intégrés numériques très rapides, l'arséniure de gallium présente de nombreux avantages. [25]

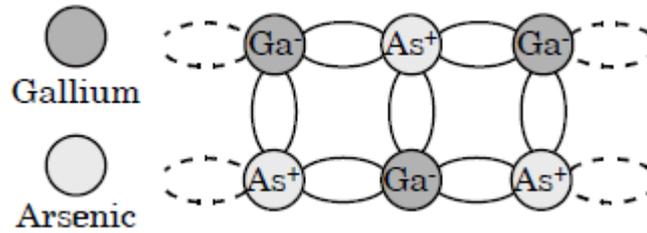


Figure 1.14 : Semi-conducteur composé : GaAs [3].

1.12.1 Structure de bande électronique du GaAs

L'arséniure de gallium étant un composé à gap direct, les transitions électriques les moins énergétiques entre la bande de valence de la bande de conduction peuvent se faire avec conservation du vecteur d'onde K (sans l'intervention des phonons) [17].

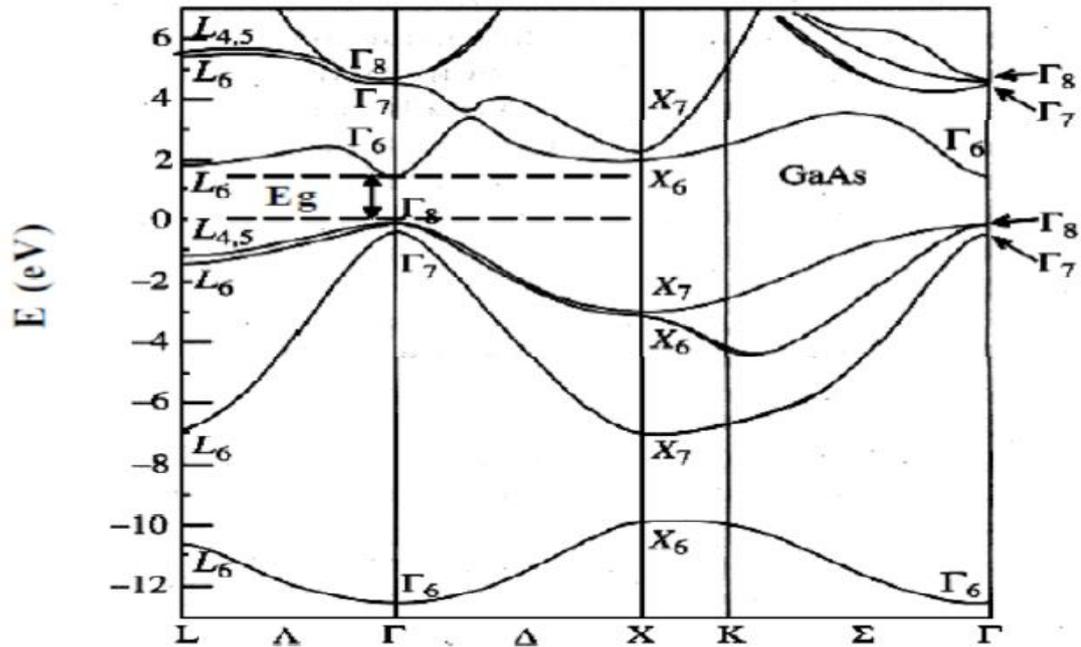


Figure 1.15 : Structure de bande électronique du GaAs dont la bande interdite est reportée en pointillés ; $E_g=1,42$ eV à 300 K [19].

Le maximum de la bande de valence et le minimum de celle de conduction sont au centre (de la zone de Brillouin d'où une absorption et une émission de lumière très efficaces ('gap direct' tout comme l'InP, InAs, GaSb, InSb, AlSb) [19].

1.12.2 Propriétés électroniques du GaAs

Les propriétés de transport électronique du GaAs sont remarquables : mobilité très élevée ($8000\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ pour un matériau peu dopé), vitesse de saturation élevée (2.10^7 cm/s) obtenue pour un champ électrique trois fois plus faible que pour le silicium. Ces propriétés garantissent l'obtention de vitesses de commutation élevées sous de faibles consommations [25].

De par sa grande largeur de bande interdite, le GaAs peut être obtenu sous forme d'un semi-isolant de haute résistivité (10^7 à 110^9 $\Omega\cdot\text{cm}$). L'épitaxie ou l'implantation de la couche active dans ce semi-isolant, permet d'assurer l'isolation inter dispositif et ainsi, d'offrir des capacités parasites entre les dispositifs et le plan de masse extrêmement faibles [25].

Nom	Symbole	Unités	Valeur
Structure cristalline			Zinc Blende
Paramètre cristallin	a	Å	5,63
Masse molaire	M	$g.mole^{-1}$	144,63
Masse volumique	ρ	$g.cm^{-3}$	5,32
Nombre atomes par unité de volume	N	cm^{-3}	$4,4.10^{22}$
Hauteur de la Bande Interdite	E_g	eV	1,42
Densité effective d'états dans la Bande de Conduction	N_c	cm^{-3}	$4,7.10^{17}$
Densité effective d'états dans la Bande de Valence	N_v	cm^{-3}	$7,0.10^{18}$
Mobilité des électrons	μ_n	$cm^2.v^{-1}.s^{-1}$	$8,5.10^3$
Mobilité des trous	μ_p	$cm^2.v^{-1}.s^{-1}$	$4,0.10^2$
Vitesse de saturation des électrons	v_{sn}	$cm.s^{-1}$	1.10^7
Constante diélectrique relative	ϵ_r		12,9
Champ de claquage	E_{av}	$kV.cm^{-1}$	3.10^2
Affinité électronique	χ_s	eV	4,07
Coefficient de dilatation thermique	α_l	K^{-1}	$6,86.10^{-6}$
Chaleur spécifique	C	$J.g^{-1}.K^{-1}$	0,35
Conductivité thermique	λ	$W.cm^{-1}.K^{-1}$	0,46
Température de fusion	T_f	°C.	1240

Tableau 1.5 : Quelques propriétés spécifiques du GaAs à 300 K [25]

1.13 Etude du Coefficient d'absorption

Le Coefficient d'absorption α , est une propriété qui définit la quantité de lumière absorbé par un matériau.

Les électrons dans la bande de valence d'un semi-conducteur peuvent absorber les photons dont l'énergie est plus grande que l'énergie de bande interdite (E_g), puis passer à la bande de conduction. Le coefficient d'absorption $\alpha(E)$, pour une énergie E supérieure à l'énergie de la bande interdite et est donné par :

$$\alpha(E) = \alpha_0 \sqrt{E - E_g} \quad (1.16)$$

Avec :

α_0 : Constante

1.14 La structure à jonction PIN

La structure consiste en un substrat type N, sur lequel une couche intrinsèque légèrement dopée I est épitaxie [6]. SiO₂ est ensuite déposée et configurée pour former des fenêtres pour une ultérieure diffusion à haute température d'un dopant de type P. La région N peut ensuite être amincie de l'arrière et les contacts métalliques sont placés des deux côtés ; surfaces devant et arrière. Les contacts devant sont conçus pour laisser passer la lumière à l'intérieur du dispositif, tandis que celui arrière est planaire, sur toute la surface. Un revêtement antireflet sur le devant complète la structure. Typiquement l'épaisseur de la région p devra être très petite, comparée avec la région intrinsèque. Ce design forme la base de tous les dispositifs semi-conducteur unique et binaire, bien que des fois il est mis sens dessus dessous; P-, épitaxie intrinsèque et enfin la diffusion- n.[11]

1.14.1 Photodétecteur p-i-n

Une photodiode p-i-n est constitué par une région intrinsèque prise en sandwich entre deux régions dopée n et p respectivement. Ces photo-détecteurs sont les plus répandus parce que l'épaisseur de la région d'absorption peut être choisie de façon à optimiser le rendement quantique et la fréquence de réponse [26]. A des longueurs d'ondes proches de λ_c , la profondeur d'absorption devient très longue. En régime permanent, la densité de courant total est [27]:

$$J_{tot} = J_{dr} + J_{diff} \quad (1.17)$$

J_{dr} : est le courant de dérive, du aux porteurs photo-générés dans la région de déplétion.

J_{diff} : est le courant de diffusion, du aux porteurs photo-générés en dehors de la région de déplétion.

1.15 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons rappelé quelques propriétés des semi-conducteurs aussi nous avons présenté la masse effective des électrons et des trous, et les phénomènes de la recombinaison et la génération.

Ensuite, nous avons étudié les semi-conducteurs III-V et leurs propriétés. On a défini l'Arséniure de Gallium "GaAs", sa structure de bande, et son coefficient d'absorption.

A la fin nous avons étudié la structure de la jonction PIN. Ces connaissances sont indispensables pour la compréhension de fonctionnement et la détermination des caractéristiques de cellules solaire.

Chapitre 2 Cellules solaires cœur/coquille à base d'une jonction

PIN en GaAs

2.1 Introduction

L'énergie solaire potentiellement récupérable sur Terre est plus que suffisante pour assurer la consommation en énergie actuelle mondiale. C'est pourquoi cette énergie renouvelable semble des plus prometteuses. Cependant l'utilisation des cellules photovoltaïques est freinée par leur rapport coût/efficacité encore trop faible aujourd'hui.

La cellule photovoltaïque est l'élément central des installations solaires et permet de convertir l'énergie lumineuse en électricité. Afin d'anticiper la croissance attendue de la consommation mondiale d'électricité, de faire face à la diminution des ressources actuellement utilisées pour la production de l'électricité et de limiter le réchauffement climatique, l'utilisation de plus en plus grande des technologies photovoltaïques est une des solutions à mettre œuvre.

Dans ce chapitre on fait appel à quelques bases indispensables dans le domaine photovoltaïque, Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie photovoltaïque, et les cellules solaires avec leurs caractéristiques photovoltaïques.

2.2 Le rayonnement solaire

La source principale de lumière naturelle de notre planète est le Soleil situé à 150 millions de kilomètres. Il est composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium et il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 10^7K .

La conception de systèmes photovoltaïques nécessite la connaissance du rayonnement solaire utile sur le site de l'installation.

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées [28].

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement à :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4 \mu\text{m}$),
- 47% dans la bande visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$),
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$).

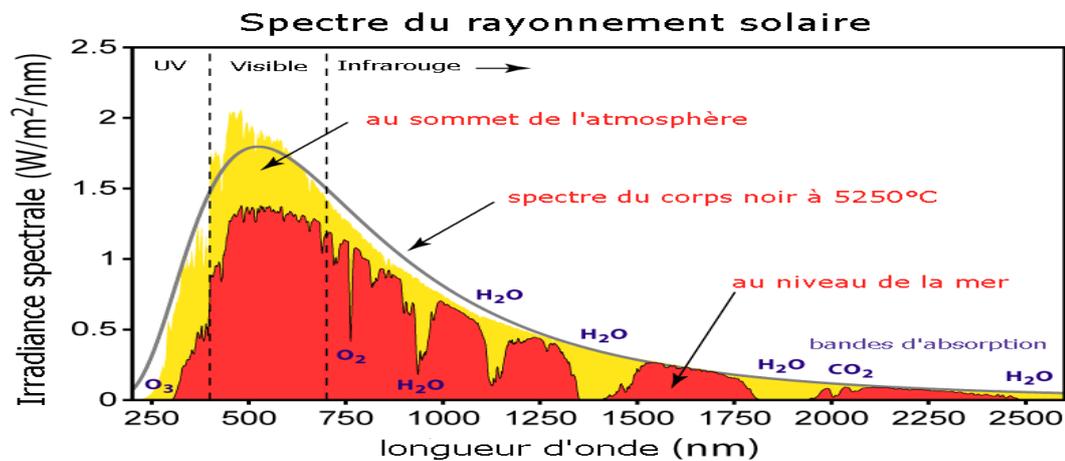


Figure 2.1 : analyse spectrale du rayonnement solaire [29].

Une partie du rayonnement solaire est absorbée et réfléchiée par l'atmosphère terrestre mais l'énergie solaire arrivant au niveau des continents reste de loin le gisement énergétique le plus important de la planète.

La performance de tout système solaire thermique dépend de l'intensité du rayonnement solaire disponible. Le rayonnement solaire est caractérisé par une

intensité variable pendant la journée et atteint sa valeur maximale à midi lorsque la longueur du trajet qu'il traverse dans l'atmosphère est courte [2].

2.2.1 Composition du rayonnement solaire

Suite à l'atténuation du rayonnement solaire par les différents phénomènes atmosphériques, le rayonnement solaire sur une surface au sol est composé comme suit:

- **Le rayonnement direct** : est le rayonnement reçu directement du Soleil.
- **Le rayonnement diffus** : est le rayonnement provenant de toute la voûte Céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement Solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages.
- **Le rayonnement solaire réfléchi** : est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- **Rayonnement global** : la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Les systèmes solaires photovoltaïques permettent de convertir cette énergie lumineuse en énergie électrique.

2.2.2 Radiation d'un corps noir

Un corps noir absorbe toutes les radiations incidentes sur sa surface, et émet un rayonnement en fonction de sa température. Les sources corps noir qui sont d'intérêt pour le photovoltaïque, émettent de la lumière dans le domaine visible.

L'irradiation spectral d'un corps noir est donnée par la loi de Planck, donnée

Par l'équation suivant :

$$F(\lambda) = 2\pi A \frac{c}{\lambda^2(\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1)} \quad (2.1)$$

Avec :

ν : La fréquence de la lumière.

k : La Constante de Boltzmann.

T : La température.

c : La vitesse de la lumière dans le vide

λ : La longueur d'onde de la lumière.

A : constante

2.3 La technologie photovoltaïque

La technologie photovoltaïque « PV » transforme l'énergie solaire en énergie électrique à l'aide de semi-conducteur. C'est la technologie qui a le plus grand potentiel, mais aussi qui nécessite le plus de développement technique.

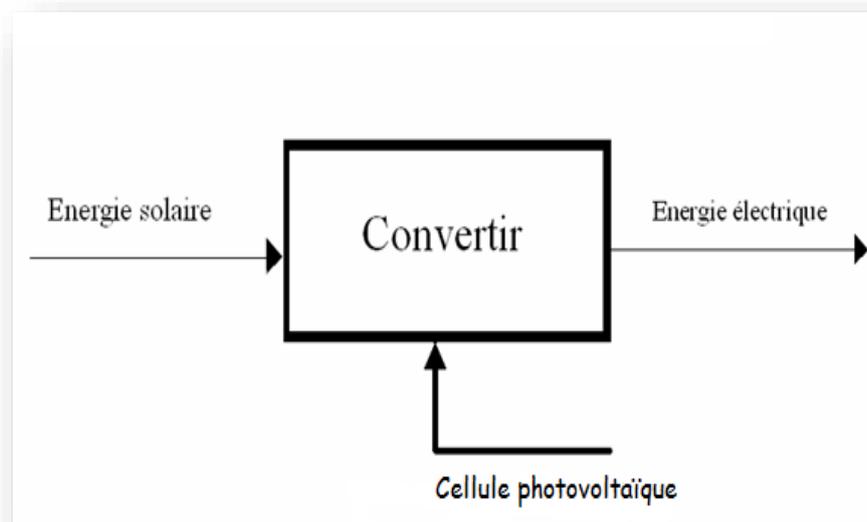


Figure 2.2 : Principe de fonctionnement de technologie PV.

Cette technologie est à la base des cellules solaires photovoltaïques qui ont sérieusement commencé à être étudiées depuis les années 1950 quand la Première cellule solaire à base de silicium cristallin, avec un rendement de 6%, a été développée dans laboratoire BELL. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques pendant des années,

ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules solaires trouvèrent leurs premières applications dans l'alimentation des satellites [29].

2.3.1 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque correspond à la capacité qu'ont certains matériaux de transformer directement l'énergie des photons en énergie électrique. Dès que l'énergie du photon est supérieure à celle de la bande interdite E_g des matériaux, une paire électron-trou est formée.

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire.

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives.

Une explication adéquate de l'effet photovoltaïque exige l'application de la théorie quantique de la lumière, laquelle considère que la lumière est constituée d'une énergie discrète constituée de photons. L'énergie de chaque photon est reliée à la fréquence ν et la constante de Planck comme suit :

$$E_{ph} = h\nu \quad (2.2)$$

où :

h : est la constante de Planck

ν : la fréquence du photon]

c : la vitesse de la lumière dans le vide

λ : la longueur d'onde du photon

2.3.2 Définition d'une cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est un composant électronique, lorsqu'il est assemblé en batterie il compose un panneau solaire photovoltaïque, ces cellules sont constituées de semi-conducteurs principalement à base de silicium(Si), et couramment de L'arséniure de gallium (GaAs) et très rarement de sulfure de cadmium (Cds) ou de tellure de cadmium (Cdte).

Elles se présentent sous la forme de deux fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté en contact étroit. Ce semi-conducteur est compris entre deux électrodes métalliques d'une épaisseur de l'ordre d'un millimètre et le tout est protégé par une vitre. Dans les cellules photovoltaïques, l'absorption des photons libère des « électrons » chargés négativement et des « trous » chargés positivement. Ces charges électriques sont collectées par un contact à l'arrière, produisant un courant électrique.

2.3.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

La cellule solaire est une photodiode à jonction PN de grande surface qui génère un signal électrique sans l'aide d'une source d'énergie auxiliaire. Lorsque les photons issus du soleil frappent la cellule, certains sont réfléchis et d'autres sont transmis ou absorbés dans la cellule solaire, seuls les photons absorbés participent à l'effet photoélectrique.

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau. Ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces. Pour cela, un champ magnétique permanent est créé au moyen d'une jonction PN entre deux couches de silicium cristallin.

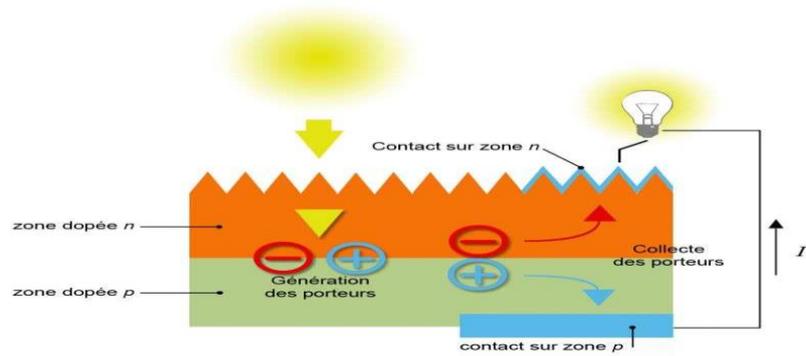


Figure (2.3) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés /décrochés " : si 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, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique.

2.3.4 Conversion de la lumière en électricité

La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs.

- Toute matière est faite d'atomes comportant des électrons (charges négatives élémentaires) qui gravitent autour d'un noyau.
- Un courant électrique est une circulation d'électrons.

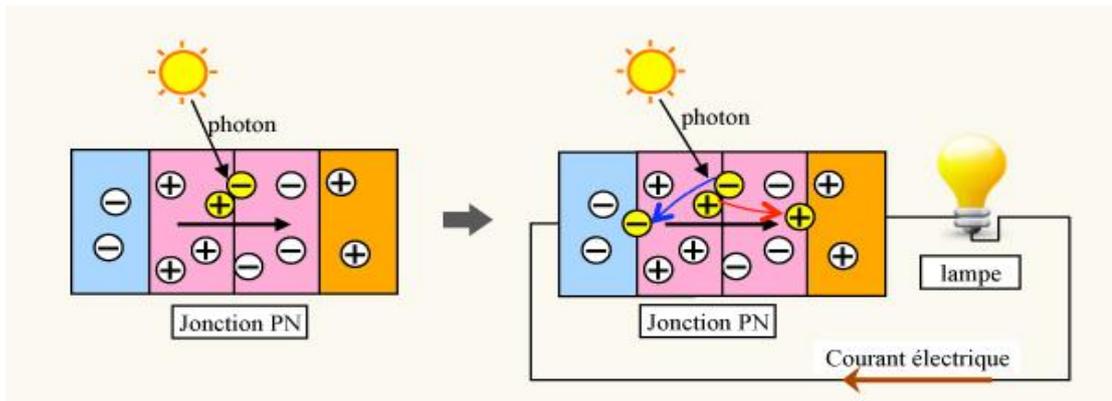


Figure (2.4) : La conversion des photons en courant électrique [30]

Met en jeu 3 phénomènes physiques :

2.3.4.a Absorption de la lumière dans le matériau :

Pour mieux comprendre ce qui suit, il faut d'abord s'intéresser un peu aux métaux (ou semi-conducteurs, la différence dans ce principe n'existe pas).

Un métal est un réseau cristallin d'ions positifs fixés, dans lequel circulent des électrons libres de se déplacer. Les atomes métalliques forment des structures 2D ou 3D qui se répètent, appelées mailles. À l'intérieur, des électrons à peu près libres circulent entourés des atomes dont ils sont issus. C'est ce mouvement électronique qui est responsable de la bonne conduction, et plus ces électrons sont libres, plus le métal est bon conducteur. Ces électrons plus ou moins libres sont appelés « électrons de conduction ». Pour extraire un électron, il faut lui fournir une énergie W_s , qui correspond à la *largeur de bande interdite** de l'espèce concernée.

C'est là qu'interviennent les photons ; composants de la lumière qui nous est émise du soleil, ils ont des caractéristiques étonnantes. Celle qui nous intéresse le plus particulièrement, c'est leur capacité de rencontrer des électrons, composants essentiels de toute espèce physique, et d'interagir avec eux.

Dans ce cas, il peut se passer trois choses :

Si l'énergie E du photon est inférieure à la *largeur de bande interdite*, alors l'électron reste sa et le photon prend une autre direction ; les photons sont dits déviés

- Si $E=W_s$, alors l'électron est tout juste expulsé de l'espèce : les photons sont dits absorbés.
- Si $E>W_s$, alors l'électron est délogé. On parle dans ce cas du travail d'extraction* fourni par le photon ; les photons sont dits absorbés.
- Seuls les photons absorbés contribuent à l'effet photovoltaïque.

2.3.4.b Transfert de l'énergie des photons aux charges électriques :

Suite au choc photon-électron, l'électron part, désormais « libre », dans le matériau. L'énergie E a servi à déloger cet électron, mais il y a encore un excédent ; l'électron gagne cette énergie (dite cinétique), notée E_c , selon la formule :

$$E_c = E - W_s \quad (2.3)$$

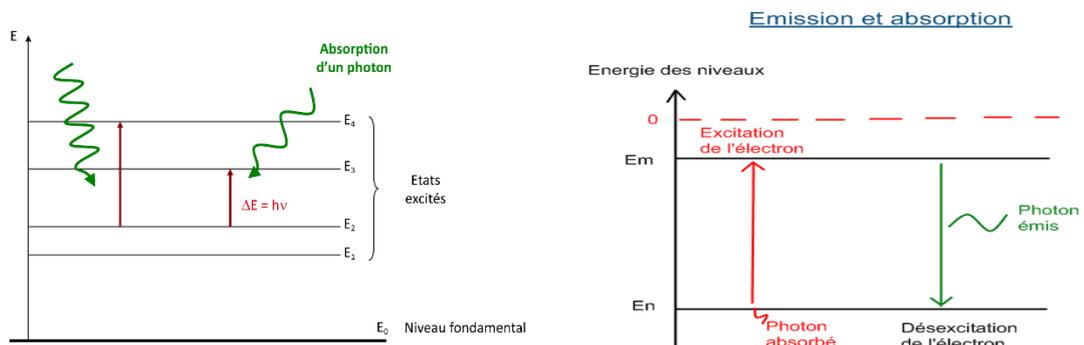


Figure 2.5 : Emission et absorption et transfert de l'énergie des photons.

À noter que l'énergie E des photons que l'on trouve à la surface de la Terre environne les 2eV, et que les semi-conducteurs ont une largeur de bande interdite entre les 0.6eV et les 2eV.

Les électrons libres se déplacent donc avec un nouveau mouvement, ainsi qu'une nouvelle énergie cinétique. Le dopage* de la zone N va donc contribuer à faire sortir cet électron, tandis que la zone P va l'attirer. Entre les deux, il y a la diode conductrice. Tout

cela forme un champ électrique qui déterminera la direction que vont prendre les électrons.

Mais il leur faut vite rejoindre la diode conductrice, avant que le phénomène de recombinaison* ne se produise, et qu'ainsi l'électron libre soit « perdu » (pour le moment en tous cas).

2.3.4.c La collecte des charges :

La conductivité électrique désigne la capacité d'un corps à conduire un courant électrique lorsqu'une tension lui est appliquée.

On peut classer les matériaux selon trois types:

- Les isolants, comme le verre qui ne conduisent pas le courant
- Les conducteurs, principalement les métaux, qui conduisent le courant
- Les semi-conducteurs dont la conductance varie en fonction de facteurs

Un matériau semi-conducteur est un matériau à l'état solide ou liquide, qui conduit l'électricité à température ambiante, mais moins aisément qu'un métal conducteur.

Exemples de semi-conducteurs:

- Silicium
- Germanium
- Arséniure de gallium

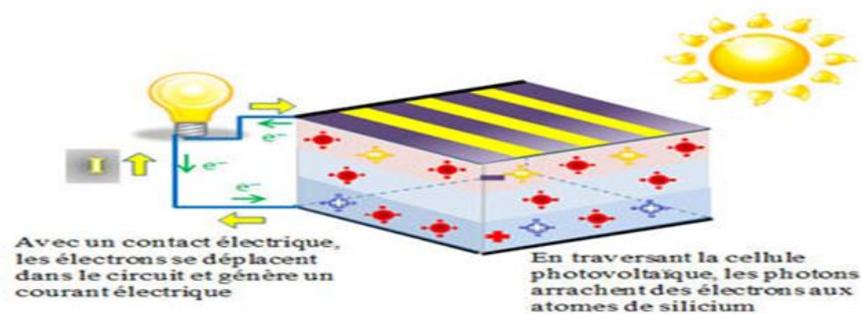


Figure 2.6 : La collecte des charges

Aux basses températures, les semi-conducteurs purs se conduisent comme des isolants. Aux hautes températures, ou en présence d'impuretés ou de lumière, la conductivité des semi-conducteurs s'accroît fortement, pouvant même devenir comparable à celle des métaux. Le courant passe donc.

L'accroissement de la conductivité en fonction de la température, de la lumière ou des impuretés s'explique par une augmentation du nombre des électrons de conduction, qui transportent le courant électrique. Dans un semi-conducteur pur tel que le silicium (le plus fréquemment utilisé), les électrons périphériques d'un atome sont mis en commun avec les atomes voisins pour établir des liaisons covalentes qui assurent la cohésion du cristal. Ces électrons périphériques (électrons de valence ou électrons de la couche externe), ne sont pas libres de transporter le courant électrique. Pour produire des électrons de conduction, on expose à la température ou à la lumière les électrons périphériques, afin de rompre les liaisons covalentes : les électrons sont alors mobiles. Les défauts ainsi créés, appelés « trous » ou « lacunes », participent au flux électrique. Ces trous sont porteurs d'électricité positive et expliquent l'augmentation de la conductivité électrique des semi-conducteurs avec la température. Les cellules sont constituées de matériaux semi-conducteurs, le silicium est le plus employé. Même si l'arséniure de gallium offre les meilleures performances, il reste beaucoup plus onéreux.

2.4 Architecture de la cellule photovoltaïque

Le fonctionnement des cellules photovoltaïque est basé sur trois mécanismes: absorption des photons, la conversion de l'énergie optique en énergie électrique et la collecte de cette énergie sur un circuit extérieur. Chacun de ces mécanismes engendrent des pertes et la partie suivante les principaux composants utilisés à ce jour pour améliorer le rendement de conversion.

Ces composants sont utilisés dans de nombreuses structures de cellules et nous les présenterons sur la structure la plus commune, la cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces (figure (2-7)). [31]

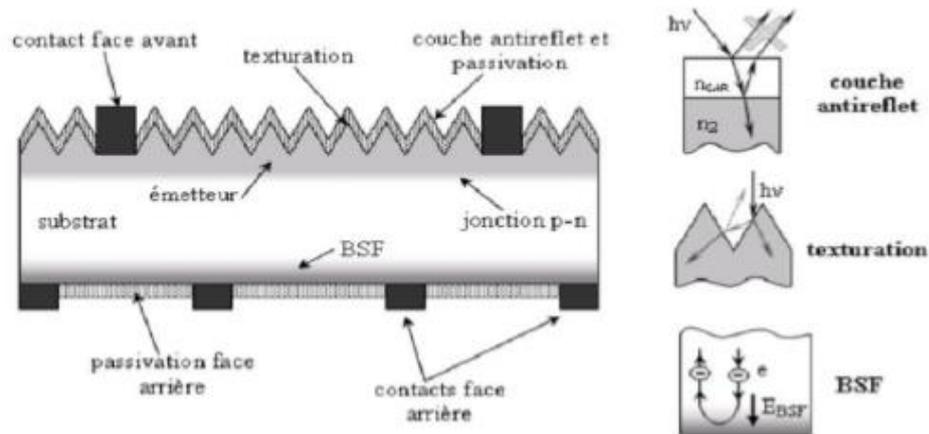


Figure 2.7 : Structure d'une cellule photovoltaïque

2.5 Caractérisation des cellules photovoltaïques

2.5.1 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire

2.5.1.a. L'équilibre thermodynamique :

A l'équilibre thermodynamique, l'agitation thermique permet à des électrons de la bande de valence de passer dans la bande de conduction en laissant un trou la bande de valence [41].

- Le potentiel de diffusion de la jonction P N, (V_0) est défini par :

$$V_0 = V_n - V_p = \left(\frac{kT}{q}\right) \log\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \quad (2.4)$$

Avec :

V_n et V_p : les potentiels de diffusion dans les matériaux N et P, respectivement.

k : la constante de Boltzmann.

T : la température.

n_i : la concentration intrinsèque des porteurs libres.

N_d : la concentration de dopants donneurs ionisés dans le matériau N.

N_a : la concentration de dopants accepteurs ionisés dans le matériau P.

q : la charge de l'électron.

2.5.1.b. Hors équilibre thermodynamique :

On s'éloigne de l'équilibre thermodynamique lorsque la jonction est éclairée, ou lorsque l'on y applique une polarisation. L'équilibre entre les courants de diffusion et inverse est modifié. Pour une excitation lumineuse, la tension d'excitation est appelée tension de circuit ouvert V_{co} , Dans le cas d'une polarisation directe V_d aux bornes de la jonction, la barrière de potentiel qV_0 diminue. En conséquence, le courant des porteurs majoritaires augmente.

Et l'intensité du champ électrique interne diminue. On a alors injection de porteurs minoritaires dans les zones neutres, des électrons dans le matériau P et des trous dans le matériau N.

Les densités des porteurs minoritaires aux extrémités de la ZCE peuvent se déduire à partir du potentiel [32].

$$V_{tot} = V_0 - V = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) - V \quad (2.5)$$

La Largeur de la zone de charge d'espace sous polarisation (V) s'écrit alors :

$$W = \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon}{q}\right) \cdot (V_0 - V) \cdot \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)} \quad (2.6)$$

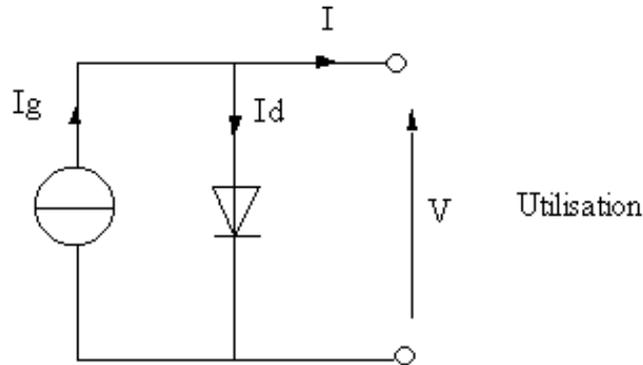
Avec :

V_0 : Le potentiel de diffusion.

V : Le potentiel de polarisation imposé aux bornes de la jonction.

2.5.2 La modélisation d'une cellule photovoltaïque :

On peut modéliser une cellule photovoltaïque éclairée comme ci-dessous



I_g : courant généré I_d : courant de diode I : courant disponible

Figure 2.8 : I_g : courant généré I_d : courant de diode I : courant disponible

Cellule éclairée :

Le courant disponible I sera $I = I_g - I_d$ avec $I_g = K \cdot \Phi$ (K étant une constante due à la fabrication de la cellule et Φ l'ensoleillement en W/m^2). En court-circuit, $V = 0$ donc $I_d = 0$ d'où $I_{cc} = I_g = K \cdot \Phi$.

Le courant de court-circuit est donc proportionnel à l'ensoleillement. En circuit ouvert, $I = 0$ et $I_d = I_g$.

2.5.3 Caractéristique(I-V) d'une cellule solaire :

Les performances de la cellule solaire sont représentées à travers la caractéristique courant-tension $I(V)$. Cette dernière apporte une lecture claire des paramètres caractérisant la cellule solaire, comme le rendement de la cellule, les différents types des résistances parasites et le facteur de forme.

Aussi on peut utiliser cette caractéristique pour contrôler et commander les paramètres physiques de la cellule tels que le dopage et l'épaisseur des couches. Le courant est mesuré en fonction de la tension appliquée sous obscurité et sous ensoleillement, la lumière permet de décaler la courbe $I-V$ vers le bas dans le quatrième quadrant, car le courant photoélectrique provoque la production de l'énergie.

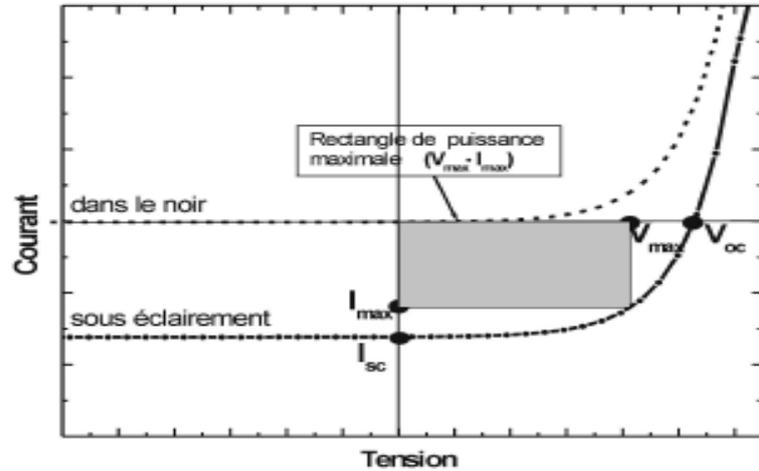


Figure 2.9 : Caractéristique courant tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque dans le noir et sous éclairement.

2.5.4 Caractéristique (I-V) sous obscurité

Si la cellule n'est pas éclairée, $I_g = 0$ et la cellule se comporte comme une diode, donc comme un récepteur.

Dans l'obscurité la cellule solaire se comporte comme un composant actif (pas de production de courant). La densité de courant totale traversant la cellule solaire dans l'obscurité est donnée par :

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{AK_B T}\right) - 1 \right] \quad (2.7)$$

Ou par le courant :

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{AK_B T}\right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

Où K_B est la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$), T la température absolue en degrés kelvin, la charge élémentaire ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$), A le facteur d'idéalité de la diode et J_0 le résultat de la recombinaison des porteurs minoritaires dans les deux régions quasiment neutres n et p, leur valeur est définie par l'équation :

$$J_0 = q \left(\frac{D_p n_i^2}{L_p N_D} + \frac{D_n n_i^2}{L_n N_A} \right) \quad (2.9)$$

Où D_n et D_p sont respectivement les coefficients de diffusion des porteurs minoritaires dans le matériau p et n, n_i la concentration intrinsèque, L_p et L_n la longueur de diffusion du porteur minoritaire dans le matériau p et n et N_D et N_A la concentration des deux régions P et N.

2.5.5 Caractéristique sous ensoleillement

L'étude de la cellule solaire sous ensoleillement peut se faire selon deux cas : Le cas idéal (pas de pertes) et le cas réel où l'on tient compte de l'effet des résistances parasites.

2.5.6 La tension de circuit ouvert (V_{co})

Exprimée en Volts, est la tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans la cellule. Elle dépend de la différence des travaux de sortie des électrodes et aussi de la différence entre le niveau du donneur et le niveau de l'accepteur, Elle varie peu avec l'éclairement.

2.5.7 Le courant de court-circuit (I_{cc}) :

Exprimé en mA, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage sans application de tension. Il est proportionnel à l'éclairement et dépend principalement de la mobilité des porteurs de charges.

2.5.8 La puissance maximale P_{max}

Les valeurs V_{max} et I_{max} sont définies de telle sorte que le produit $|V_{max} \cdot I_{max}|$ soit maximal, Ce produit correspond à la puissance maximale P_{max} pouvant être délivrée par la cellule photovoltaïque :

$$P_m = V_m \times I_m \quad (2.10)$$

2.5.9 Le facteur de forme (FF)

Est le rapport de la surface du rectangle P_{max} au produit de la tension en circuit ouvert et du courant court-circuit :

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad (2.11)$$

2.5.10 le rendement de conversion (η) :

Exprimé en pourcentage, est défini comme le rapport de la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque et la puissance lumineuse incidente :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (2.12)$$

P_{in} : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm².

La densité de puissance incidente égale à : $\frac{P_{in}}{A}$

A : section de la cellule.

2.6 Cellule solaire à structure PIN

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque est illustré sur la figure qui représente le fonctionnement d'une jonction PN où la zone de charge d'espace créé est une région intrinsèque. Les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions P, I, N, et leur comportement diffère suivant la région de la jonction où ils sont créés. [33]

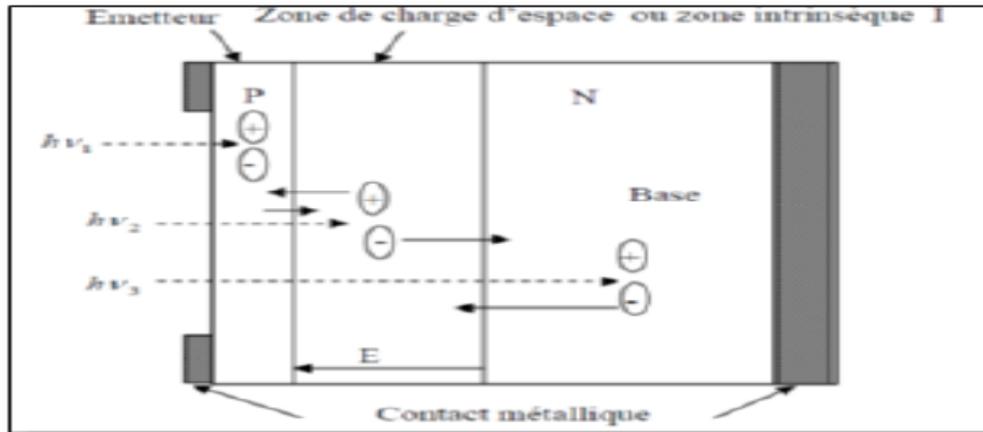


Figure 2.10 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire à structure PIN

La structure PIN admet une entrée latérale qui a l'avantage d'éliminer l'absorption non voulue de la région p, en minimisant la perte de lumière. En plaçant un revêtement antireflet du côté droit, un grand volume d'absorption est créé et qui est particulièrement utile pour détecter la longueur d'onde près du gap sans avoir à recourir à de très large régions intrinsèques, et nécessairement un grand voltage appliqué pour la déplétion complète [11].

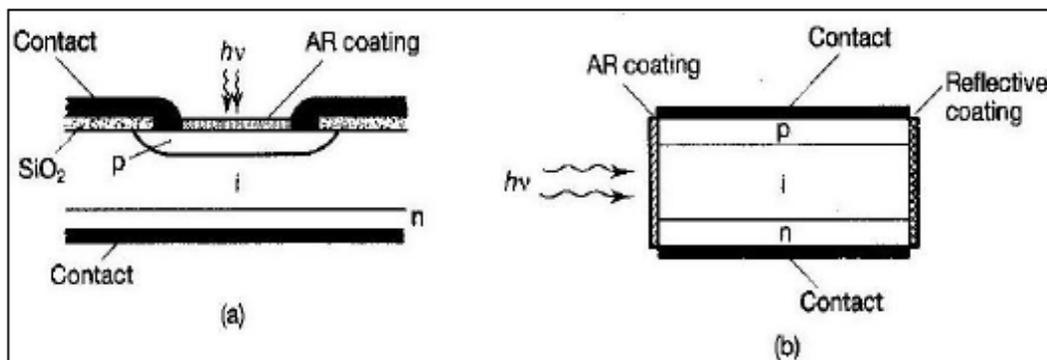


Figure 2.11: Structure de base d'une cellule solaire pin : a) entrée lumière haut b) entrée de côté [34]

2.7 Cellules solaire cœur-coquille à base d'une jonction PIN

L'énergie solaire a un énorme potentiel en tant que ressource sans carbone, mais représente plusieurs fois le coût de l'électricité produite au charbon, en grande partie parce que le photovoltaïque d'efficacité pratique nécessite des matériaux semi-conducteurs purs de haute qualité.

Les nanofils sont très intéressants pour des applications de conversion de l'énergie, et notamment pour les cellules solaires. Sur la Figure (2.12) est représenté un schéma d'un nanofil cœur-coquille avec une jonction radiale. Sous illumination, les porteurs photo-générés sont séparés radialement, les électrons vont dans le cœur, les trous vont dans la coquille. Ils sont ensuite collectés par les contacts. L'intérêt de cette géométrie est qu'avec la structure cœur-coquille on peut optimiser séparément la collecte des porteurs dans la direction radiale et l'absorption de lumière, qui est essentiellement donnée par la longueur du fil, ce qui permet d'utiliser des matériaux de mauvaise qualité (faible durée de vie donc faible longueur de diffusion) donc de faible coût.

On peut également bénéficier du piégeage de lumière dans l'ensemble de nanofils pour avoir une bonne absorption. Dans les ensembles de nanofils, nous avons une très forte absorption. En effet ces ensembles ont une surface naturellement rugueuse, donc qui forme une sorte de traitement antireflets.

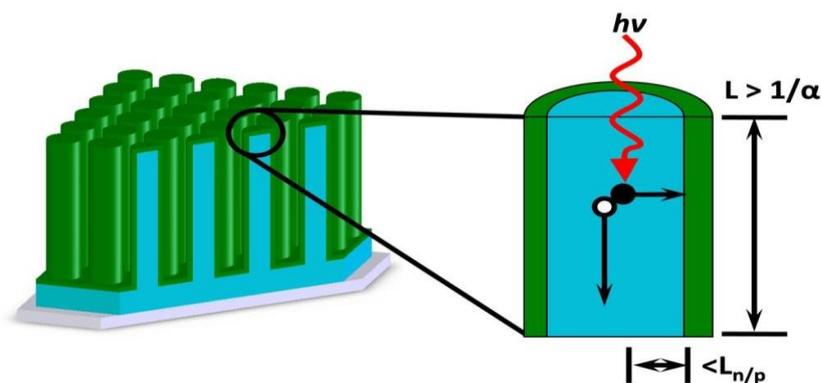


Figure 2.12 : schéma d'un nanofil cœur-coquille avec une jonction radiale [36]

Pour produire du courant dans une cellule solaire à jonction planaire, un électron ou un trou généré en profondeur dans le matériau doit se déplacer jusqu'à la jonction sans se recombiner. Pour que la longueur de diffusion des porteurs de charge soit aussi longue, le matériau doit être hautement cristallin et pur (donc coûteux). Toutefois, les cellules solaires à jonction radiale et à barrettes peuvent découpler les directions d'absorption de la lumière et de collecte des porteurs de charge de sorte qu'un semi-conducteur ayant une longueur de diffusion minoritaire plus courte que sa profondeur d'absorption optique (c.-à-d. matériau moins cher) peut effectivement produire du courant. La dimension axiale des fils est suffisamment longue pour une absorption optique suffisante tandis que les porteurs de charge sont collectés le long de la plus petite dimension radiale [36].

2.7.1 Architecture des cellules solaires planaire vs jonction radiale

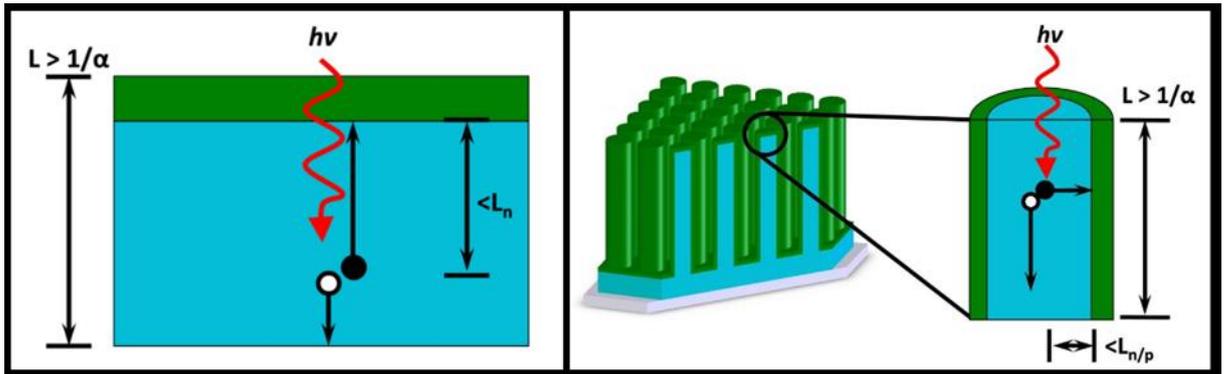


Figure 2.13 : Comparaison de structure planaire vs une structure cœur-coquille [36].

Dans le cas d'une cellule solaire à jonction planaire, l'épaisseur de la plaque semi-conductrice L , doit être supérieure à l'épaisseur optique approximative $\frac{1}{\alpha}$, pour absorber la plus grande partie de la lumière. La longueur de diffusion des porteurs minoritaires L_n doit également être supérieure à $\frac{1}{\alpha}$ ou le dispositif sera limité à la base de la cellule. La cellule de jonction radiale idéalisée consiste en un réseau dense de fils de dimensions uniformes. La longueur du fil semi-conducteur L , doit être supérieure à l'épaisseur optique $\frac{1}{\alpha}$ pour absorber la plus grande partie de la lumière, mais la longueur de diffusion des porteurs minoritaires L_n doit seulement être comparable au rayon du fil pour que le dispositif collecte la plupart de ses porteurs de charge photo-générés [36].

2.8 Conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable qui provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité en utilisant des matériaux bien particuliers tels que les semi-conducteurs.

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions générales sur les cellules solaires. Nous avons ensuite présenté le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque. On a vu que la cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire, un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par un courant (I_{max}) et une tension (V_{max}).

A la fin nous avons présenté les cellules solaires à structure PIN et les cellules cœur-coquille.

3-1 Introduction

Quel que soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire. Habituellement, les paramètres à optimiser sont les épaisseurs, les largeurs de la bande interdite E_g et les niveaux de dopage des différentes couches constituant la cellule. 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. Cette optimisation peut se faire soit expérimentalement, soit par simulation.

L'optimisation expérimentale est très coûteuse, par contre l'optimisation par simulation est moins coûteuse, vu qu'elle suit un modèle mathématique du système réel. C'est une série d'opérations effectuées sur un ordinateur et produisant un phénomène physique. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène comme s'il s'était réellement déroulé. Cette représentation peut être une série de données, une image ou même un film.

La simulation numérique 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).

Dans notre travail, nous avons utilisé le logiciel « COMSOL Multiphysics » dans nos simulations. Ce logiciel permet de résoudre les équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis.

Dans ce chapitre, nous allons étudier les caractéristiques d'une cellule solaire à base de la structure cœur coquille d'une jonction PIN en matériau GaAs.

3-2- Description de la structure simulée

Dans notre travail nous avons étudié la structure cœur coquille d'une jonction PIN pour réaliser des cellules solaires de haut rendement. La figure (3.1) montre la structure de la cellule à base de GaAs. L est la longueur de la cellule et W est l'épaisseur de la zone intrinsèque.

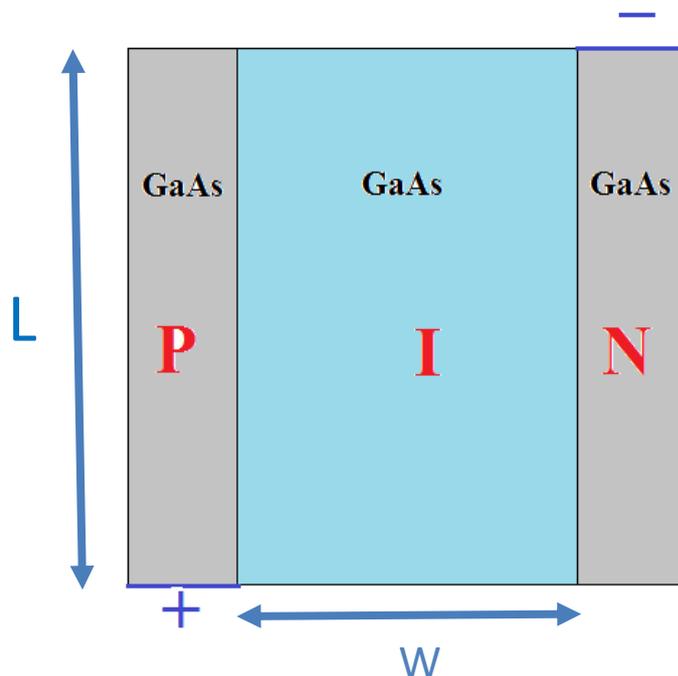


Figure (3.1) : Coupe longitudinale de la structure

L : la longueur de la cellule simulée.

W : l'épaisseur de la région intrinsèque de la structure simulée.

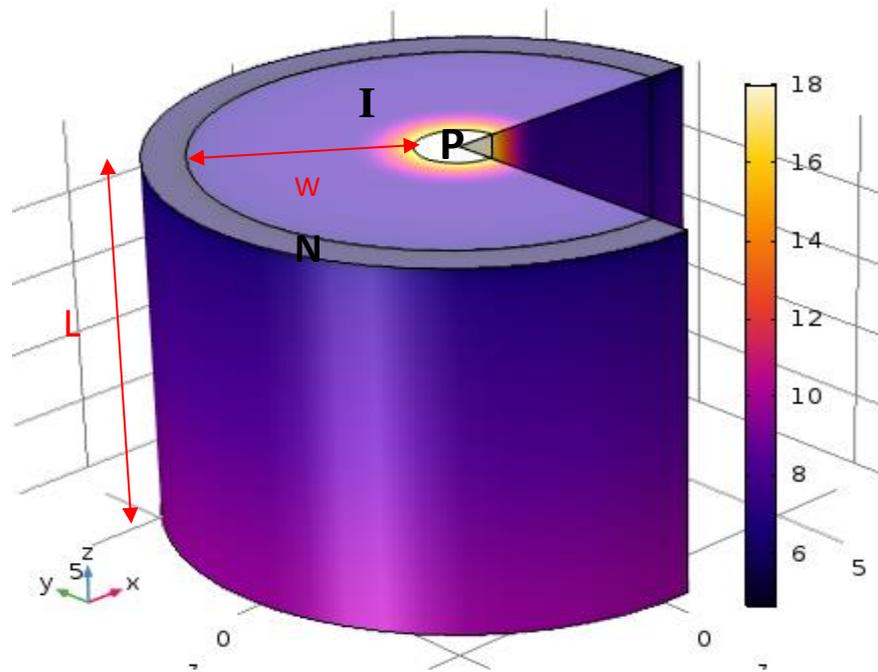


Figure (3.2) : Schéma de la structure simulée en 3D.

3-3- Paramètres de la structure

Les paramètres physiques de la structure, utilisés dans la simulation, sont regroupés dans le tableau (3.1) :

symboles	unités	significations	valeurs
N_D	m^{-3}	Dopage de la région N	10^{24}
N_A	m^{-3}	Dopage de la région P	10^{24}
t_{aun}	s	Durée de vie des électrons	10^{-7}
t_{aup}	s	Durée de vie des trous	10^{-7}

E_{g0}	eV	Energie de Gap	1,42
W	m	Epaisseur de la zone intrinsèque	10^{-6}
L	m	Longueur de la structure	5.10^{-7}

Tableau (3.1) : données de la structure simulée

3-4 Principe et objectif de la simulation

Dans notre travail nous allons étudier les caractéristiques de la cellule solaire simulée (les courants I_{ph} et I_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , la caractéristique $I(V)$, la puissance délivrée, le facteur de forme et le rendement de conversion) tout en variant les paramètres de la cellule (la longueur L , l'épaisseur W), dans le but de déterminer la structure optimale qui assure un rendement maximal.

3-5 Irradiation d'un corps noir :

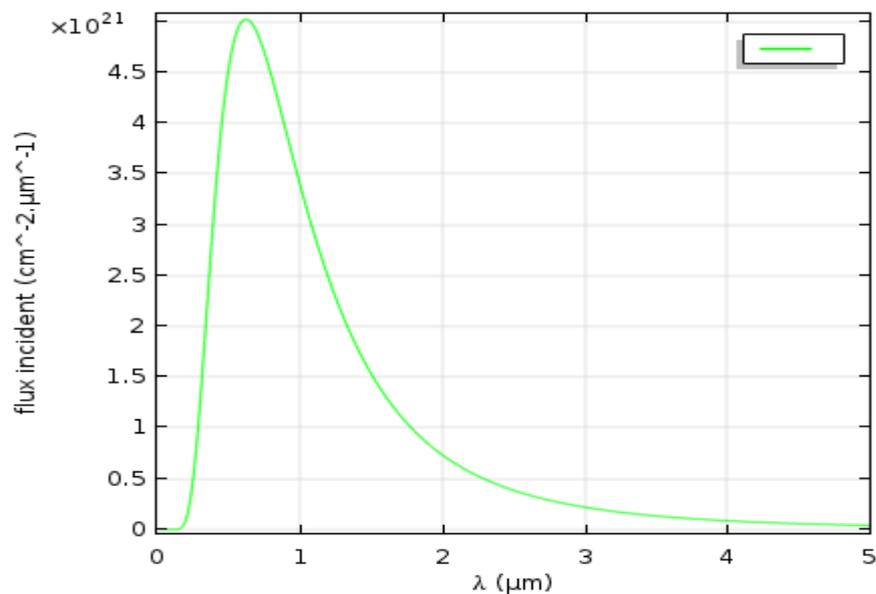


Figure (3.3) : le flux incident F en fonction de la longueur d'onde λ

La figure (3.3) représente le flux d'un corps noir F en fonction de la longueur d'onde. Le flux représente un maximum pour $\lambda=0,7 \mu\text{m}$.

3.6 L'absorption

La figure (3.4) montre la variation du coefficient d'absorption α du GaAs. On remarque que α décroît avec l'augmentation de la longueur d'onde et s'annule pour $\lambda=0.88 \mu\text{m}$

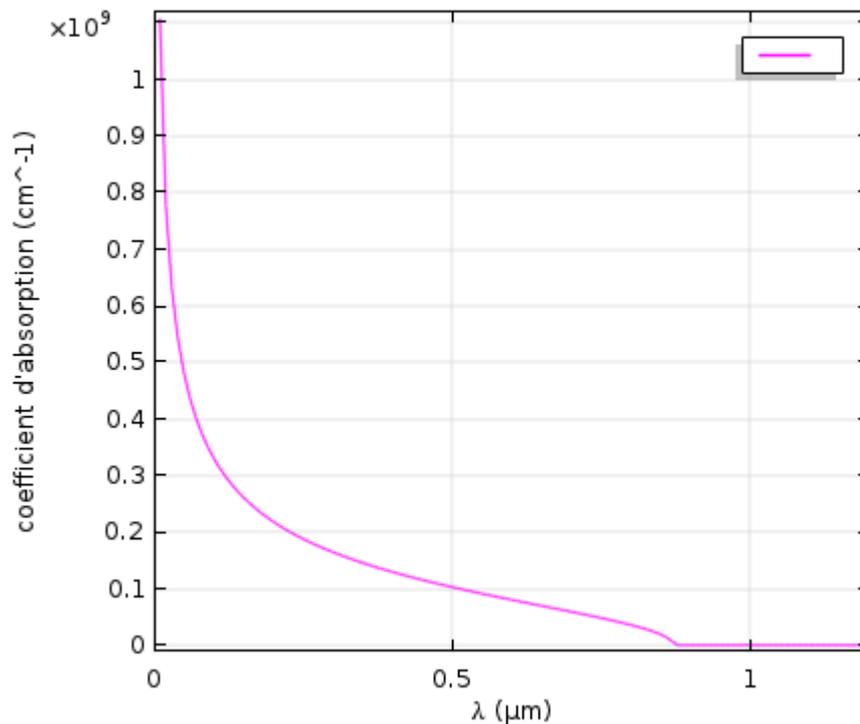


Figure (3.4) : variation du coefficient d'absorption α du GaAs en fonction de λ .

3-7 Etude de la variation de la longueur L :

3-7-1 Photo-courant I_{ph} de la cellule :

la figure (3.5) représente la variation du courant I_{ph} de la cellule solaire en fonction de la longueur d'onde λ pour différentes valeur de L. Nous constatons que toute augmentation de la longueur de la cellule L a comme conséquence une amélioration du courant I_{ph} .

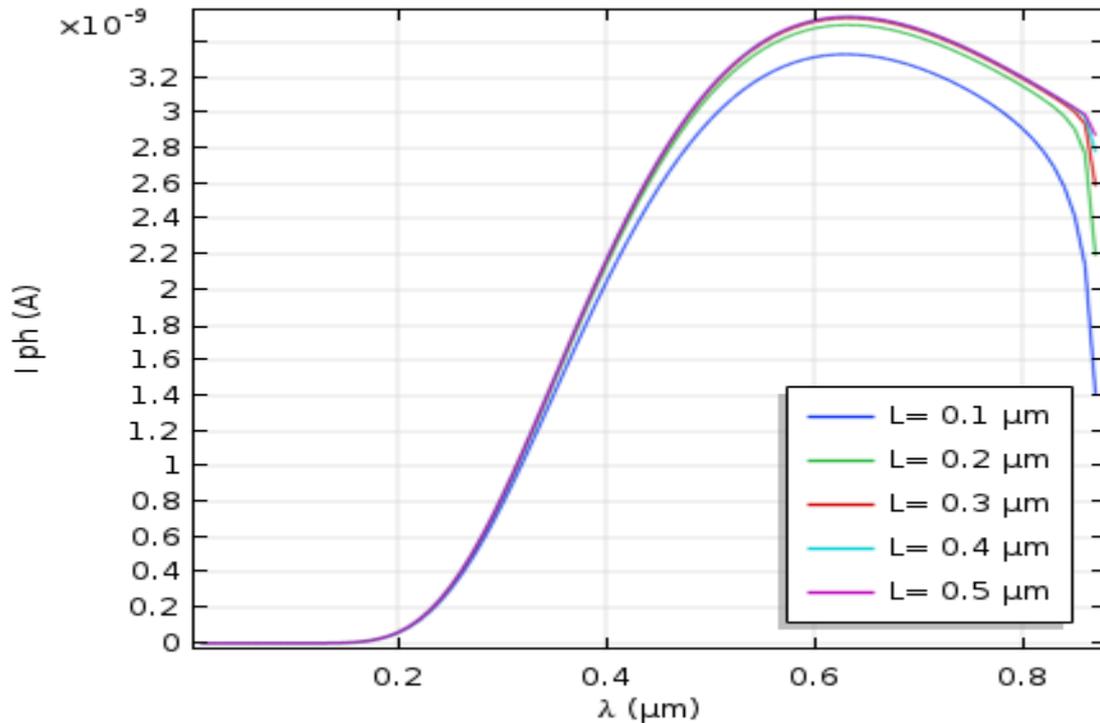


Figure (3.5) Variation du courant I_{ph} en fonction de la longueur d'onde λ pour différentes longueur de la cellule L ($W = 1 \mu\text{m}$)

3-7-2 Courant de court-circuit I_{CC} de la structure :

La figure (3.6) traduit l'influence de la longueur L de la cellule sur le courant de court-circuit I_{CC} . Nous remarquons que toute augmentation de L a pour conséquence une amélioration du courant de court-circuit, notamment pour les longueurs inférieures à $0,4 \mu\text{m}$. Au-delà de $0,4 \mu\text{m}$, la valeur du courant de court-circuit I_{CC} se stabilise. Quand la longueur L augmente, le nombre des photons absorbés croît, pour une certaine longueur supérieure à $0,4 \mu\text{m}$, tous les photons seront absorbés, il y'a donc saturation du courant.

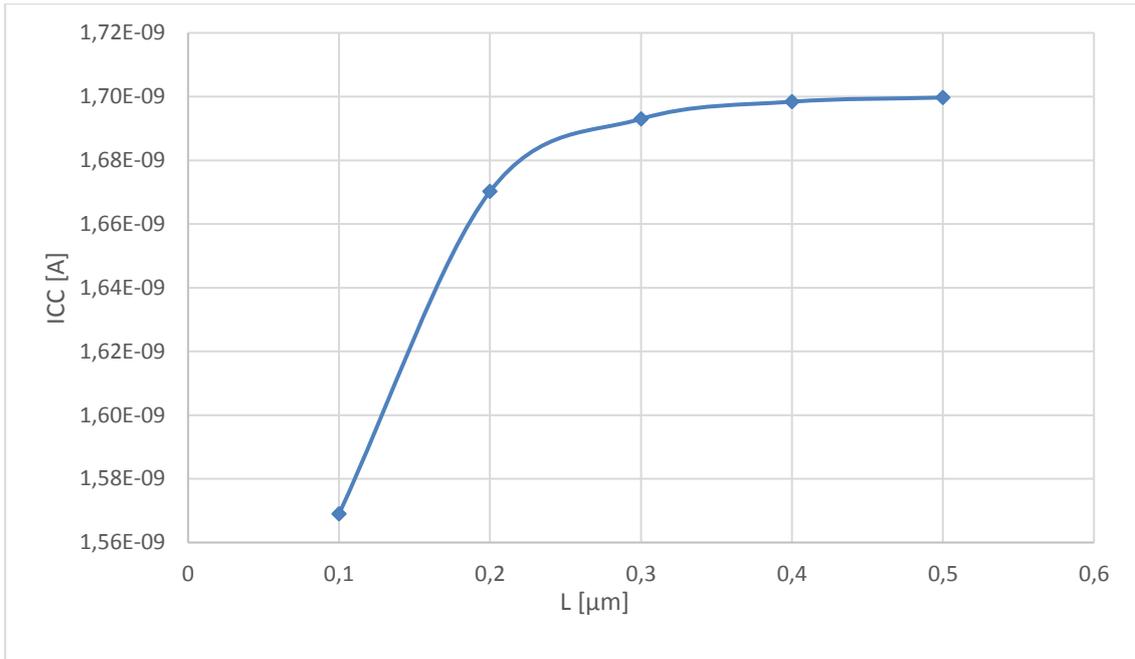


Figure (3.6) : variation du courant de court-circuit I_{CC} en fonction de la longueur L

3-7-3 Tension de circuit ouvert V_{CO} de la cellule :

Selon la figure (3.7) on remarque que la valeur de la tension de circuit ouvert V_{CO} reste constante pour toutes les valeurs de la longueur L, ce qui signifie que l'influence de la longueur L est négligeable.

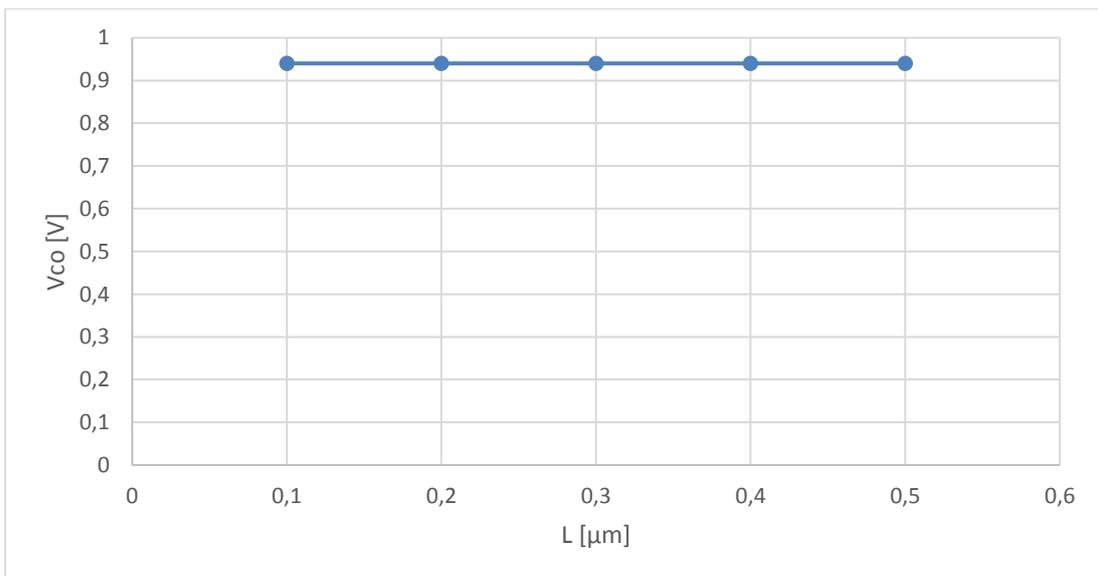


Figure (3.7) : Variation de la tension de circuit ouvert V_{CO} en fonction de la longueur L

3-7-4 Caractéristique courant-tension I(V) :

La figure (3.8) représente la caractéristique courant-tension de la cellule solaire simulée pour différentes valeurs de L. On constate que lorsque la longueur L augmente la caractéristique se déplace vers le haut, le courant de court-circuit augmente et la tension de circuit ouvert reste constante.

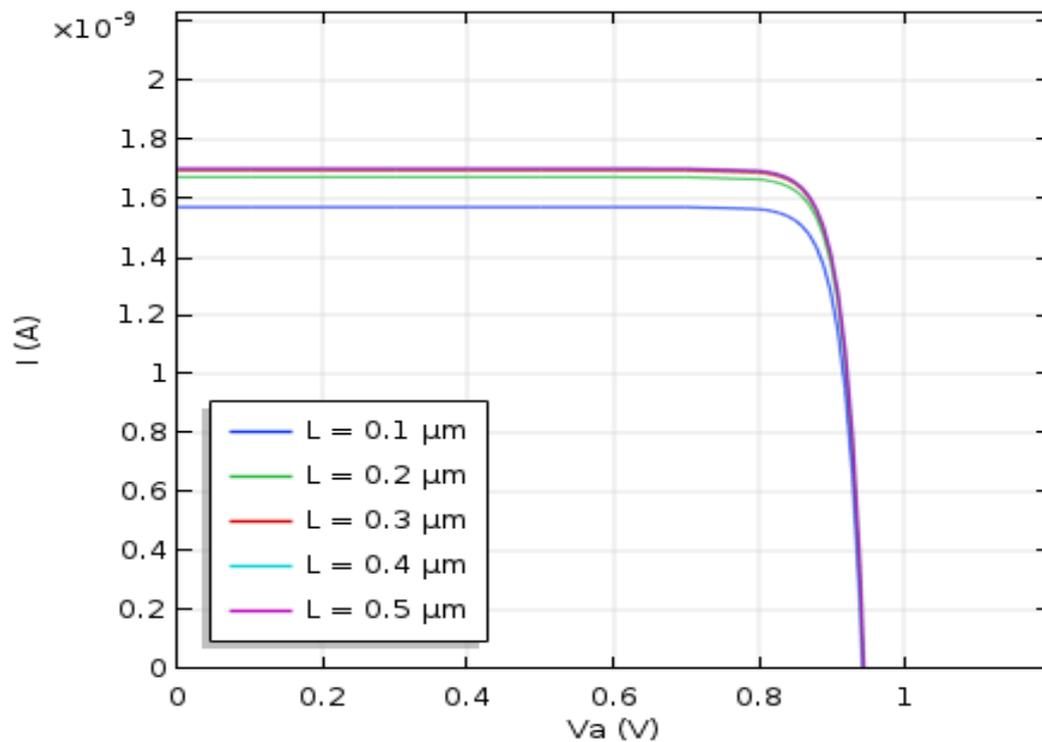


Figure (3.8) : Evolution de la caractéristique courant-tension I(V) de la cellule pour différentes valeurs de la longueur L

3-7-5 Puissance délivrée par la cellule solaire P(V) :

La figure (3.9) montre la variation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension de polarisation pour différentes longueurs L. Ces courbes présentent des maximums (P_{max}). La puissance P_{max} augmente lorsque la longueur L augmente.

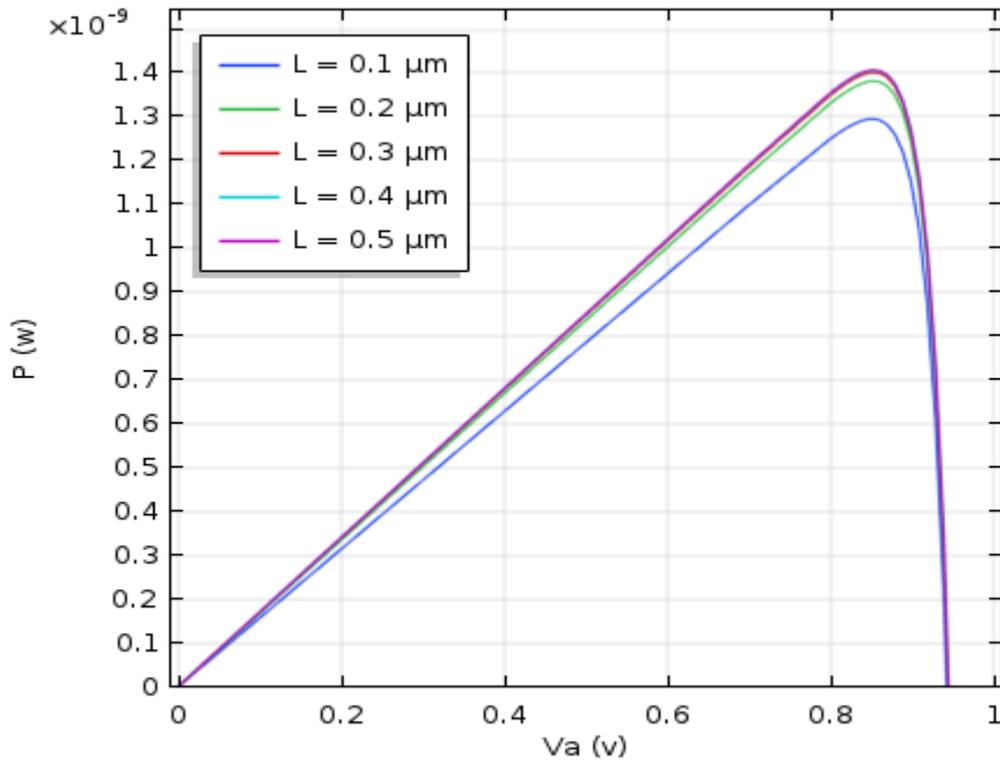


Figure (3.9) : Puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension de polarisation pour différentes longueurs L.

3-7-6 Puissance maximale délivrée par la cellule :

La figure (3.10) représente l'évolution de la puissance maximale délivrée par la cellule en fonction de la longueur L. Nous remarquons que toute augmentation de L a pour conséquence une augmentation de la puissance maximale, notamment pour les longueurs inférieures à 0,4 μm. Au-delà de 0,4 μm, la valeur de la puissance maximale P_{max} se stabilise comme la courbe de courant de court-circuit. On constate que la puissance maximale est influencée par le courant qui est affecté par la longueur L. Ceci est confirmé par le produit :

$$P_m = V_m \times I_m \quad (3.1)$$

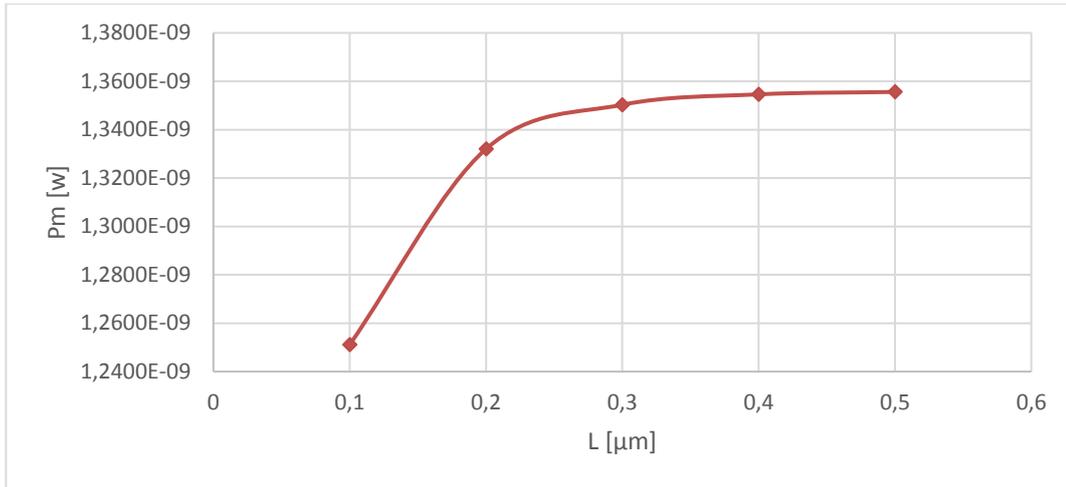


Figure (3.10) : évolution de P_{\max} en fonction de L

3-7-7 Le facteur de forme :

C'est le rapport de la surface du rectangle P_{\max} au produit de la tension de circuit ouvert et du courant court-circuit :

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (3.2)$$

La figure (3.11) représente l'évolution du facteur de forme en fonction de la longueur de la cellule L . On remarque que le facteur de forme varie peu et est de l'ordre de 85%.

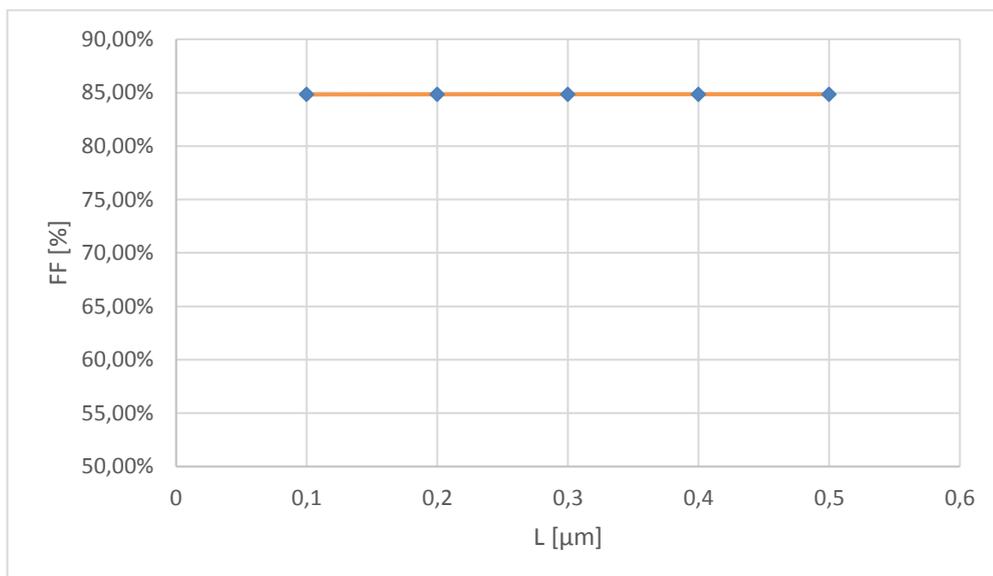


Figure (3.11) : Facteur de forme en [%] de la cellule en fonction de la longueur L .

3-7-8 Rendement :

C'est le rapport de la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque et la puissance lumineuse incidente :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (3.3)$$

Remarque : la puissance lumineuse incidente est identique pour toutes les valeurs de la longueur L car l'épaisseur W est fixe (W= 1μm).

$$P_{in} = \int_0^{\lambda_{max}} \left(\frac{F \times 1.24}{\lambda} \right) 1.6 \times 10^{-19} \times \pi \times (0.2e^{-6} + w)^2 d\lambda \quad (3.4)$$

F : étant le flux incident par unité de surface.

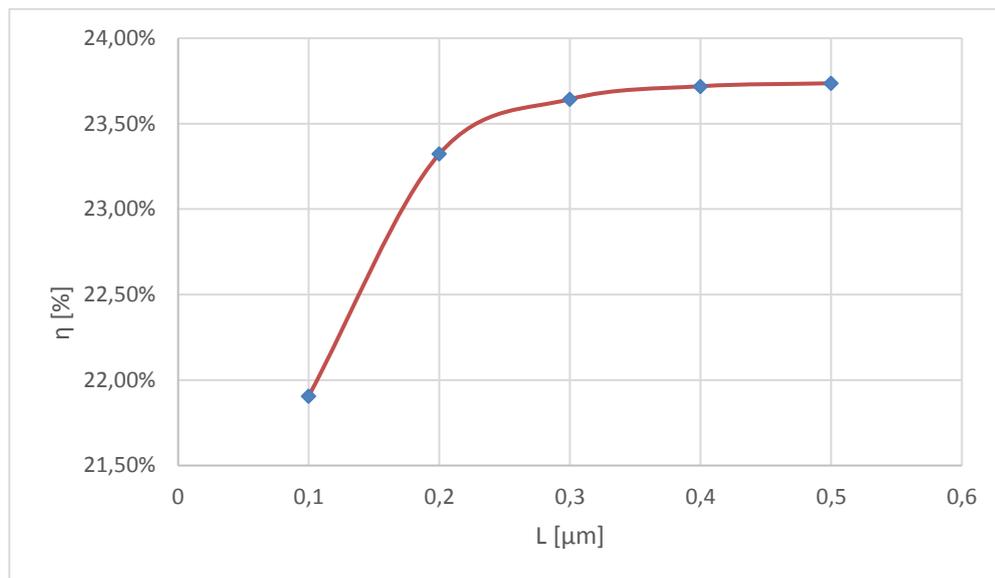


Figure (3.12) : Représentation du rendement de la cellule solaire en fonction de la longueur L.

D'après la figure (3.12), nous remarquons que le rendement augmente en fonction de la longueur L. Il atteint une valeur maximale de 23,74 % pour une longueur L=0,5 μm.

Un rendement théorique de 23,74 % est important pour une cellule solaire. Ce rendement résulte d'une variation des différents paramètres internes et des propriétés électriques et optiques du matériau GaAs.

3-8 Etude de la variation de l'épaisseur W :

3-8-1 Photo-courant I_{ph} de la cellule :

La figure (3.13) représente la variation du courant I_{ph} de la cellule solaire en fonction de la longueur d'onde λ pour différentes valeurs de W. Nous remarquons que toute augmentation de l'épaisseur de la cellule W a comme conséquence une amélioration du courant I_{ph} , due à l'augmentation de la surface d'entrée de la cellule donc de la puissance incidente.

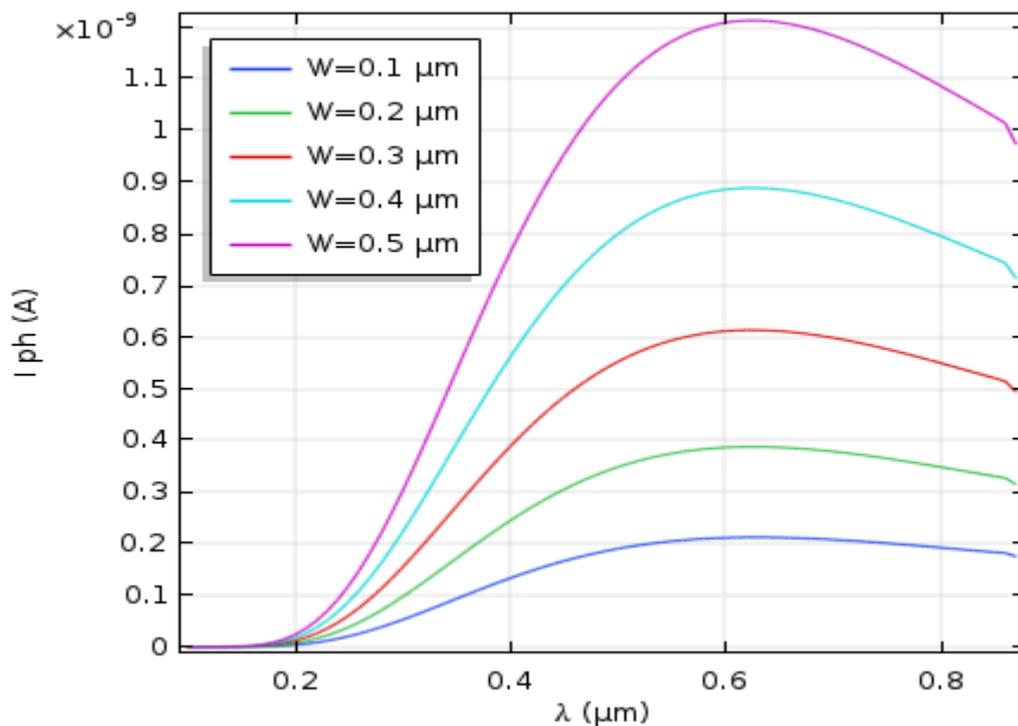


Figure (3.13) : Variation du courant I_{ph} en fonction de la longueur d'onde λ pour différentes épaisseurs W.

3-8-2 Courant de court-circuit I_{CC} de la structure :

La figure (3.14) traduit l'influence de l'épaisseur W sur le courant de court-circuit I_{CC} . Nous remarquons que le courant de court-circuit augmente lorsque W augmente due toujours à l'augmentation de la surface d'entrée de la cellule.

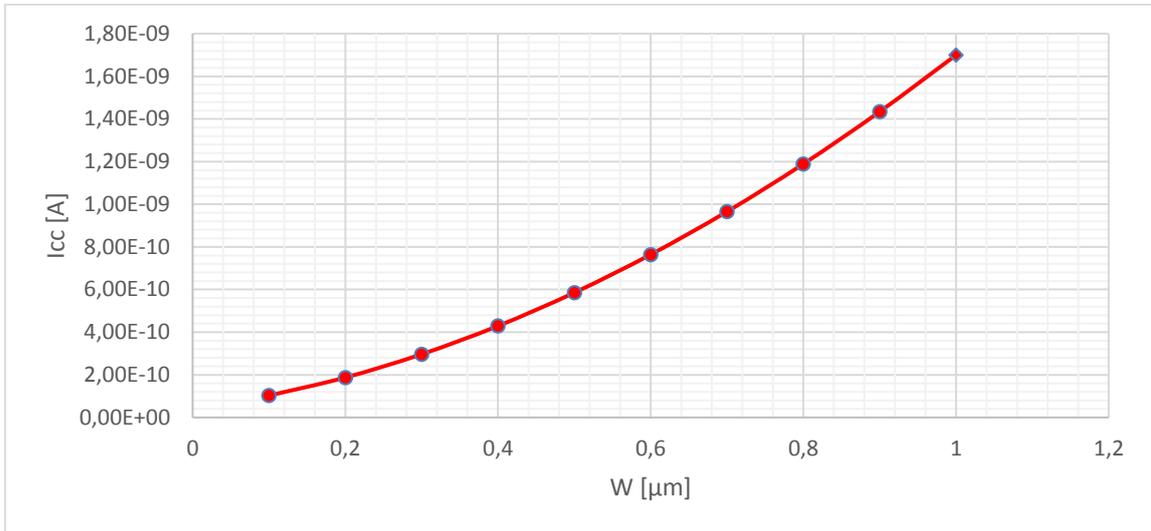


Figure (3.14) : Variation du courant de court-circuit I_{CC} en fonction de W

3-8-3 Tension de circuit ouvert V_{CO} de la cellule :

Selon la figure (3.15), on remarque que la tension de circuit ouvert V_{CO} varie peu avec W . Ce qui signifie que l'épaisseur W a une faible influence sur la tension de circuit ouvert.

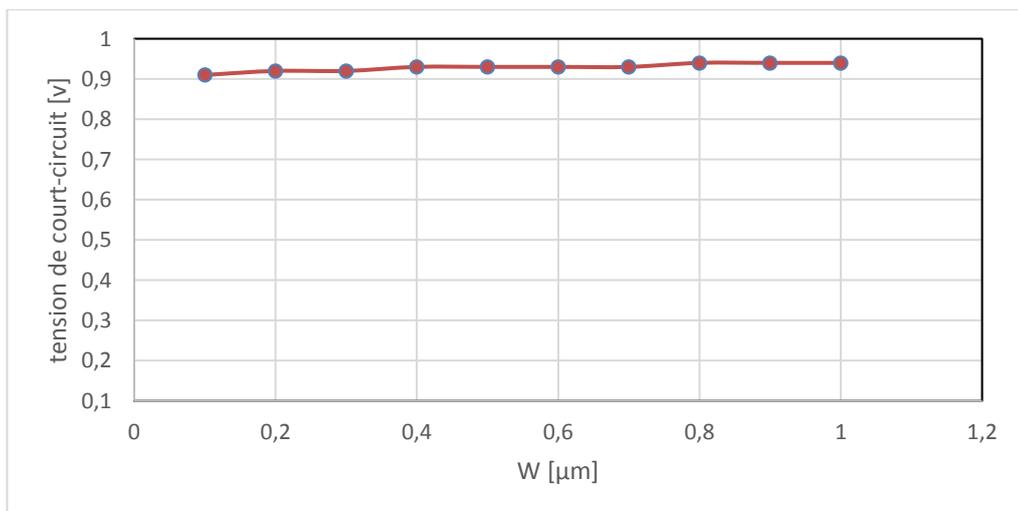


Figure (3.15) : Variation de la tension de circuit ouvert V_{CO} en fonction de W

3-8-4 Caractéristique courant-tension $I(V)$ de la cellule :

La figure (3.16) représente la caractéristique courant-tension de la cellule solaire simulée pour différentes valeurs de W . On constate que lorsque l'épaisseur W augmente la caractéristique se déplace vers le haut, le courant de court-circuit augmente et la tension de circuit ouvert reste constante.

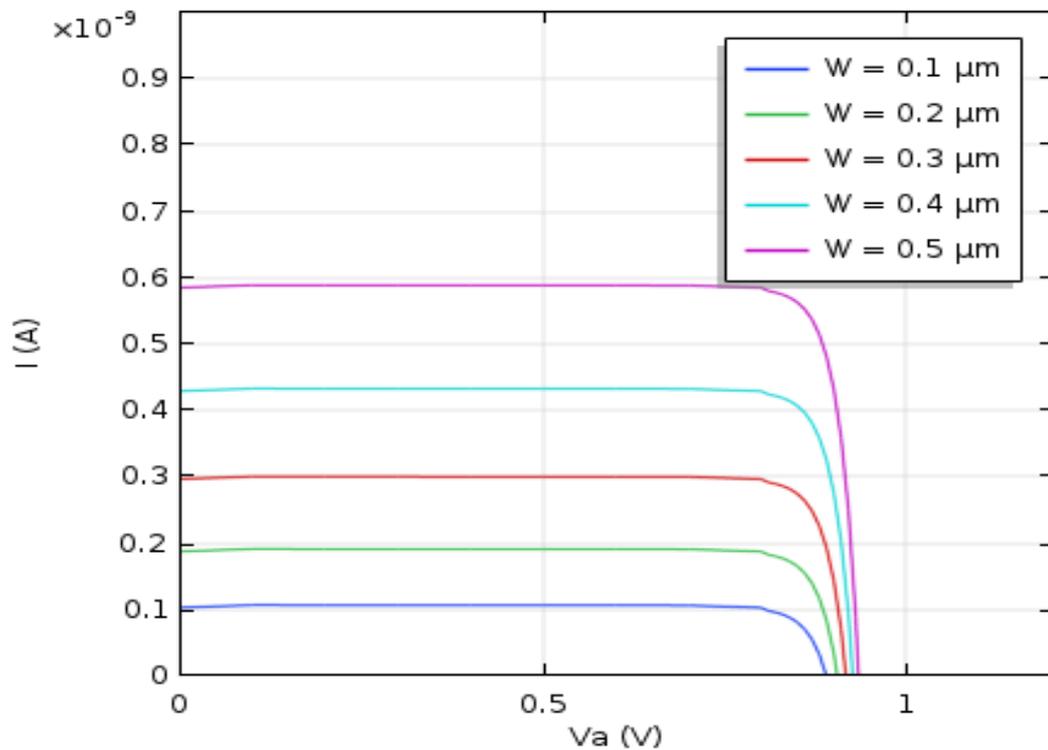


Figure (3.16) : Evolution de la caractéristique courant-tension $I(V)$ de la cellule pour différentes valeurs de W .

3-8-5 Puissance délivrée $P(V)$ par la cellule solaire :

La figure (3.17) représente la variation de la puissance en fonction de la tension de polarisation pour différentes épaisseurs W . Ces courbes présentent des maximums P_{max} .

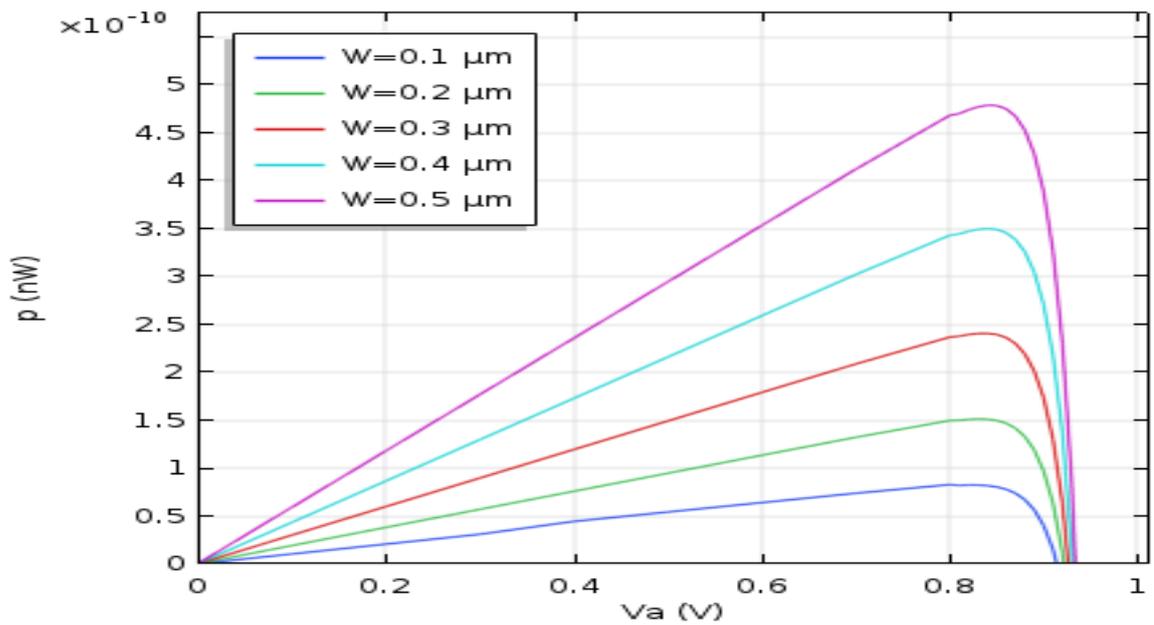


Figure (3.17) : Puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension de polarisation pour différents W

3-8-6 Puissance maximale P_{max} et puissance incidente P_{in} :

Les figures (3.18.a) et (3.18.b) représente respectivement l'évolution de la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente en fonction de l'épaisseur W .

Lorsqu'on augmente W , la puissance maximale et la puissance incidente augmentent.

On constate que P_{max} et P_{in} sont influencées et affectées par l'épaisseur W .

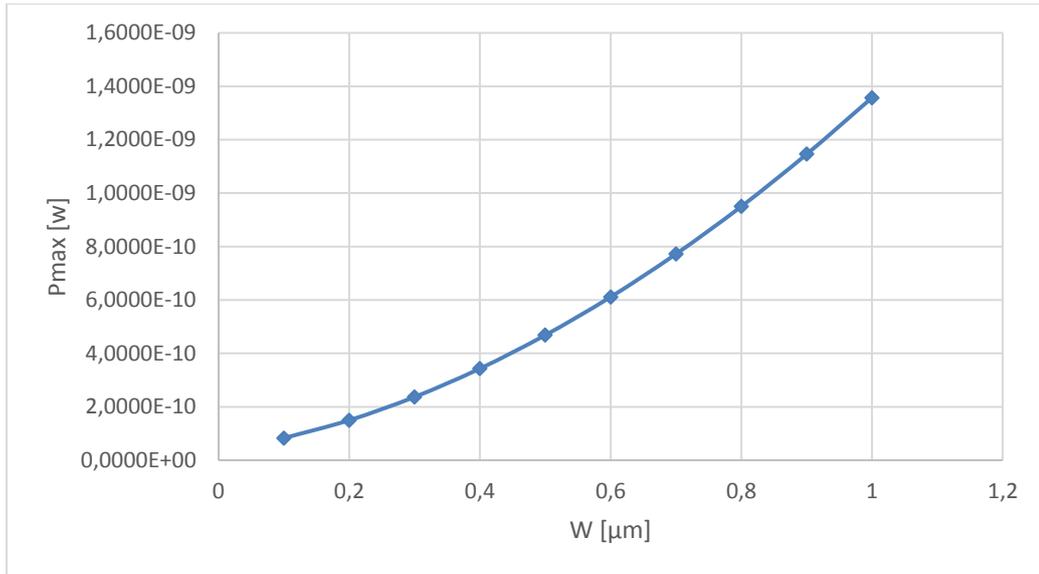


Figure (3.18.a) : évolution de P_{\max} en fonction de W

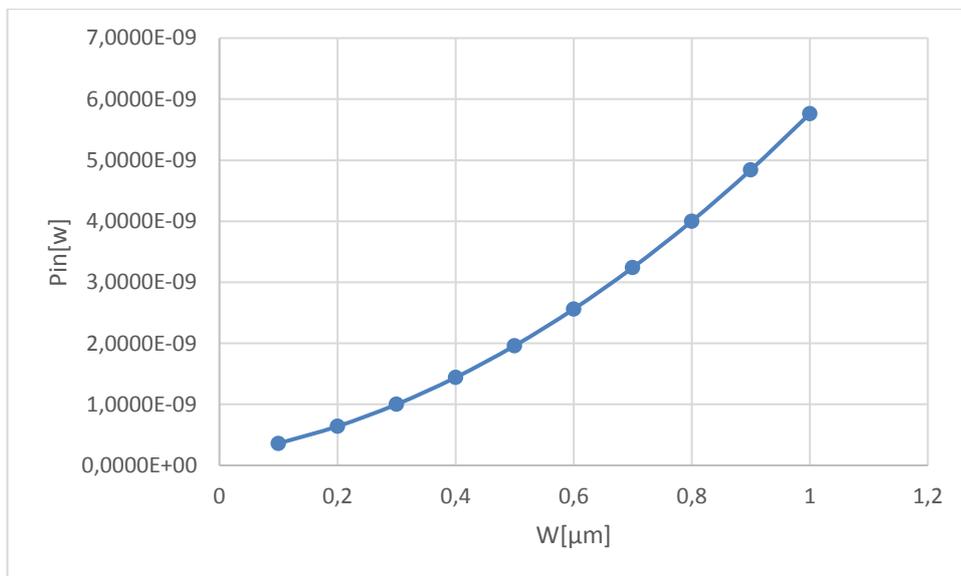


Figure (3.18.b) : évolution de P_{in} en fonction de W

3-8-7 Facteur de forme :

La figure (3.19) représente l'évolution du facteur de forme en fonction de l'épaisseur W . Nous remarquons que l'augmentation de W a pour conséquence une lente diminution de FF.

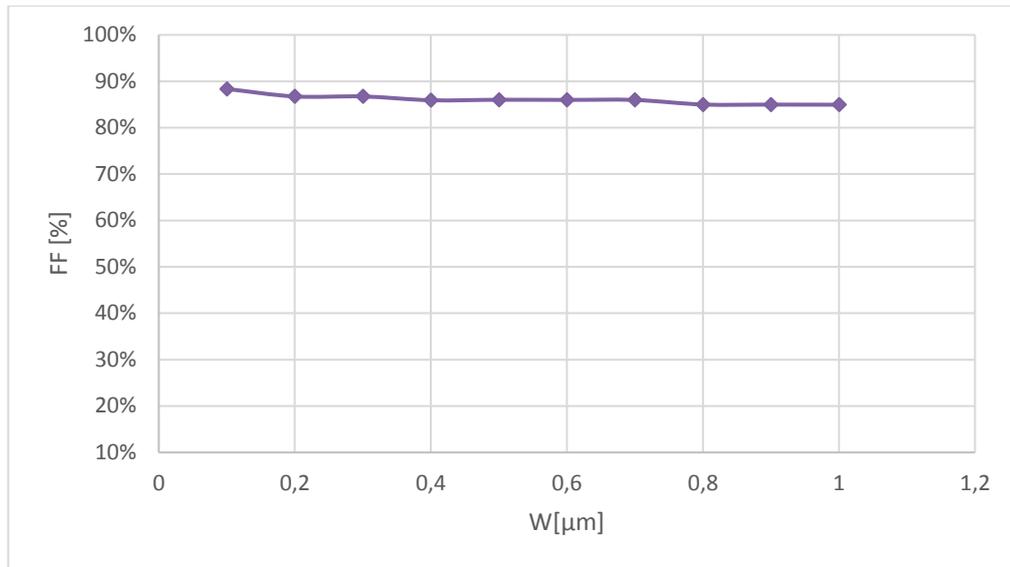


Figure (3.19) : facteur de forme de la cellule en fonction de W.

3-8-8 Rendement :

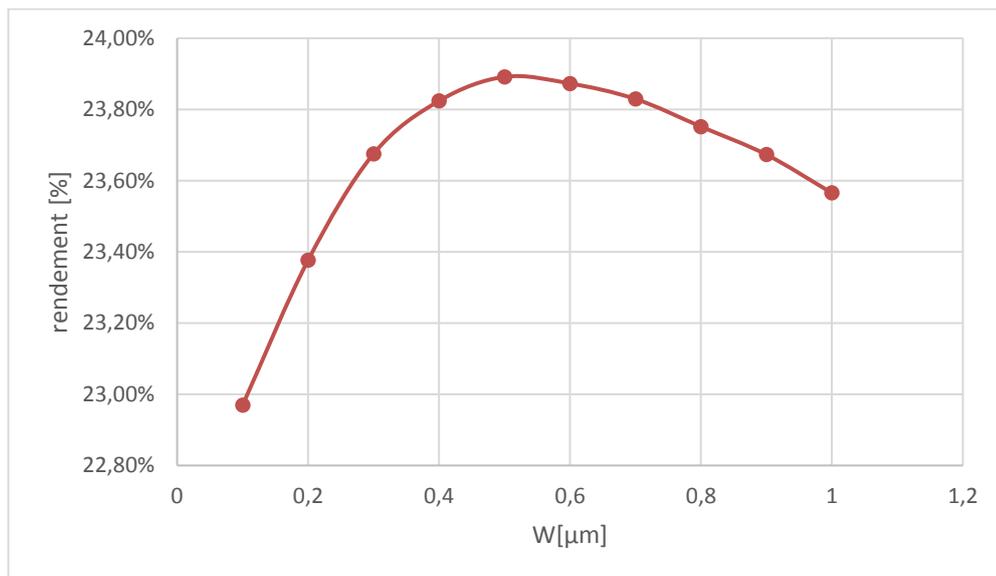


Figure (3.20) : Représentation du rendement de la cellule solaire en fonction de W.

D'après la figure (3.20), nous remarquons que le rendement varie en fonction de l'épaisseur W. Il atteint une valeur maximale de 23.89 % pour une épaisseur de $W=0,5\mu\text{m}$. Au-delà de $0,5\mu\text{m}$ le rendement diminue. Lorsque l'épaisseur W augmente, les électrons générés peuvent se recombiner avant d'atteindre les contacts et ne seront donc pas collectés d'où la diminution du rendement.

3-9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'optimiser les performances de la cellule solaire cœur-coquille à base d'une jonction PIN GaAs en utilisant le logiciel COMSOL.

Nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques : longueur de la cellule L et l'épaisseur de la zone intrinsèque W sur les caractéristiques de la cellule (I_{ph} , I_{cc} , V_{co} , $I(V)$, $P(V)$, FF et η).

Finalement, La simulation réalisée dans ce chapitre montre que pour la cellule solaire cœur coquille à base d'une jonction PIN GaAs, le rendement maximum est de l'ordre de 23.89 % pour $W = 0.5\mu\text{m}$ et $L = 1\mu\text{m}$.

Conclusion générale

Ce modeste travail porte principalement sur l'étude et la simulation d'une cellule solaire cœur-coquille à base d'une jonction PIN en GaAs, afin d'absorber le maximum du rayonnement solaire et de délivrer aussi un maximum d'énergie électrique.

Dans un premier temps, nous avons présenté des généralités sur les semi-conducteurs, les phénomènes de recombinaison et de génération, nécessaire pour la compréhension du fonctionnement et la détermination des caractéristiques des cellules solaires.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les notions générales d'une cellule solaire, son principe de fonctionnement ainsi que ses caractéristiques principales, enfin nous avons abordé les cellules cœur-coquille à base d'une jonction PIN.

Dans la simulation, nous avons essayé d'optimiser les performances de la cellule solaire, en étudiant l'influence des paramètres géométriques : longueur de la cellule L et l'épaisseur de la zone intrinsèque W sur les caractéristiques de la cellule (I_{ph} , I_{cc} , V_{co} , $I(V)$, $P(V)$, FF et η).

Finalement, d'après les résultats obtenus nous avons trouvé que pour une cellule solaire cœur-coquille à base d'une jonction PIN de GaAs, le rendement est optimal de l'ordre de 23,89%.

La suite de ce travail peut être envisagée en considérant des cellules cœur-coquille multi-jonctions dans le but d'améliorer encore le rendement.

Bibliographie

- [1] Thèse doctorat (Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement Par (Mr. ABDERREZEK MAHFOUD)
- [2] Thèse de Doctorat « REALISATION ET CARACTERISATION DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES PLASTIQUES » par Salima Alem Boudjemline, UNIVERSIT'E D'ANGERS.
- [3] PHYSIQUE DES SEMI-CONDUCTEURSA. Chovet& P. Masson « ECOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITAIRE DE MARSEILLE Département Micro-électronique et Télécommunications ».
- [4] « Électronique de base (<http://www.almohandiss.com/>) »
- [5] Cours de l'Electronique Fondamentale (Electronique Numérique par A. OUMNAD).
- [6] H. Mathieu. « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques »,
- [7] Olivier Bonnaud, (Composants à semi-conducteurs – De la physique du solide aux transistors) éd. Ellipses, coll. « Technosup », 2006, 241 p. (ISBN 978-2-7298-2804-2), p. 90-91.
- [8] THEME (Etude des Propriétés Structurales et Electroniques des Semi-conducteurs Binaires CaX (X=S, Se, Te)) Présenté par: KHOUALDIA Sabah.
- [9] MAGISTER EN PHYSIQUE ELECTRONIQUE ET MODELISATION thème (ETUDE DES PROPRIETES OPTOELECTRONIQUES DES SEMICONDUCTEURS III-V A BASE DE GALIUM) Par Mme BAGHDADLI Nawel .
- [10] (cours de Chimie et Matériaux Inorganiques/Bandes d'énergie, semi-conducteurs) par (sophie norvez) ESPCI PARIS (www.cours.espci.fr).

- [11] MAGISTER EN ELECTRONIQUE THEME : « ETUDE D'UNE CELLULE SOLAIRE A BASE DE STRUCTURE PIN » Présenté par "HOUDA CHABANE" Université Hadj Lakhdar de Batna.
- [12] Henry Mathieu Hervé Fanet, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 6^{ème} édition Dunod.
- [13] S.Z. Sze, Physics of Semiconductor Devices, (ISBN 0-471-05661-8).
- [14] B. Hadda : « Modélisation et étude d'un puits quantique contraint à base de GaInAs/GaAs et calcul du courant de seuil », mémoire Magister, Université de Blida
- [15] « Physique des semi-conducteurs (<http://www.polytech-lille.fr/>) ».
- [16] P. Jayarama Reddy «Science and technology of photovoltaics», BS publications, Second edition. CRC Press, 2010.
- [17] mémoire magister en physique, thème « Etude des matériaux semi-conducteurs III-V Application à la conversion photovoltaïque » présenté par : Benaïcha Mouna.
- [18] 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).
- [19] Mémoire master Thème « Etude par simulation numérique d'une cellule solaire à homo-jonction (GaAs) et à hétérojonction (Ga_{0.3}Al_{0.7}As/GaAs) par le logiciel TCAD-SILVACO » Présenté par : (BEZZIOU FATMA) Université Mohamed Khider Biskra.
- [20] P. Vogl, H. P. Hjalmarson, and J. D. Dow, Chem. Solids 44, 365 (1983).
- [21] Thème « Étude des propriétés structurales, électroniques et optiques de l'alliage Semi-conducteur BaGaN : Etude ab-initio » Présenté Par (M. Djoudi Lakhdar). UNIVERSITE DJILALI LIABES DE SIDI BEL-ABBES
- [22] Tarik Bouragba. Propriétés optiques de puits quantiques GaInAsN/GaAs. Physique des Hautes Energies- Expérience [hep-ex]. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2006. Français.

- [23] Gilbert PASCAL " Etude des transistors HEMT ", site Internet, espace perso : www.eudil.fr,2005.
- [24] Samia AMOURACHE "Modélisation du transistor à effet de champ a grille Schottky a l'arséniure de gallium" Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2007
- [25] MEMOIRE de Magister en Electronique, thème: « Analyse des transistors à effet de champ MESFET GaAs » Par : GUIZA Douadi.
- [26] S.M.Sze « Semiconductors Devices Physics and Technology ». At. Bell; Marry HILL. New Jersey. May 1985.
- [27] mémoire magister thème « ETUDE DES PHOTODETECTEURS ULTRA-VIOLET A BASE D'HETEROSTRUCTURES DE NITRURES III-N GaN / AlGaN » présenté par (MECHEREF Rachid).
- [28] CNRS, « Le rayonnement solaire » [archive], sur www.cnrs.fr.
- [29] Etude théorique des cellules solaires PV organiques structure réseau interpénètre polymère conjugué fullerène et cellules Graetzel.
- [30] Cellules solaires Les bases de l'énergie Photovoltaïque 5e édition [ANNE LABOURET & PASCAL CUMUNEL & JEAN-PAUL BRAUN & BENJAMIN FARAGGI].
- [31] THÈSE doctorat « Conception, caractérisation et durée de vie de cellules photovoltaïques organiques tandems à base de PCDTBT » Présentée par Pierre, Balthazar LECHÊNE, université de Grenoble.
- [32] Mémoire de MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, Thème « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative » Présenté par : HELALI KAMELIA ; UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- [33] Henry Mathieu Hervé Fanet, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 6ème édition Dunod.
- [34] « Composants Semi-Conducteurs De Puissance », DUT GEii1 – 2ème année Module MC-ET2, Université Joseph Fourier
- [35] thème « Conversion d'énergie et systèmes électromagnétiques Électronique, optoélectronique, Nanosciences, nanotechnologies » présenté par RENARD Charles ; IEF - Institut d'Electronique Fondamentale UMR 8622.

[36] Doctoral thesis "Radial Junction Solar Cells" Dr. Nathan S. Lewis, and in collaboration with Dr. Harry A. Atwater at the California Institute of Technology. <http://www.its.caltech.edu>.