

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK
BEN YAHIA - JIJEL



FACULTE DES SCIENCES EXACTES ET INFORMATIQUE
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Mémoire présenté pour obtenir le diplôme de
Master en physique

Spécialité : Physique des matériaux

Par

Boubaa Yaqota

Intitulé

**Etude de l'effet des propriétés d'une couche TCO sur le rendement
et les caractéristiques d'une cellule solaire à base de GaAs.**

Soutenue le :/...../..... devant le jury:

Président :	A. BERBADJ	MCB. Univ. de Jijel
Rapporteur :	M. LAHMER	MCA. Univ. de Jijel
Examineurs:	A. LAOUAR	MCA. Univ. de Jijel

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Nous remercions tout d'abord dieu pour nos avoir donné le

Courage et la force de mener à bien ce travail

*Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre
encadreur **Dr. Lahmer Mohamed Ali** pour la qualité de son
encadrement, son soutien, sa patience, ses remarques, ses
conseils, et ses directives précieuses pendant toute la durée de
ce travail.*

*Nous remercions les membres du jury **Dr. A. BERBADJ** et **Dr
A. LAOUAR** pour avoir accepté d'examiner et corriger ce
mémoire.*

*Nous remercions tous nos enseignants du département de
physique surtout **Pr.F.Bouzrara**.*

Dédicaces

A mon très cher père.

A ma chère mère.

A mes sœurs, frères (A. Ali, A. Aziz, Salah).

*Pour leurs encouragements, soutien, et surtout pour leurs
amour et sacrifice pour que rien n'entrave le déroulement de
mes études.*

A Dr.M.A. Lahmer.

A mes meilleurs amis et à tous ceux qui me sont chers.

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Sommaire

Liste des figures

Liste des figures

Les abréviations

Introduction Générale.....1

Chapitre I : Généralités sur la cellule photovoltaïque

I.1.Introduction.....3

I.2.Historique des cellules solaires.....3

I.3.L'énergie photovoltaïque.....4

I.3.1.Production d'énergie photovoltaïque.....4

I.3.2. La Cellule photovoltaïque.....4

I.3.3.L'effet photovoltaïque.....5

I.3.4.Système photovoltaïque.....5

I.3.5. La constitution d'un module photovoltaïque.....5

I.3.6.principe fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....6

I.4.Cellule photovoltaïque idéale7

Sommaire

I.5.Cellule photovoltaïque réelle	8
I.6.Les différentes type des cellules solaires	9
I.6.1.Cellule solaire à base de silicium cristallin.....	9
I.6.1.1. La cellule à base du Si monocristallin.....	9
I.6.1.2. La cellule à base du Si polycristallin.....	10
I.6.2.La cellule solaire à base de couche mince.....	11
I.6.2.1. Les cellules à base du Si amorphe.....	11
I.6.2.2. Les cellules à base du tellure de Cadmium (CdTe).....	12
I.6.2.3. Les cellules à base des alliages Cuivre-indium-sélénium (CIS) / Cuivre-indium-Gallium-sélénium (CIGS).....	12
I.6.2.4. cellule à base de L'arséniure de gallium (GaAs)	13
I.6.3.Les cellules organiques.....	13
I.7.L'arséniure de gallium (GaAs)	14
I.7.1.La structure cristalline.....	15
I.7.2.Les avantages de L'arséniure de gallium (GaAs).....	15
I.7.3.Propriétés physique et électrique.....	16
I.8. avantages et inconvénients de la photovoltaïques	17
I.8.1.Les avantages.....	17
I.8.2.Les inconvénients.....	17
I.9.Conclusion	17

Sommaire

Chapitre .II : Le simulateur GPVDM de la cellule PV et la modélisation

II.1.Introduction.....	18
II.2.Modélisation électrique de la cellule photovoltaïque.....	18
II.3.Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	19
II.3.1.Le courant de court-circuit (I_{cc}).....	19
II.3.2.Tension du circuit-ouvert V_{CO}	20
II.3.3.La puissance maximale.....	21
II.3.4. Facteur de forme	21
II.3.5. Le rendement η	21
II.4.L'influence des paramètres sur la caractéristique $I(V)$.....	22
II.4.1.Influence de l'éclairement.....	22
II.4.2.La résistance série R_s	22
II.4.3.La résistance R_{sh}	22
II.5.recombinaison et durée de vie des porteurs minoritaires.....	22
II.6.Le logiciel GPVDM	24
II.6.1.Définition	24
II.6.2. Simulation des cellules photovoltaïques avec GPVDM.....	25
II.7.Équations fondamentales des dispositifs.....	29
II.7.1.L'équation de Poisson et les équations de continuité.....	29
II.7.2.La densité de courant des trous et électrons.....	29

Sommaire

II.7.2.1.Courant de diffusion (porteurs minoritaires).....	30
II.7.2.2.Le courant de conduction	30
II.7.2.4.La densité de courant des électrons.....	30
II.8.Conclusion.....	30
 Chapitre. III : Résultats et discussion	
III.1.Introduction.....	31
III.2. Comparaison entre la structure PN et PIN	31
III.3. la cellule à base de GaAs (PIN).....	34
III.3.1.Effet de l'épaisseur sur le rendement de la cellule	34
III.3.2.la caractéristique I(V) de la cellule type PIN	35
III.3.3.Effet de dopage sur le rendement.....	38
III.3.4. Effet de la résistance R_s sur le rendement.....	39
III.3.5.Effet de la résistance R_p sur le rendement.....	40
III.4.Effet de la couche TCO sur le rendement de la cellule de GaAs(PIN).....	41
III.4.1.Les oxydes transparents conducteurs (TCO)	41
III.4.1.1. Le ZnO (oxyde de zinc)	41
III.4.1.2.l'oxyde d'indium dopé étain (l'ITO).....	42
III.4.2.Structure étudiée.....	42
III.4.3. Effet de l'épaisseur de la couche TCO sur le rendement.....	44
III.4.4. Caractéristique I(V) pour la cellule ZnO/PIN	48

Sommaire

III.4.5.Effet du dopage sur le rendement la cellule ZnO/PIN.....	49
III.4.6.Effet de la résistance R_s sur le rendement de la cellule ZnO/PIN.....	50
III.4.7.Effet de la résistance R_p sur le rendement de la cellule ZnO/PIN.....	50
III.5.Effet du dopage sur le rendement la cellule ITO/PIN.....	51
III.6. La caractéristique I(V) de la cellule ITO/PIN.....	52
III.7. l'effet R_s sur le rendement de la cellule ITO/PIN.....	53
III.8.l'effetR_p sur le rendement de la cellule ITO/PIN.....	53
III.9. Conclusion	54
Conclusion Générale.....	55
Référence.....	56

Sommaire

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

Figure .I.1: Cellule photovoltaïque.....	5
FigureI.2: Encapsulation des cellules.....	6
Figure.I.3: principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	7
FigureI.4: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.....	8
FigureI.5: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	9
Figure.I.6: Une cellule photovoltaïque à base de silicium monocristalline.....	10
Figure.I.7: Une cellule solaire à base de silicium polycristalline.....	10
Figure.I.8: Une cellule à base de si amorphe.....	11
Figure I.9: Schéma d'une cellule à base de CIGS.....	12
Figure .I.10: Structure d'une cellule solaire organique.....	13
Figure.I.11: Schéma d'une cellule organique réelle.....	14
FigureI.12: Structure cristalline du GaAs.....	15

Chapitre II

FigureII.1: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	18
Figure II.2: La caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	19
Figure .II.3: Les différents mécanismes de recombinaison électron-trou dans un semi-conducteur.....	23
Figure .II.4: Création d'une nouvelle simulation avec GPVDM.....	25
Figure .II.5: Sélection de type de dispositif à simuler.....	25
Figure .II.6: choisir un dossier pour sauvegarder les résultats.....	26
Figure. II.7: L'éditeur de couches et des types des matériaux.....	26
Figure .II.8: Editeur de paramètres électrique.....	27
Figure .II.9: éditeur de dopage.....	27
Figure .II.10: La fenêtre principale du simulateur GPVDM.....	28

Liste des figures

Chapitre III

Figure III.1: structure(1) : PN , structure (2) : PIN	31
Figure III.2: Rendement en fonction de l'épaisseur de la couche P d'une cellule type PN à base de GaAs.....	32
Figure III.3: Rendement en fonction de l'épaisseur de la couche I d'une cellule type PIN à base de GaAs.....	33
Figure III.4: Rendement en fonction de l'épaisseur de la couche P d'une cellule type PIN à base de GaAs.....	34
Figure III.5: La caractéristique courant –tension de la cellule PIN pour différentes épaisseurs de la couche GaAs(I).....	35
Figure III.6: profil de distribution des photons absorbés.....	36
Figure III.7: Spectre d'absorption optique du GaAs.....	36
Figure III.8: diagramme de bandes de la cellule PIN (A : e=1000nm), (B : e=5000nm).....	37
Figure III.9: Variation du rendement d'une cellule (PIN) en fonction du dopage.....	38
Figure III.10: La caractéristique I(V) de la cellule PIN pour différentes valeur du dopage.....	39
Figure III.11: Effet de la résistance R_s sur le rendement de la cellule PIN.....	40
Figure III.12: La variation du rendement en fonction la résistance R_p	41
Figure III.13: Structure de la cellule TCO/GaAs(P)/GaAs(I)/GaAs(N). A : la couche TCO est une couche de ZnO, B: la couche TCO est une couche de l'ITO.....	42
Figure III.14: La variation du rendement de la cellule TCO/PIN en fonction de l'épaisseur de la couche TCO	44
Figure III.15: Spectre de réflexion optique de la cellule TCO/PIN obtenu pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche TCO : (a) ZnO, et (b) ITO.....	45
Figure III.16 : absorption de photons par une cellule ZnO/PIN avec couche ZnO d'épaisseur= 100nm	46
Figure III.17: absorption de photons par une cellule ITO/PIN avec couche ITO d'épaisseur=100nm.....	46
Figure III.18: Les diagrammes de bandes de la cellule ZnO/PIN: (a) e=100nm et (b) e=200nm	47

Liste des figures

Figure III.19: Les diagrammes de bandes de la cellule ITO/PIN : (a) $e=100\text{nm}$ et (b) $e=200\text{nm}$	47
Figure III.20: La caractéristique $I(V)$ de la cellule ZnO/PIN pour différentes épaisseurs de la couche ZnO	48
Figure III.21: La variation du rendement de en fonction du dopage de la couche de ZnO.....	49
Figure III.22: Effet de la résistance R_S sur le rendement de la cellule ZnO/PIN	50
Figure III.23: La variation du rendement en fonction la résistance R_p	50
Figure III.24: La variation du rendement de la cellule ITO/PIN en fonction du dopage de la couche ITO	51
Figure III.25: La caractéristique $I(V)$ de la cellule ITO/PIN pour différentes épaisseurs d' ITO .	52
Figure III.26: variation du rendement en fonction de R_S	53
Figure III.27: La variation de rendement en fonction la résistance R_p de (ITO).....	54

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Données numériques de l'arséniure de gallium(GaAs) à (300k).....16

Chapitre III

Tableau.III.1: Les paramètres constants de la cellule à base de GaAs (PIN).....34

Tableau III.2: Les paramètres et la structure de la cellule.....43

Tableau III.3: paramètres numériques sur les matériaux utilisés dans la cellule simulée.....43

Les abréviations

Les abréviations

PV: Photovoltaïque.

CdTe: Tellure de Cadmium.

Si: Silicium.

a-Si: Silicium Amorphe.

ZCE: Zone de Charge d'Espace.

E_g : L'énergie de gap du matériau.

Si-poly : Silicium Poly cristallin.

CIS : Cuivre-indium-sélénium.

CIGS : Cuivre-indium-Gallium-sélénium.

GaAs : L'arséniure de gallium.

GPVDM : Simulateur General -purpose photovoltaic- Device Model.

μ_n : La mobilité des trous dans le semi-conducteur (n).

μ_p : La mobilité des électrons dans le semi-conducteur (p).

D : L'épaisseur (cm).

D_p : La constante de diffusion des électrons dans le S-C (p).

FF : Le Facteur de forme.

G : Le taux de génération.

I_{ph} : Photo-courant, ou courant généré par l'éclairement (A).

I_s : Courant de saturation de la diode (A).

$J_{d(p,n)}$: Courant de diffusion des électrons et des trous ($A\text{ cm}^{-2}$).

$J_{c(p,n)}$: La densité de courant de conduction des électrons et des trous.

Les abréviations

$J_{p,n}$: Les densités de courant des électrons et des trous.

k : Constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

N_a : La densité de dopants de type accepteurs (cm^{-3}).

N_c : La densité d'états dans la bande de conduction (cm^{-3}).

N_d : La densité de dopants de type donneurs (cm^{-3}).

n_e, p_e : Les densités des porteurs à l'équilibre.

N_i : La concentration intrinsèque de porteurs (cm^{-3}).

N_v : La densité d'états dans la bande de valence (cm^{-3}).

n, p : Les densités de porteurs de charge.

P_m : Puissance maximal.

q : Charge de l'électron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C).

R : Le taux de Recombinaison.

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunt (Ω).

$R_{n,p}$: Les taux de recombinaison pour les électrons et les trous.

T : Température de la cellule (K).

$\tau_{n,p}$: La durée de vie de ces porteurs.

TCO : Oxyde Conducteur Transparent.

ZnO : Oxyde de Zinc.

ITO : Oxyde d'indium dopé étain.

Introduction Générale

Introduction Générale

L'augmentation rapide de la population ainsi que l'amélioration de la qualité de vie qui dépend généralement des moyens consommant en termes d'énergie ont conduit à une demande croissante en énergie. Actuellement, la production d'énergie dans le monde est basée presque totalement sur les sources fossiles, sources qui présentent l'inconvénient d'être limitées et qui constituent un grand danger écologique à cause des émissions de gaz à effet de serre. Le problème du changement climatique est un autre défi pour l'humanité entier. Donc, il est devenu nécessaire de rechercher d'autres sources, pas cher et non polluantes pour l'environnement.

Les énergies renouvelables (énergie solaire, géothermique, biomasse, éolienne, hydraulique, .. etc) qui sont des énergies illimitées et non polluées contrairement aux énergies fossiles sont considérés comme la solution la plus adéquate pour les problèmes de l'effet de serre et du changement climatique.

L'énergie solaire fait partie des énergies renouvelables qui ont des bons avantages pour un usage quotidien. En raison de ces avantages, les chercheurs travaillent sérieusement à résoudre les problèmes liés à l'amélioration du rendement des cellules solaires et aux méthodes de stockage pratiques de l'énergie photovoltaïque.

Des efforts considérables sont déployés ces dernières années pour améliorer le rendement des cellules PV et les recherches concentrent actuellement sur la conception de nouvelles structures ainsi que l'utilisation de nouveaux matériaux et tous cela afin d'augmenter le rendement de conversion des panneaux solaires et de réduire le coût.

La présente étude vise à étudier par simulation l'effet de l'addition des couches TCO à base du ZnO et ITO sur le rendement d'une cellule solaire à base de GaAs. Une importance particulière a été accordée à l'étude de l'effet des propriétés de la couche TCO (dopage, épaisseur, nature, ...) sur les caractéristiques de la cellule solaire.

Ce mémoire comporte trois chapitres. Le premier présente des généralités sur les cellules solaires. Quelques notions de base concernant le principe de fonctionnement de ces cellules ainsi que leurs types y figureront. Le second chapitre est réservé au simulateur GPVDM utilisé pour réaliser cette étude. Enfin le troisième chapitre est dédié à l'étude de

Introduction Générale

l'influence de la couche TCO sur le rendement d'une cellule PV à base de GaAs. Nous avons examiné l'effet de la nature (ZnO et ITO), de l'épaisseur, et du dopage de la couche TCO sur le rendement des cellules solaires de type PN et PIN.

Chapitre I : Généralités sur la cellule photovoltaïque

I.1. Introduction

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée, elles regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie photovoltaïque, qui est considérée comme la plus intéressante. Actuellement, tous les pays développés se concentrent sur le développement des installations nécessaires pour l'exploitation des énergies renouvelables. Du point de vue historique, les applications basées sur l'utilisation de l'énergie photovoltaïque ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Les recherches scientifiques dans le secteur des sources d'énergie illimitées, ont comme objectif la conception de systèmes photovoltaïques à rendement élevé pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire.

Dans ce chapitre, nous définirons la cellule solaire, la date de sa découverte, et le principe de son fonctionnement.

I.2. Historique des cellules solaires

C'est en 1839 que le physicien français Edmond Becquerel découvre que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1905, mais ce n'est qu'en 1954 que la première cellule photovoltaïque a été mise au point par des chercheurs des laboratoires Bell aux USA. Cette première cellule photovoltaïque était en silicium [1].

Durant de longues années, l'utilisation des cellules solaires était limitée au domaine spatial. Leurs intérêts dans une utilisation terrestre rebondissent dans les années 70. Ce n'est qu'au début des années 80 que la technologie photovoltaïque a connu une période de plein essor partout dans le monde. De nombreuses possibilités d'exploitation sont alors étudiées en dépit des difficultés, les méthodes de fabrication se sont alors améliorées réduisant les coûts de production et permettant ainsi une augmentation des volumes de production.

Aujourd'hui, le développement remarquable de l'industrie des semi-conducteurs (que soit en termes de qualité du matériau ou développement des équipements) a favorisé la très large expansion des cellules solaires [2].

I.3.L'énergie photovoltaïque

I.3.1.Production d'énergie photovoltaïque

Les propriétés optiques et électriques des matériaux semi-conducteurs qualifiés comme uniques ont permis l'usage de ces matériaux pour la production d'électricité tout en exploitant l'effet photovoltaïque. Par définition, l'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. Les cellules solaires produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie.

Les cellules solaires sont réalisées dans la forme la plus simple d'une jonction p-n qui est elle-même réalisée en associant un matériau semi-conducteur dopé N à un autre semi-conducteur dopé P. Le fait d'avoir associé deux types de matériaux semi-conducteurs pour créer une jonction permet de pouvoir récupérer les charges avant que ces dernières ne se soient recombinaées dans le matériau qui redevient alors neutre. La présence de la jonction PN permet ainsi de maintenir une circulation de courant jusqu'à ses bornes.

I.3.2. La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'elle sera exposée à la lumière (photons) grâce à l'effet photovoltaïque. Le courant délivré par cette cellule est de nature continu et il est proportionnel à l'intensité lumineuse incidente.

Les cellules photovoltaïques les plus utilisées en pratique sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium et dans certains cas d'autres semi-conducteurs tels que : Ge, ZnO, GaAs, ...etc. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques de côté, prises entre deux contacts métalliques.

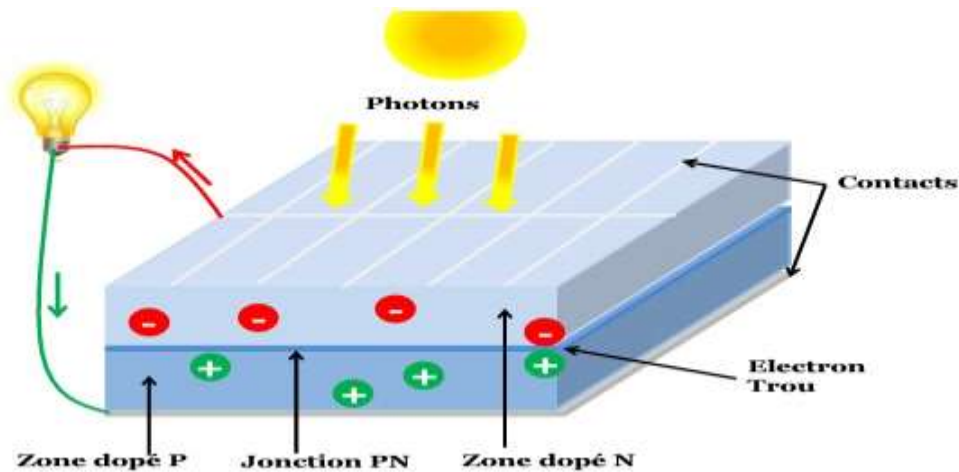


Figure I.1 : Une cellule photovoltaïque.

I.3.3. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité. Lorsqu'un photon d'énergie supérieure ou égale à l'énergie de gap est absorbé par le matériau semi-conducteur, il passe une partie de son énergie par collision à un électron. L'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction et laisse un trou derrière lui, d'où l'apparition d'une paire électron-trou, c'est la génération des charges libres [3].

I.3.4. Système photovoltaïque

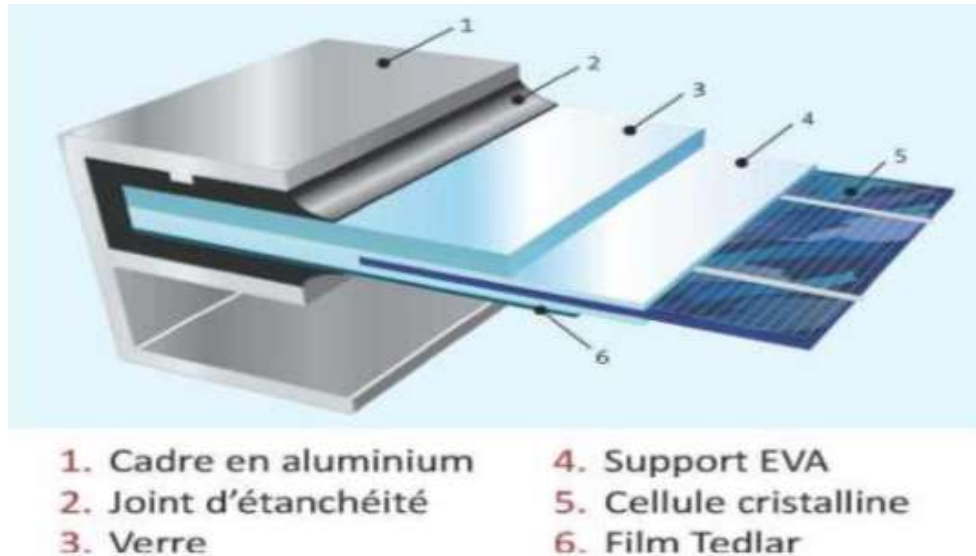
On appelle système photovoltaïque l'ensemble des composants nécessaire à l'alimentation d'une application en toute fiabilité. Il est composé d'un module photovoltaïque, d'un régulateur et d'une batterie.

Un panneau photovoltaïque se compose de petites cellules qui produisent une très faible puissance électrique avec une tension continue. Ces cellules sont disposées en série pour former un module ou panneau permettant de produire une puissance plus élevée. Les panneaux sont finalement interconnectés entre eux (en série ou en parallèle) pour obtenir un champ photovoltaïque.

I.3.5. La constitution d'un module photovoltaïque

Dans un panneau solaire, les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+). Elles sont encapsulée sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle), le plus souvent avec la présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation et un

verre trempé en face avant pour protéger les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière (la face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR) (Figl.2).



Figurel.2.: Encapsulation des cellules.

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), [4] on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités.

I.3.6. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est constituée d'une jonction PN. Cette dernière est la mise en contact de deux zones (zone N et zone P) ce qui provoquera par la suite un champ électrique dans la zone de charge d'espace.

Du point de vue pratique, une jonction PN est formée comme suit ; nous dopons une partie d'un semi-conducteur par des atomes ayant un électron de valence supplémentaire ce qui conduit à l'apparition d'un excès de charges négatives dans cette partie de semi-conducteur. On dit qu'elle est dopée de type n. Une autre partie de semi-conducteur sera dopée par des atomes ayant un électron de valence de moins que l'atome du matériau semi-conducteur. Il y aura cette fois un excès de charges positives .On dit qu'elle est dopée de type P.

Les charges négatives en excès dans la zone n chercheront à rejoindre les charges positives de la zone p et même chose pour les charges positives en excès dans la zone p.

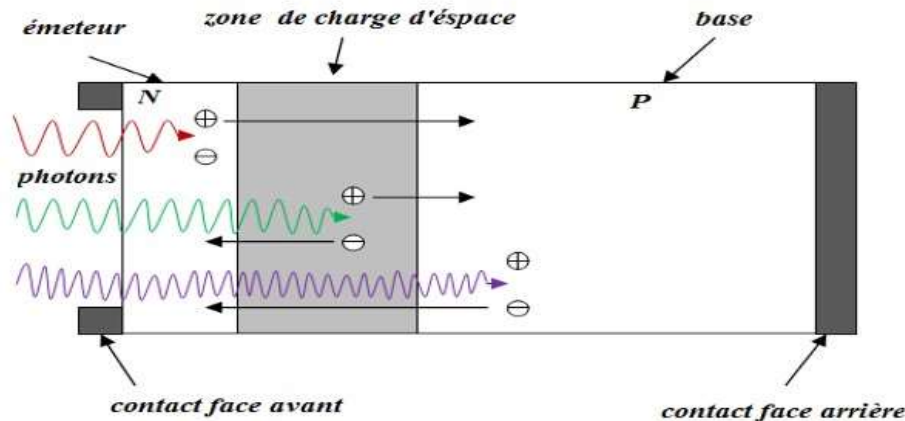


Figure I.3.: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Lorsque la cellule solaire est exposée à un rayonnement lumineux, les photons incidents créent des porteurs dans la zone N et la zone P et dans la zone de charge d'espace. Ces porteurs ont un comportement différent. Dans la zone de charge d'espace (ZCE), les paires électrons-trous créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique existant dans cette région.

Dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. [5] Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité.

I.4.Cellule photovoltaïque idéale

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV.

D'après la loi de nœuds:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (1.4.1)$$

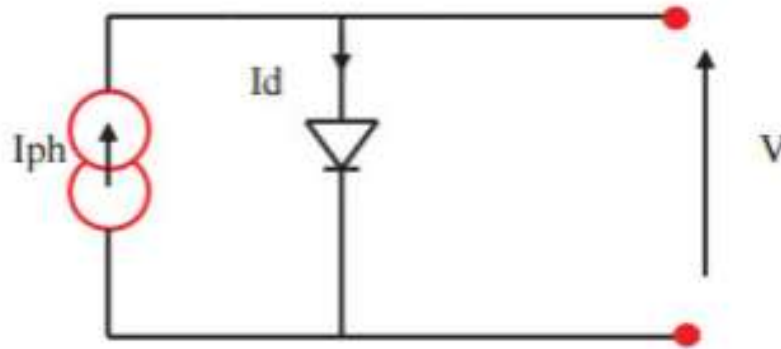


Figure I.4 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d$$

Une diode est une caractéristique non linéaire donnée par :

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (1.4.2)$$

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (1.4.3)$$

I_{ph} : Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

V_t : Le potentiel thermique.

I_s : Le Courant de saturation de la diode (A).

q : la charge de l'électron est égale à $1.6 \cdot 10^{-19}$ (C).

V : tension délivré par la cellule (V).

V_d : La tension aux bornes de la diode (V).

I.5. Cellule photovoltaïque réelle

Dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite .On modélisent donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_p .

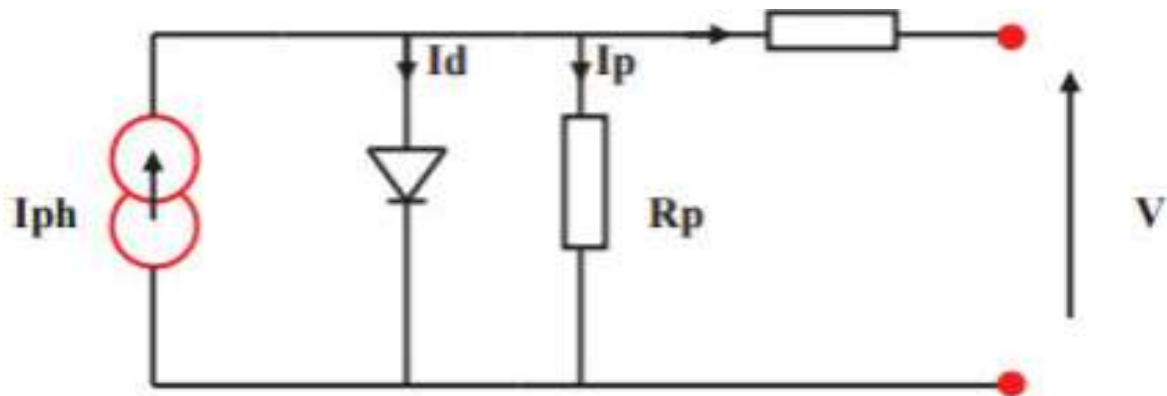


Figure I.5: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.5.1)$$

Avec

$$I_{sh} = \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (1.5.2)$$

L'équation du courant est donnée par l'expression suivant

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1.5.3)$$

I : Le courant fourni par la cellule.

R_s : Résistance en série.

R_{sh} : Résistance en parallèle.

I.6. Les différents types des cellules solaires

I.6.1. La cellule solaire à base de silicium cristallin

Considérée comme la technologie photovoltaïque la plus efficace et la plus dominante, la première génération des cellules solaires est fabriqué avec du silicium monocristallin et polycristallin.

I.6.1.1. La cellule à base du Si monocristallin

La cellule solaire à base de silicium monocristallin est généralement fabriquée en utilisant un wafer du silicium coupé d'un grand monocristal de silicium. Ce monocristal est le plus souvent fabriqué par la méthode de Czochralski. Cette méthode consiste d'abord à fusionner de silicium semi-conducteur de grande pureté (ayant seulement quelques ppm d'impuretés) dans un creuset à 1425 degrés Celsius.

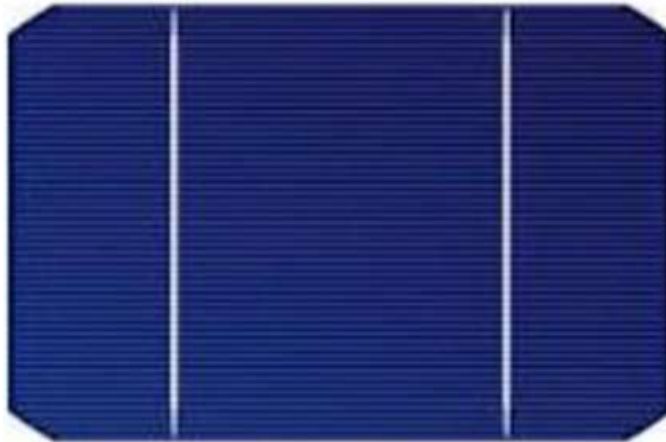


Figure I.6 : Une cellule photovoltaïque à base de silicium monocristalline.

I.6.1.2. La cellule à base du Si polycristallin

Le Si polycristallin utilisé dans ces cellules est obtenue par la refonte des chutes des monocristaux de silicium de l'industrie électronique. La préparation de si polycristallin nécessite deux à trois fois moins d'énergie que la technologie précédente.

Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin. Les rendements de conversion industrielle qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980 sont actuellement de 16 à 17% [6].

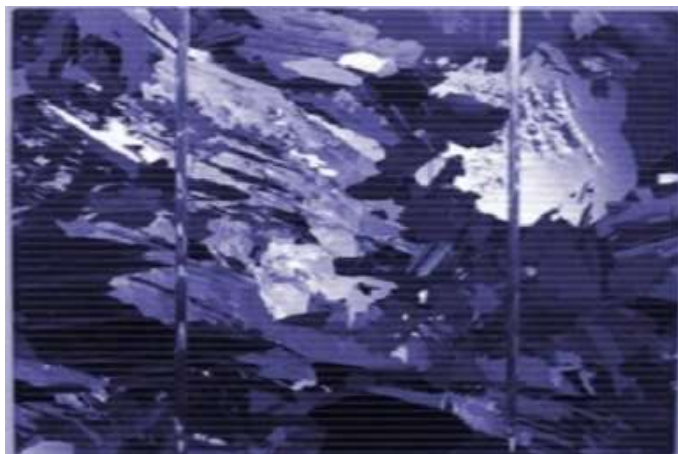


Figure I.7 : Une cellule solaire à base de silicium polycristalline

I.6.2. La cellule solaire à base de couches minces

Les premiers essais de fabrication des cellules solaires à base des couches minces remontent avec de fins dépôts sur des cristaux massifs puis finalement des cellules complètement à base de couches minces ont été obtenus. La technologie des cellules à base des couches minces repose sur l'utilisation des matériaux possédant un fort coefficient d'absorption du spectre solaire.

I.6.2.1. Les cellules à base du Si amorphe

Les cellules amorphes sont à base d'un matériau composé de silicium hydrogéné (état non cristallin) déposé sur un substrat de verre. Elles sont caractérisées par un fort coefficient d'absorption et elles sont souvent utilisées dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ce type des cellules est qu'il fonctionne même dans le cas d'un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment). Par rapport aux autres types, ces cellules ont un coût de production très faible, mais malheureusement aussi, elles ont un rendement plus bas qui varie entre 8 –10 % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée) [7].

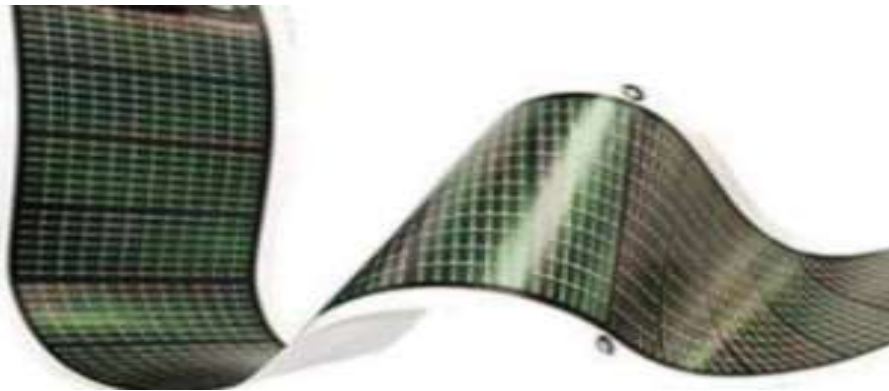


Figure I.8 : Une cellule à base de si amorphe.

I.6.2.2. Les cellules à base du tellure de Cadmium (CdTe)

Ce matériau est intéressant du fait de son gap optique 1,45eV parfaitement adaptée au spectre solaire comme il possède aussi un très fort coefficient d'absorption. Les modules PV à base des couches minces de CdTe commercialisées atteignent une efficacité de conversion jusqu' à 12,6% [8]. Cependant le facteur principal qui limite l'utilisation de cette technologie restera la toxicité du cadmium [9].

I.6.2.3. Les cellules à base des alliages Cuivre-indium-sélénium (CIS) / Cuivre-indium-Gallium-sélénium (CIGS)

Ces cellules utilisent un matériau composé de séléniure de cuivre et d'indium combiné avec du sulfure de cadmium comme un matériau du base. La figure I.9 montre un prototype d'une cellule PV à base du $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ (CIGS). L'avantage de l'utilisation du matériau $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ est le simple control de ses propriétés électriques et optiques qui peut être réalisé en contrôlant les concentrations des atomes In et Ga. En plus, ce matériau possède un fort coefficient d'absorption optiques (il est 2-3 fois supérieur à celui du Si à $E = 1.5 \text{ eV}$). En fin, il est utile de noter que le rendement de ce type des cellules est parmi les plus élevés dans la famille des cellules PV à base de couches.

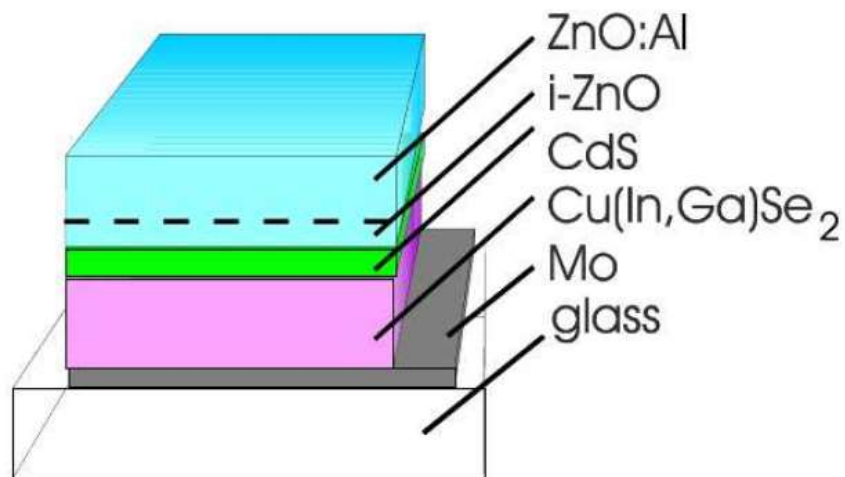


Figure I.9: Schéma d'une cellule à base de CIGS.

I.6.2.4. cellule à base de L'arséniure de gallium (GaAs)

Le GaAs est un matériau semi-conducteur qui possède un gap de 1.4-1.5 eV. Donc, il peut être utilisé pour la fabrication des cellules solaires. Du plus, ce matériau peut être préparé sous différentes formes : monocristallin, polycristallin, et couches minces comme il peut être combiné avec d'autres matériaux (AlAs, GaP, GaN, AlN, ...etc). Les cellules photovoltaïques en couches minces intégrant cette technologie sont caractérisées par un haut rendement (leur rendement dépasse les 25 % en laboratoire [10] mais leur coût étant encore très élevé. Leur utilisation reste cantonnée à des applications très spécifiques comme le domaine spatial.

I.6.3. Les cellules organiques

Les cellules organiques font aujourd'hui l'objet d'un sujet d'étude très actif en laboratoire, ce sont des cellules photovoltaïques dont, au moins, la couche active est constituée de molécules organiques. Il existe principalement deux types : les cellules photovoltaïques organiques moléculaires et les cellules photovoltaïques organiques en polymères.

Les cellules organiques utilisent un semi-conducteur organique déposé sur un substrat flexible en plastique ou en verre comme couche active. Cette dernière est comprise entre deux électrodes (une anode transparente, et une cathode réfléchissante) [11]. Les électrodes transparents doivent avoir une transmission optique très élevée afin de permettre un transport efficace des photons jusqu'à la couche active et possédant une bonne conductivité électrique et des propriétés de transparence très élevées dans le visible [12]. Notons que durant ces dernières années les matériaux organiques sont de plus en plus utilisés dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diodes électroluminescentes organiques [13].

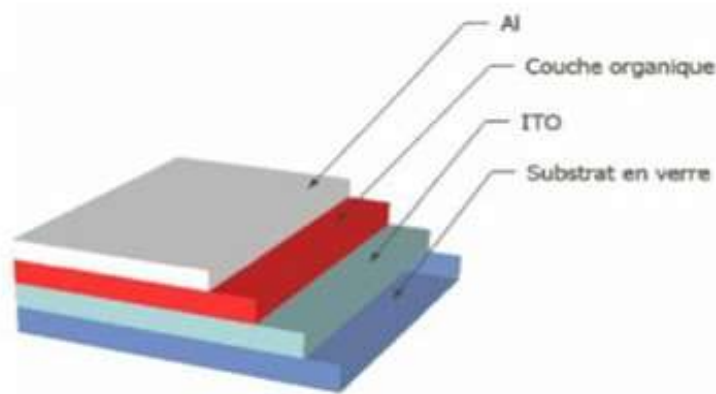


Figure I.10 : Structure d'une cellule solaire organique.

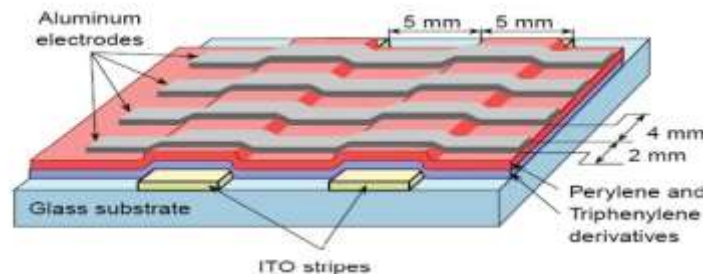


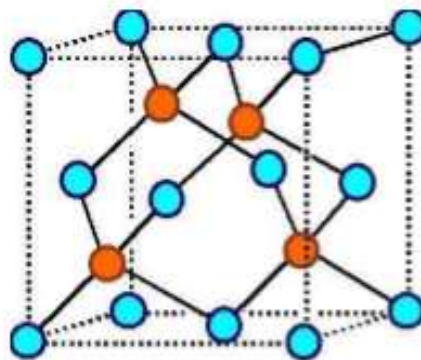
Figure I.11: Schéma d'une cellule organique réelle [13].

I.7.L'arséniure de gallium (GaAs)

C'est un matériau semi-conducteur de la famille III-V (le gallium et l'arsenic sont respectivement dans les colonnes III et V du tableau périodique des éléments). Le GaAs est utilisé en particulier pour réaliser des composants optoélectroniques, diodes électroluminescentes et des cellules photovoltaïques.

I.7.1.La structure cristalline

Du point de vue structurel, le GaAs cristallise dans une structure cubique de type zinc-blende (Fig I.12). Cette structure peut être considérée comme formée de deux réseaux cubiques à faces centrées (CFC) identiques qui s'interpénètrent, l'un contenant les atomes de gallium (Ga) et l'autre est réservé aux atomes de l'arsenic (As). Le décalage entre les deux réseaux est d'un quart de la diagonale principale du cube. On a donc quatre paires d'atomes par cellule conventionnelle [14].



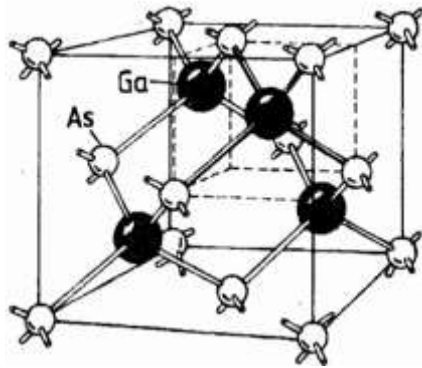


Figure I.12. : Structure cristalline du GaAs [14].

I.7.2. Les avantages de L'arséniure de gallium (GaAs)

Le GaAs est un matériau semiconducteur qui possède des propriétés physiques et chimiques très intéressantes parmi les quelles nous pouvons citer :

Le GaAs possède un gap direct ayant une largeur proche de la valeur idéale de 1.5 eV et par conséquent son utilisation comme matériau active dans les cellules PV permet l'obtention d'une efficacité maximale de conversion photovoltaïque assurée par une cellule solaire même à jonction unique (homojonction) [15] (contrairement au silicium qui a lui un gap indirect).

La sélection d'un matériau pour une utilisation possible dans le domaine des composants optoélectroniques est généralement basée surtout sur les propriétés de sa structure de bandes (gap direct). Dans le cas du GaAs, la largeur de sa bande interdite relativement importante lui offre un fonctionnement à haute températures [16]. D'autre part, l'arséniure de gallium possède une grande vitesse de saturation et une mobilité électronique des électrons plus élevées à ceux du silicium. Donc, les composants à base de ce matériau peuvent fonctionner à des fréquences plus élevées. Ils peuvent de même fonctionner à puissance plus élevée.

I.7.3. Propriétés physique et électrique

Les propriétés physiques et électriques de l'arséniure de gallium à la température ambiante sont illustrées sur le tableau suivant :

Nom	Symbole	Valeur
Structure cristalline		Zinc Blende
Paramètre cristallin	A	5.63 Å
Hauteur de la Bande Interdite	E_g	1.424 eV
Densité effective d'états dans la Bande de Conduction	N_c	$4.7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Densité effective d'états dans la Bande de Valence	N_v	$6.10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Mobilité des électrons	μ_n	$8.5 \cdot 10^2 \text{ cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Mobilité des trous	μ_p	$4 \cdot 10^2 \text{ cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Constante diélectrique relative	ϵ	13.1
Champ de claquage	E_{av}	$3 \cdot 10^2 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$
Affinité électronique	χ	4.07 eV

Tableau I.1. : Données numériques de l'arséniure de gallium (GaAs) à 300K.

I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.8.1. Les avantages

- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus au petite taille des modules PV et leur opération silencieuse.

- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.

I.8.2. Les inconvénients

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et nécessite des investissements d'un coût élevé.
- Faible rendement de conversion.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes notions de base de l'énergie photovoltaïque. Nous avons aussi décrit les différents types des cellules solaires ainsi que leur principe de fonctionnement. De plus, une partie a été réservée au GaAs où nous avons présenté les propriétés physique et électrique de ce matériau et ses avantages.

Chapitre II : Le simulateur GPVDM de la cellule PV et la modélisation

II.1. Introduction

Afin d'améliorer le rendement des cellules solaires, les scientifiques recherchent de meilleurs matériaux et normes en utilisant des programmes et Logiciels de simulation grâce auxquels les données peuvent être modifiées pour rechercher des valeurs qui donnent de bon résultats.

Dans ce chapitre, nous représentons le principe de modélisation d'une cellule photovoltaïque et nous donnons une idée générale sur le simulateur GPVDM.

II.2. Modélisation électrique de la cellule photovoltaïque

L'analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclaircissement et celui d'un générateur de courant, produisant un courant I_{ph} auquel se soustrait le courant de la diode en polarisation directe, n'est qu'une représentation simplifiée du fonctionnement réel de la cellule.

La caractéristique $I(V)$ d'une cellule PV dans le model des deux diodes est donné par la relation suivante:

$$I = I_{s1} \left(e^{\frac{q(V-IR_s)}{n_1KT}} - 1 \right) + I_{s2} \left(e^{\frac{q(V-IR_s)}{n_2KT}} - 1 \right) + \frac{V-IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (II.1)$$

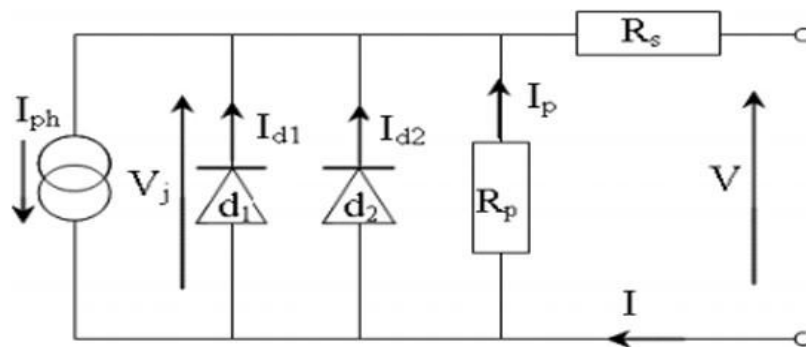


Figure II.1: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

R_p : la résistance shunt qui modélise les fuites par l'effet de bord autour de la cellule solaire [17].

R_s : Résistance série .

I_{s1} : Courant de saturation de la 1ere diode

I_{s2} : Courant de saturation de la 2eme diode.

n : facteur d'idéalité.

II.3.Paramètres d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique (I-V) d'une cellule solaire sous éclairement ou à l'obscurité est illustrée dans la figure (II.2) Les paramètres décrivant la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) du composant, et Le rendement η .

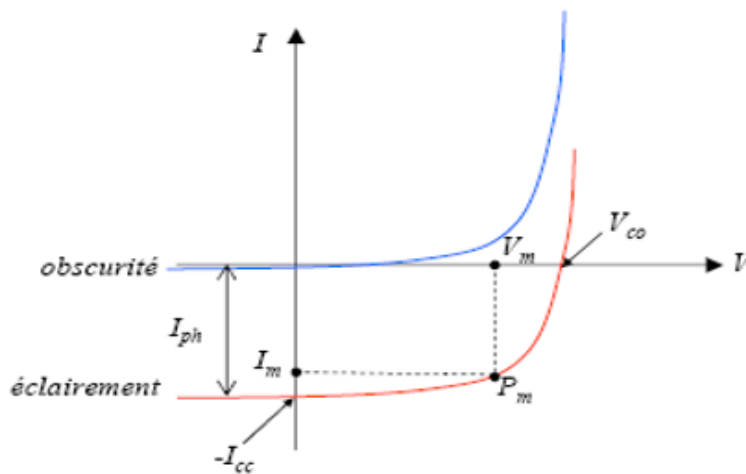


Figure II.2. : La caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

II.3.1.Le courant de court-circuit (I_{cc})

C'est le courant dans le circuit quand la charge est nulle. Il peut être mesuré en reliant les bornes positives et négatives par le fil de cuivre. En pratique il varie linéairement en fonction de la lumière [18].

II.3.2.Tension du circuit-ouvert (V_{CO})

Si on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur, on obtient à ses bornes une tension continue, dite tension à circuit-ouvert (obtenue pour $I = 0$). Cette tension est généralement de l'ordre de 0.5V à 0.7V pour les cellules élémentaires, elle dépend du matériau utilisé comme matériau active. En effet, cette quantité exprime le nombre de porteurs créés par chaque photon incident.

La tension de circuit ouvert dépend de l'éclairement de la cellule. Quand $I_d=0$ dans l'expression du courant de la cellule sous illumination, on obtient :

$$V_{CO} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (II.2)$$

Avec :

T: la température absolue.

q : la constante de charge d'électron ($q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C).

K: la constante de Boltzmann ($K = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

I_{ph} : Le courant photonique (photo-courant).

I_s : le courant de saturation.

Dans le cas ou $I_{ph} \ll I_s$, il s'agit dans ce cas d'un régime des faibles flux lumineux et l'équation II.2 peut être écrit comme suit:

$$V_{CO} = \frac{kT}{q} \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (II.3)$$

Dans le cas ou $I_{ph} \gg I_s$, il s'agit dans ce cas d'un régime des forts flux lumineux et l'équation II.2 peut être écrit comme suit:

$$V_{CO} = \frac{KT}{q} \ln \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (II.4)$$

II.3.3. La puissance maximale P_m

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque sous illumination est un paramètre essentiel qui décrit la puissance maximale délivrée par cette cellule et elle est calculée à partir de la caractéristique courant-tension comme suit :

$$P_m = V_m \times I_m \quad (II.5)$$

En effet, elle traduit sur la caractéristique I-V le point du fonctionnement $P_m(V_m, I_m)$ qui est situé au coude de la caractéristique I-V et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension V_m et du courant I_m sont appelées également tension et courant maximums respectivement [19].

II.3.4. Facteur de forme :

Le facteur de forme (FF) représente l'efficacité de la cellule et peut également nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée ($V_m \cdot I_m$) et la puissance idéale ($V_{CO} \cdot I_{CC}$) [20].

$$P_{idéale} = V_{CO} \times I_{CC} \quad (II.6)$$

$$FF = \frac{P_m}{P_{idéale}} = \frac{P_m}{V_{CO} \times I_{CC}} \quad (II.7)$$

II.3.5. Le rendement η

Le rendement (η) des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \times V_{CO} \times I_{CC}}{P_{in}} \quad (II.8)$$

P_{in} : La puissance lumineuse incidente.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

II.4.L'influence des différents paramètres sur la caractéristique I(V)

II.4.1.Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule dépend fortement de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface .Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension de circuit ouvert qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement [21].

II.4.2.La résistance série R_s

La résistance série caractérise les pertes de tension dans le semi-conducteur et à travers les contacts ohmiques de la cellule [22]. La minimisation de ces pertes (diminution du R_s) améliore le rendement de la cellule solaire.

II.4.3.La résistance R_{sh}

La résistance parallèle R_{sh} traduit la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des atomes constituant les contacts métalliques à haute température perce l'émetteur comme elle peut aussi être due à un court-circuit sur le bord de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible [23].

II.5.recombinaison et durée de vie des porteurs minoritaires

Le dopage du semi-conducteur étant en général supérieur au taux de photo-génération, les porteurs minoritaires (électrons dans un matériau de type p et trous dans un matériau de type n) n'existeront en moyenne que pour un temps égal à la durée de vie τ [24]. Les électrons qui se déplacent librement à travers le cristal ont une tendance à se recombiner avec les trous. Ce phénomène est appelé recombinaison des porteurs de charge et sa vitesse est proportionnelle au nombre de trous et d'électrons libres existants. Lorsque la recombinaison se produit, l'électron et le trou cessent d'être des porteurs libres. Au cours de ce phénomène, l'électron passe à un état d'énergie inférieure et libère une quantité d'énergie égale à la différence de son état origine et son état final [25]. Cette énergie peut prendre trois formes: i) radiative où l'émission d'un photon

(lumière) se produit, ii) non radiative et dans ce cas il s'agit de l'émission d'un phonon (chaleur), et iii) Auger où un transfert d'énergie cinétique à un autre électron libre ou trou aura lieu [26].

D'autre part, il faut noter qu'il y a différents types de la recombinaison électron-trou qui peuvent se produire dans un matériau semi-conducteur ou dans un composant électronique à base d'un tel type des matériaux. Nous pouvons citer par exemple: la recombinaison directe (de bande à bande), la recombinaison indirect (de bande aux impuretés, avec l'aide de pièges), la recombinaison Auger, et la recombinaison de surface.

A chaque mécanisme de recombinaison des porteurs de taux R est associée une durée de vie τ donnée par la relation :

$$R = \frac{\Delta n}{\tau} \quad (II.9)$$

Δn : La concentration des porteurs.

R : Taux de recombinaison des porteurs.

τ : Durée de vie des porteurs.

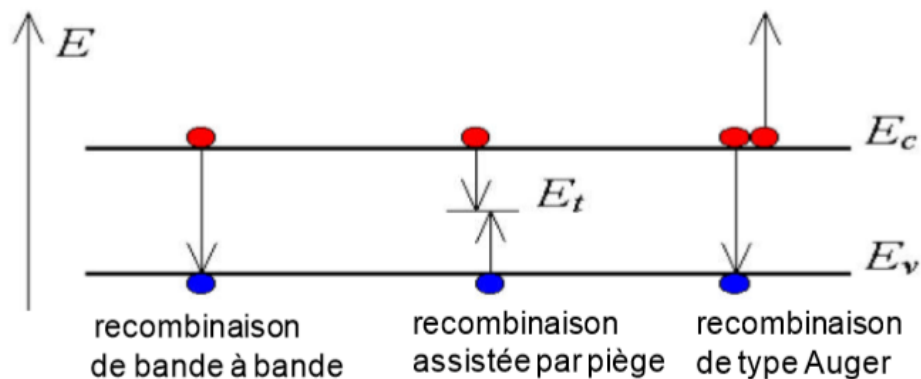


Figure II.3: Les différents mécanismes de recombinaison électron-trou dans un semi-conducteur

II.6. Le logiciel GPVDM

II.6.1. Définition :

GPVDM (Général-Purpose Photovoltaic Device Model) a été écrit à l'origine pour simuler des cellules solaires organiques. La première version de ce logiciel s'appelait OPVDM et actuellement le modèle s'appelle GPVDM parce qu'il peut simuler plus que juste les dispositifs organiques.

Les dispositifs qu'il peut les simuler sont:

- Cellules OPV
- Les différentes structures des cellules solaires organiques
- OLED
- Transistors à effet de champ organique (OFET)
- Cellules solaires au silicium cristallin
- cellules solaires à base du silicium amorphe (a-Si)
- Cellules solaires CIGS

GPVDM permet de simuler les caractéristiques de courant-tension ainsi que le modèle et le profil optique dans le dispositif. Il peut simuler:

- Courbes de JV
- Spectroscopie d'impédance (IS)
- Prise en compte complète du modèle optique dans la réflexion sur les interfaces et l'absorption.
- Calcul du profil de réflexion

II.6.2. Simulation des cellules photovoltaïques avec GPVDM

Afin de faire une simulation avec le simulateur GPVDM, on doit suivre les étapes suivantes :

- Après l'installation du logiciel, cliquer sur l'icône du simulateur pour lancer le GPVDM fenêtre indiquée sur la figure II.4 sera affiché.

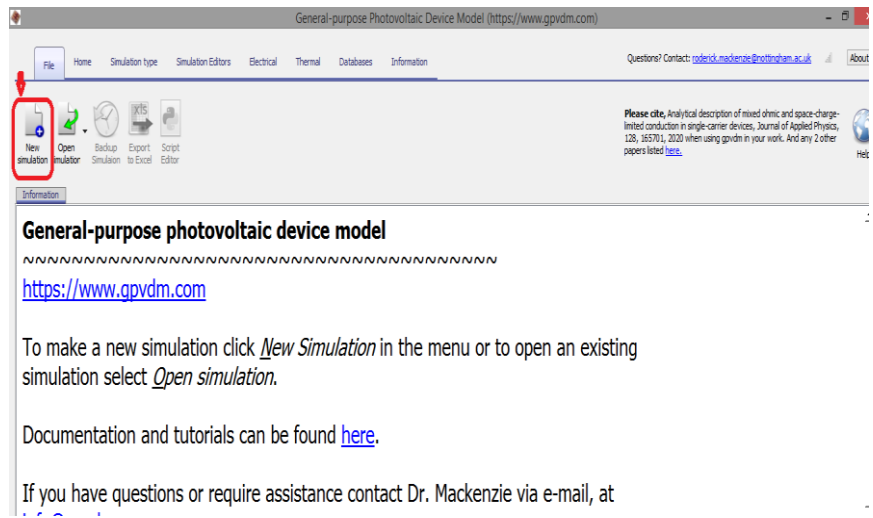


Figure II.4 : Création d'une nouvelle simulation avec GPVDM.

- Pour lancer une nouvelle simulation, il suffit de cliquer sur l'icône NEW SIMULATION.
- Une liste des dispositifs est disponible pour choisir le type de dispositif.



Figure II.5 : Sélection de type de dispositif à simuler.

- Créé d'un dossier pour sauvegarder les résultats de la simulation.

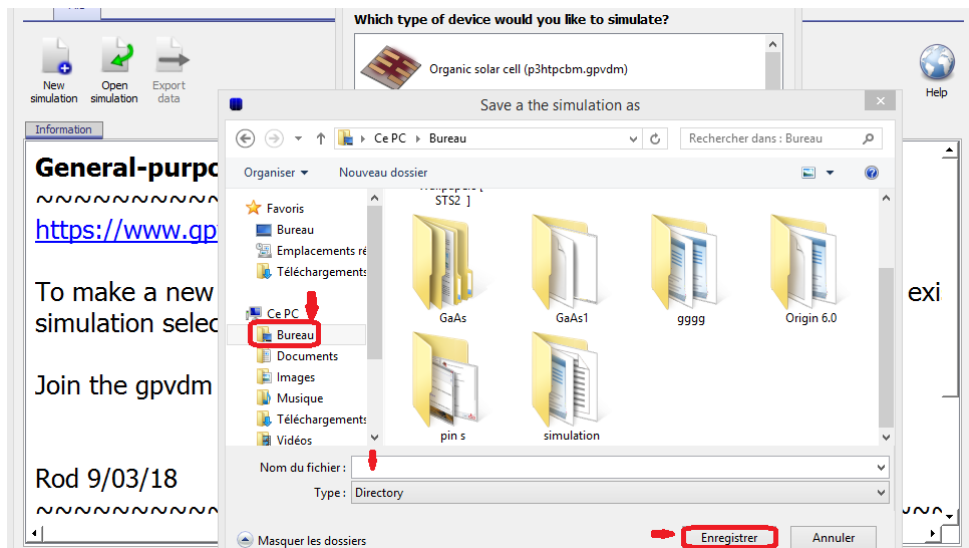


Figure II.6 : choisir un dossier pour sauvegarder les résultats.

- L'éditeur de structure (pour crée une cellule) peut être utilisé pour changer l'épaisseur et le type de matériau utilisé dans chaque couche constituant la cellule.

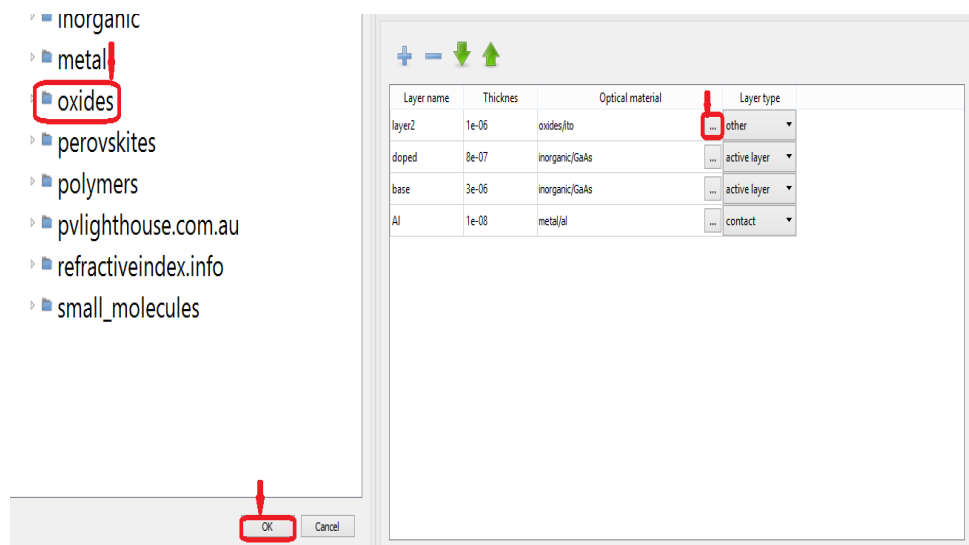


Figure II.7 : L'éditeur de couches et des types des matériaux.

- saisir les propriétés électriques de chaque matériau utilisé.

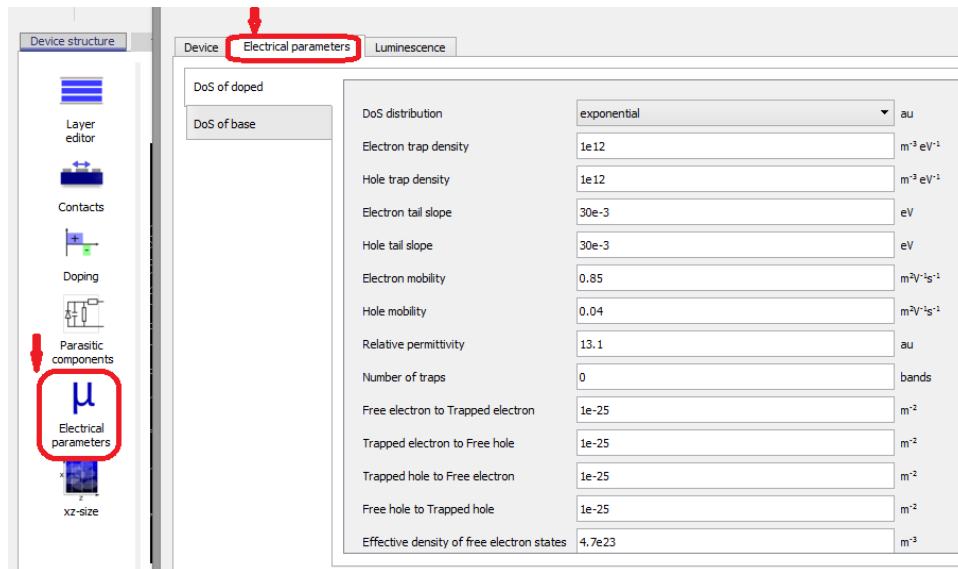


Figure II.8 : Editeur de paramètres électrique.

-choisir le type du dopage et la concentration des dopants dans chaque couche.

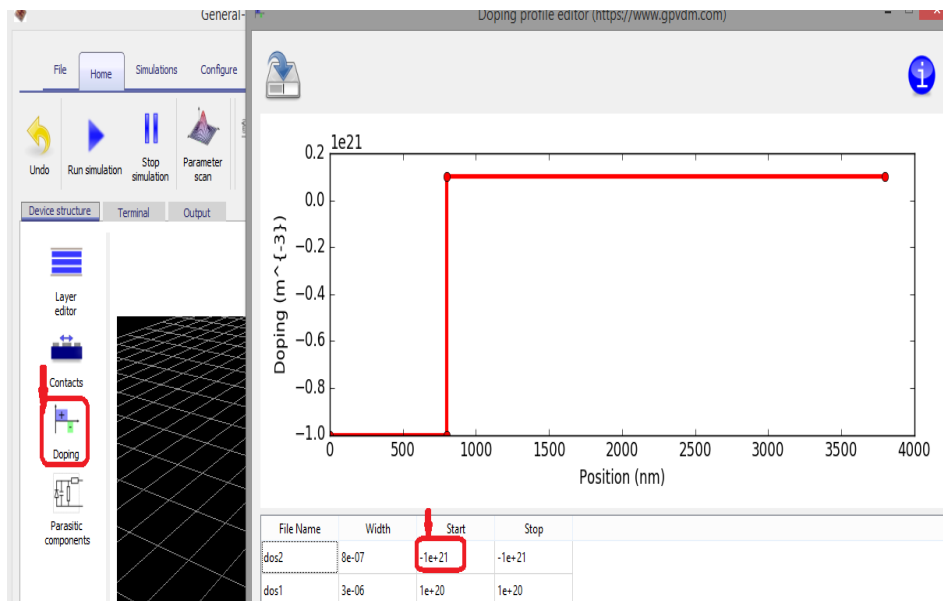


Figure II.9: éditeur du dopage.

Après avoir terminé ces étapes, nous sommes prêts à démarrer la simulation et pour faire ça il suffit de cliquer sur le bouton 'Run simulation' comme indiquer sur la figure II.10.

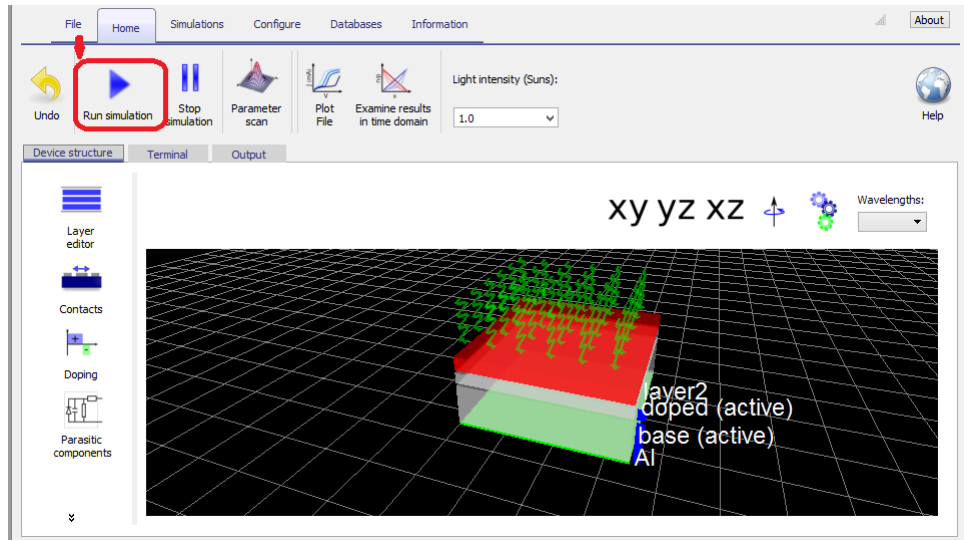


Figure II.10 : La fenêtre principale du simulateur GPVDM.

II.7.Équations fondamentales des dispositifs

II.7.1L'équation de Poisson et les équations de continuité

La résolution de l'équation de Poisson pour les électrons et les trous nous permet de décrire la variation du potentiel électrostatique dans un semi-conducteur et par la suite décrire les phénomènes de transport des charges électriques dans le semi-conducteur [27]. L'équation de Poisson à une dimension s'écrit:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_s} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$$\rho = p - n + N_D - N_A$$

n et p : sont les densités des électrons et des trous libres.

N_D et N_A : sont les concentrations de donneurs et d'accepteurs ionisés, respectivement.

ϵ_s : est la permittivité diélectrique du semi-conducteur.

Pour décrire les phénomènes de transport des porteurs, on utilise les équations de continuité pour les électrons et pour les trous à une dimension :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \frac{\partial J_n}{\partial x} + G_n - R_n \quad (\text{II.11})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{e} \frac{\partial J_p}{\partial x} + G_p - R_p \quad (\text{II.12})$$

R_n et R_p : les taux de recombinaison des électrons et des trous, respectivement.

G_n et G_p : les taux de génération des électrons et des trous, respectivement.

J_n et J_p : la densité de courant des électrons et des trous, respectivement.

e : la charge électrique élémentaire.

II.7.2. La densité de courant des trous et électrons

II.7.2.1. Le courant de diffusion (porteurs minoritaires)

Les courants de trous dans la région de type n et d'électrons dans la région de type p sont des courants de diffusion donnés par :

$$J_{dp} = -q D_p \frac{d\Delta p}{dx} \quad (\text{II.13})$$

$$J_{dn} = q D_n \frac{d\Delta n}{dx} \quad (\text{II.14})$$

D_n, D_p : Les coefficients de diffusion des électrons et des trous, respectivement.

II.7.2.2. Le courant de conduction

Le courant de conduction créé sous l'action d'un champ électrique E est donné par :

$$J_{cn} = n q \mu_n E \quad (\text{II.15})$$

$$J_{cp} = p q \mu_p E \quad (\text{II.16})$$

μ_n et μ_p : sont les mobilités des électrons et des trous, respectivement.

p et n : les densités de porteurs de charge.

II.7.2.3. La densité de courant des trous

Dans la zone N, le courant total des trous est donné par l'expression suivante :

$$J_p = J_{cp} + J_{dp} \quad (II.17)$$

$$J_p = q p \mu_p E - q D_p \frac{d\Delta p}{dx} \quad (II.18)$$

En absence du champ électrique ($E = 0$) :

$$J_p = -q D_p \frac{d\Delta p}{dx}$$

Avec :

$$\Delta p = p_n - p_{n0}$$

II.7.2.4. La densité de courant des électrons

La densité de courant des électrons dans la zone p est donnée par l'équation suivante :

$$J_n = J_{cn} + J_{dn} \quad (II.18)$$

$$J_n = q n \mu_n E + q D_n \frac{d\Delta n}{dx} \quad (II.19)$$

En absence du champ électrique ($E = 0$) :

$$J_n = q D_n \frac{d\Delta n}{dx}$$

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé le principe de fonctionnement du simulateur GPVDM ainsi que les bases mathématiques du model utilisé pour décrire le fonctionnement de la cellule PV.

Chapitre III : Résultats et discussion

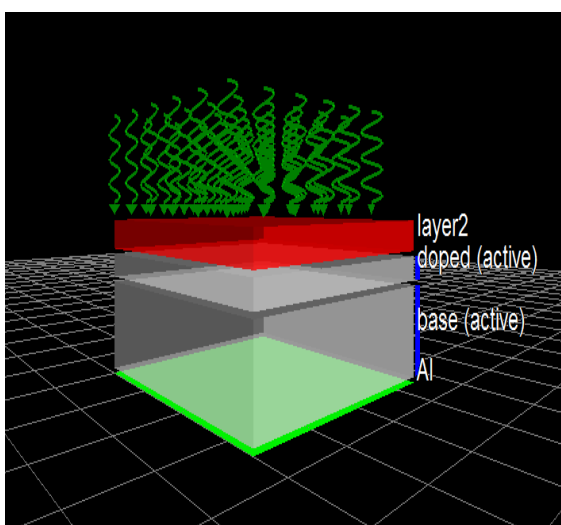
III.1. Introduction

La recherche dans le domaine d'énergie photovoltaïque s'oriente sur deux axes principales qui sont: l'augmentation du rendement des cellules d'un côté et la diminution du coût de production de l'autre côté. Dans ce contexte, la simulation apparaît comme un bon outil pour réaliser cet objectif.

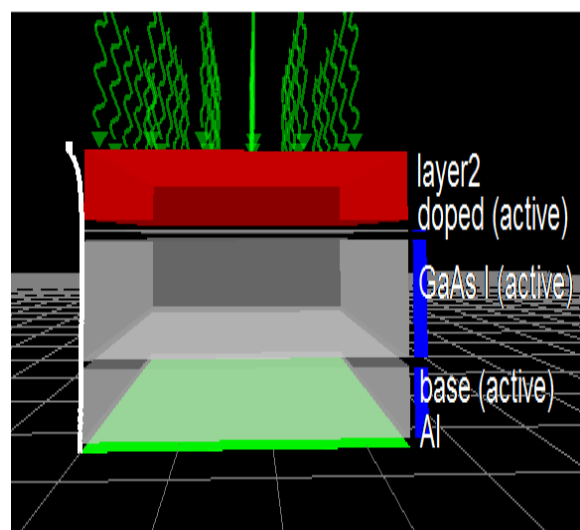
Dans ce chapitre, nous présentons l'étude des propriétés des cellules solaires à base de L'arséniure de gallium. Nous avons considéré deux structures différentes l'une à base de la structure PN et l'autre à base de la structure PIN. On va étudier l'influence des certains paramètres tels que; l'épaisseur, le dopage, la réflexion et les résistances (R_s , R_p) sur les performances de ces cellules ainsi que l'effet de l'addition d'une couches TCO sur ces performances.

III.2. Comparaison entre la structure PN et PIN

Avant d'étudier l'effet de l'addition d'une couche TCO sur les caractéristiques d'une cellule solaire à base de GaAs, nous avons commencé cette étude par optimiser les performances des cellules solaires à base de GaAs sans couche TCO. Pour cela, nous avons considéré deux types de cellules solaires ; l'une est une cellule de type PN (à base d'une homojonction P-N (GaAs(P)/GaAs(N)) et l'autre est de type PIN (GaAs(P)/GaAs(I)/GaAs(N)). Les deux structures sont présentées sur la **figure (III.1)**.



(1)



(2)

Figure III.1: structure (1) : PN, structure (2) : PIN.

La structure 1 (PN): la cellule solaire est constituée d'une couche GaAs dopée P déposée sur une couche GaAs type N. Une couche métallique d'Al est utilisée comme contact arrière tandis qu'une couche du verre est utilisée pour protéger la cellule.

La structure 2 (PIN): la cellule solaire constituées d'une couche de GaAs type P déposée sur une couche de GaAs(I) qui est elle-même déposée sur une couche de GaAs de type N. Une couche métallique d'Al est utilisée comme contact arrière tandis qu'une couche du verre est utilisée pour protéger la cellule.

En premier temps, nous avons étudié l'effet de changement de l'épaisseur de la couche GaAs(P) sur le rendement de la cellule GaAs(P)/GaAs(N) et les résultats obtenus sont illustrés sur **la figure (III.2)**. Comme nous pouvons le voir sur cette figure, l'épaisseur de la couche GaAs(P) a un effet important sur le rendement de cette cellule. Le rendement de la cellule GaAs(P)/GaAs(N) augmente de **22.5%** à **24.7%** lorsque l'épaisseur de la couche P varie de 100nm à 400nm puis il diminue lorsque l'épaisseur de la couche P varie de 400nm à 700nm. Lorsque l'épaisseur de la couche P varie de 700nm à 900nm, le rendement de la cellule passe de **23.3%** à **24.1%**. Pour des valeurs de l'épaisseur supérieures à 900nm le rendement diminue à nouveau. Donc, le meilleur rendement pour cette cellule est obtenu pour une couche GaAs(P) d'épaisseur égale à 700nm.

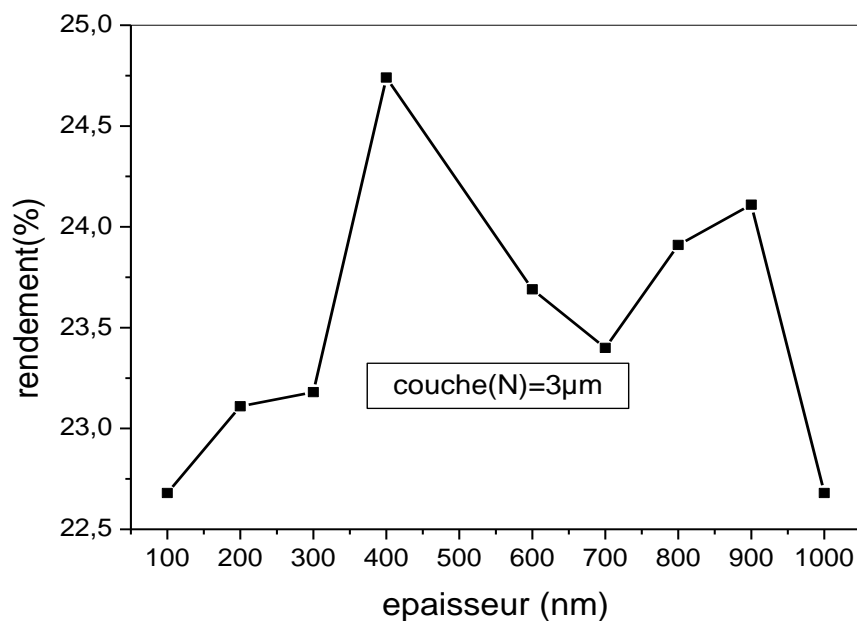


Figure III.2: Rendement en fonction de l'épaisseur de la couche P d'une cellule type PN à base de GaAs.

Une étude similaire a été effectuée dans le cas de la cellule GaAs(P)/GaAs(I)/GaAs(N) cependant dans ce cas nous avons tout d'abord fixé l'épaisseur de la couche P à une valeur bien déterminée puis nous avons varié l'épaisseur de la couche I en mesurant à chaque fois le rendement de notre cellule. Les résultats obtenus sont illustrés sur **la figure (III.3)**. Nos résultats montrent que le rendement de la cellule PIN augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche I. une valeur maximale de **26.7%** a été obtenue pour une épaisseur de la couche I de 5000nm. Si l'épaisseur de la couche I dépassera 5000nm, le rendement de la cellule diminuera.

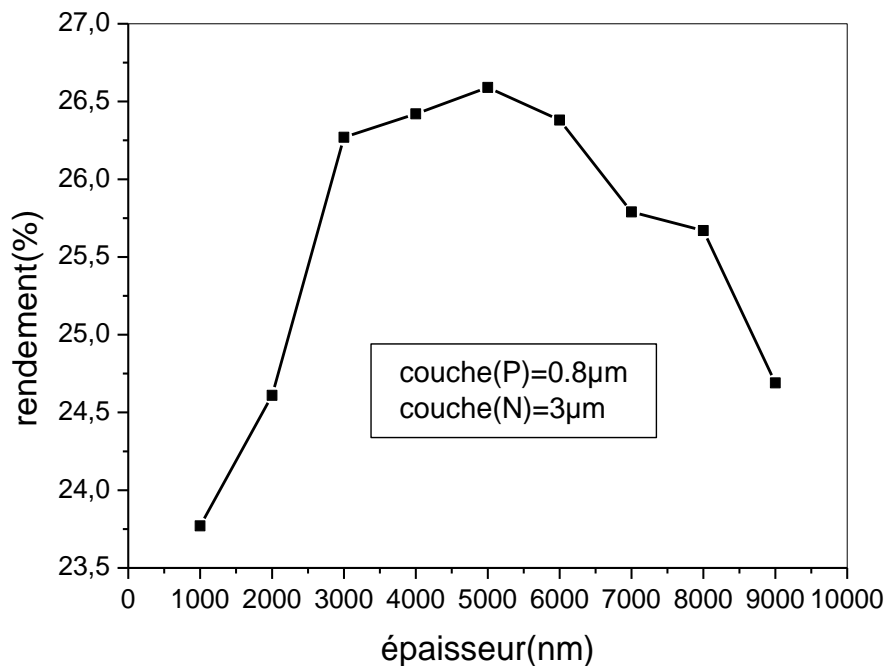


Figure III.3: Rendement en fonction de l'épaisseur de la couche I d'une cellule type PIN à base de GaAs.

Par la suite, nous avons fixé l'épaisseur de la couche GaAs(I) à 5000nm et nous avons fait varier l'épaisseur de la couche GaAs(P). **La figure III.4** présente l'influence de l'épaisseur de la couche P sur le rendement de la cellule PIN. Comme nous pouvons le voir sur cette figure, l'augmentation de l'épaisseur de la couche P a un effet très faible sur le rendement de cette cellule. Lorsque l'épaisseur de la région P passe de 100nm à 1000nm, le rendement de la cellule PIN varie de 26.4% à 26.6% seulement. En effet, le meilleur rendement de la cellule PIN est obtenu pour épaisseur de la couche P d'environ 800nm.

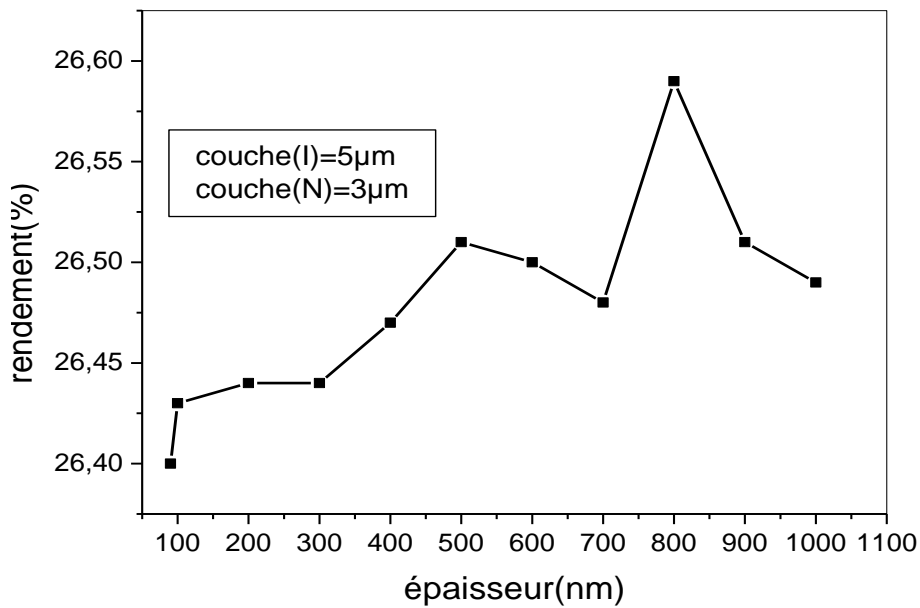


Figure III.4: Rendement en fonction de l'épaisseur de la couche P d'une cellule type PIN à base de GaAs.

D'après les résultats précédents, nous avons constaté que le rendement de la cellule type PIN est supérieur à celui de la cellule PN. Donc, nous sélectionnons la cellule solaire de type PIN pour le reste de cette étude.

L'écart de performance entre les deux structures (PN et PIN) peut être expliqué par le fait qu'on a, pour la structure PIN, des valeurs d' I_{CC} et de V_{CO} un peu plus élevés que pour la structure PN. En effet, la couche intrinsèque GaAs(I) de la structure PIN permet d'avoir une plus grande zone de charge d'espace (ZCE) et améliorer ainsi la génération des paires électron-trou. L'augmentation de I_{CC} est donc due à l'augmentation de la concentration des porteurs photogénérés et celle du V_{CO} à l'augmentation de la largeur de la ZCE.

III.3. La cellule à base de GaAs (PIN)

III.3.1. Effet de l'épaisseur sur le rendement de la cellule

Epaisseur et dopage (GaAs P)	$e=8.10^{-7}m, D=1.10^{+21} m^{-3}$
Epaisseur et dopage (GaAs N)	$e=3.10^{-6}m, D=1.10^{+20} m^{-3}$
Dopage (GaAs I)	$D=1.10^{+18}m^{-3}$
R_s et R_p	$R_s=10\Omega, R_p=1000\Omega$

Tableau.III.1 : Les paramètres constants de la cellule à base de GaAs (PIN)

III.3.2.la caractéristique I(V) de la cellule type PIN

La figure (III.7) représente les caractéristiques courant-tension de la cellule type PIN obtenus pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche GaAs(I).

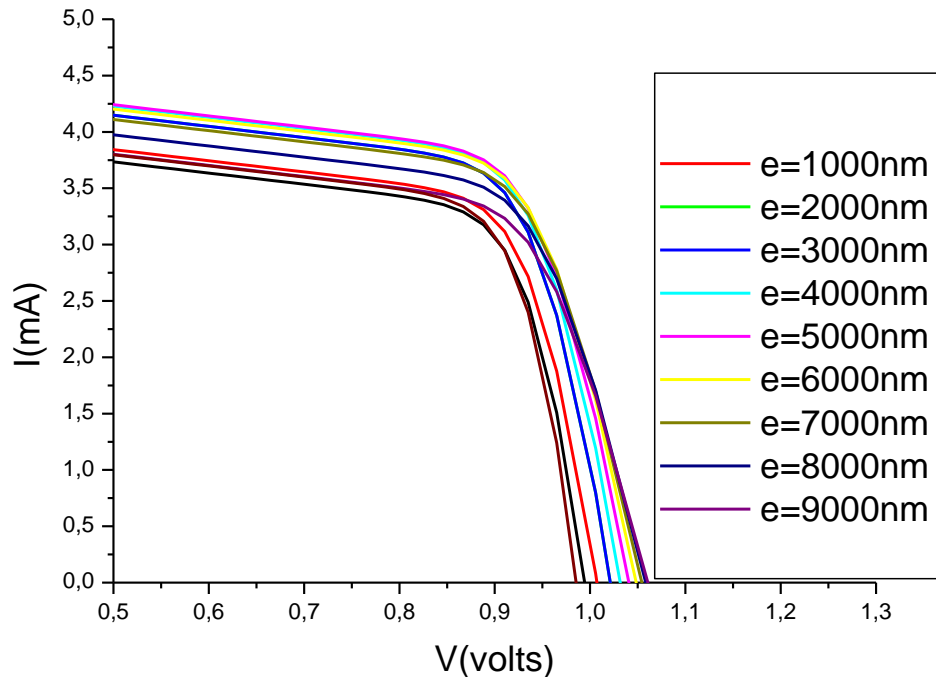


Figure III.5 : La caractéristique courant –tension de la cellule PIN pour différentes épaisseurs de la couche GaAs(I).

Comme nous pouvons le voir sur la figure(III.5), l'augmentation de l'épaisseur de la couche (I) entraîne une augmentation du I_{cc} et en même temps une augmentation de la tension de circuit-ouvert V_{oc} . Lorsque l'épaisseur de la couche (I) dépassera 5000nm, nous pouvons facilement observer que la valeur du I_{cc} a diminué. Cette diminution du I_{cc} est accompagnée d'une augmentation de la tension V_{oc} . La valeur maximale du courant $I_{cc}=4.25$ mA est obtenus pour une épaisseur $e=5000$ nm.

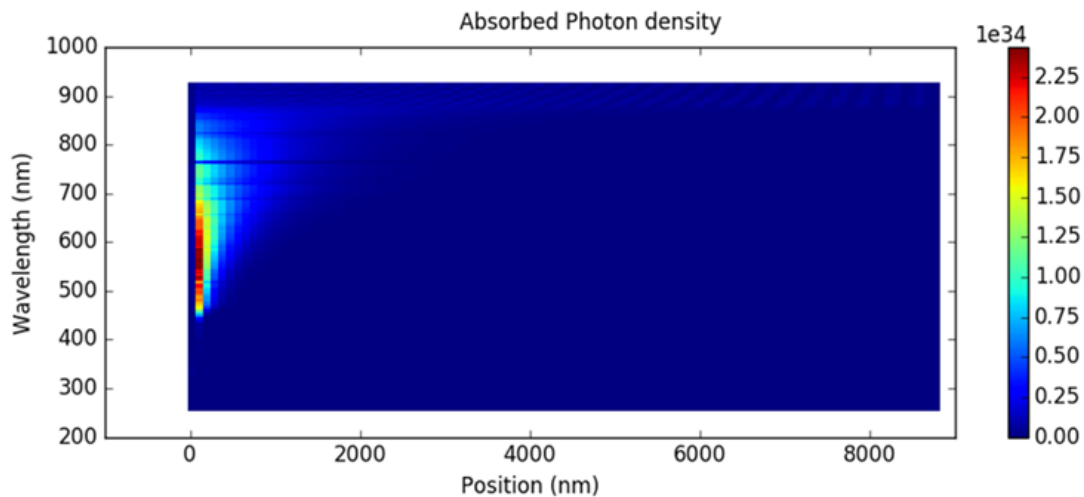


Figure III.6: profil de distribution des photons absorbés.

La figure(III.6) montre le profil de distribution des photons absorbés à travers la cellule PIN et en meme temps en fonction de la longueur d'onde des photons incidents. Comme nous pouvons le voir sur cette figure, une forte absorption dans la region [450nm-700nm] du spectre optique se produit dans la couche GaAs(P) sur une profondeur de 300nm. Une autre absorption moins importante des photons dont la longueur d'onde se situe dans l'intervalle 600nm-800nm se produit dans la couche **P** mais sur une profondeur plus importante (d'environ **700nm**). Pour interpreter ces resultats, nous devons prendre en consideration le spectre d'absorption optique du GaAs (Fig.III.7).

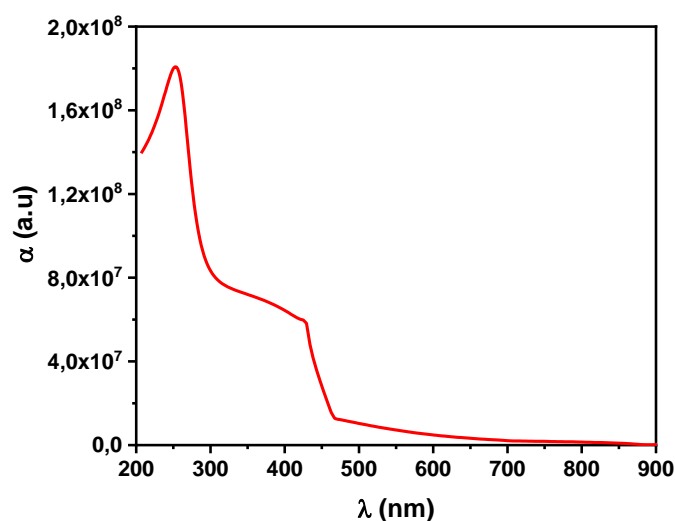


Figure III.7: Spectre d'absorption optique du GaAs.

En combinant les résultats de la **figure(III.6)** et le spectre d'absorption de GaAs (**Fig.III.7**), nous pouvons dire que la forte absorption dans l'intervalle [450nm-700nm] résulte des transitions électroniques entre bande de valence et bande de conduction dans la couche I. Les photons de longueurs d'ondes entre 600nm et 800nm sont absorbés dans la zone de charge d'espace (ZCE).

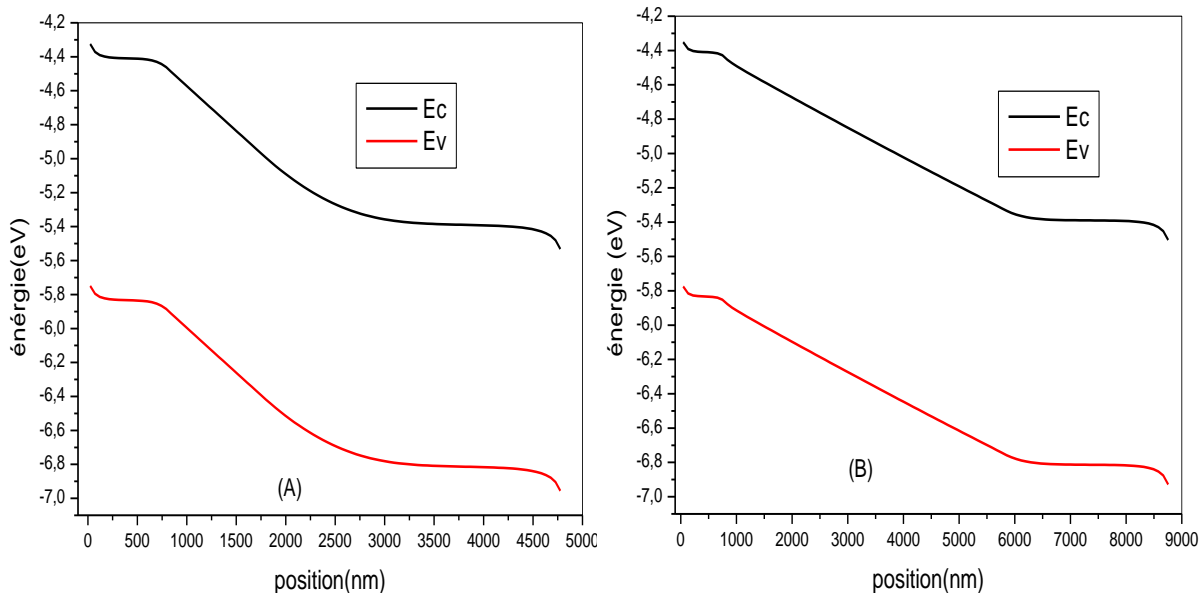


Figure III.8:diagramme de bandes de la cellule PIN (A : $e=1000\text{nm}$) ,(B : $e=5000\text{nm}$).

Pour mieux comprendre l'effet de l'épaisseur de la couche (I) sur les propriétés électriques de la cellule GaAs(PIN), nous avons tracé les diagrammes des bandes de la cellule PIN pour deux valeurs différentes de l'épaisseur de la couche I ($e=1000\text{nm}$ et $e=5000\text{nm}$) et les résultats obtenus sont présentés sur la **figure (III.8)**. Nous pouvons voir clairement que la largeur de la ZCE dans le cas (B) est plus grande que celle observée dans le cas(A). En effet, la présence d'une couche I dans la cellule PIN a comme objectif d'élargir la ZCE qui va s'étendre très largement dans la couche I du fait de sa très faible concentration en dopants. Ainsi, avoir une ZCE suffisamment grande permettra d'avoir l'essentiel des paires électron-trou créé dans cette zone, et par conséquent, d'augmenter le photocourant. Donc, ceci nous explique pourquoi le rendement dans le cas (B) ($e=5000\text{nm}$) est supérieur à celui du cas (A) ($e=1000\text{nm}$) mais la question qui se pose pourquoi on n'a pas le même effet pour des épaisseurs de la couche I supérieures à 5000nm ?

Notre analyse montre que l'augmentation de l'épaisseur de la couche I va en effet, améliorer l'absorption des photons à condition que la longueur de diffusion des porteurs

minoritaires soit relativement supérieure à l'épaisseur de cette couche. Cet optimum obtenu est donc un compromis entre l'augmentation de l'épaisseur et la longueur de diffusion des porteurs minoritaires.

III.3.3. Effet de dopage sur le rendement

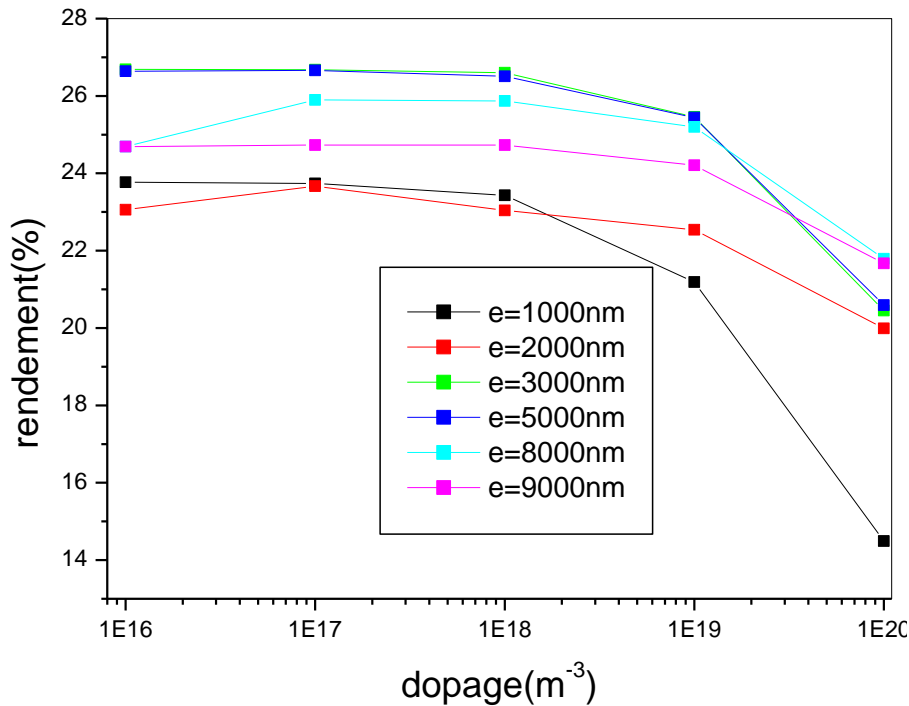


Figure III.9 : Variation du rendement d'une cellule (PIN) en fonction du dopage.

La figure (III.9) représente la variation du rendement de la cellule PIN en fonction de la concentration des dopants. Pour une épaisseur donnée de la couche I, on remarque que le rendement est presque constant pour une concentration des dopants entre $10^{+16}m^{-3}$ et $10^{+18}m^{-3}$. Nous obtenons la meilleure valeur du rendement (**26.59%**) lorsque l'épaisseur de la couche I est égale à $5\mu m$. En augmentant la concentration des dopants à $10^{+19}m^{-3}$ et $10^{+20}m^{-3}$ le rendement diminue. Donc, pour une épaisseur donnée, le rendement de la cellule PIN présente un maximum qui varie avec le dopage. En effet, l'augmentation du dopage, accroît de manière évidente, le champ électrique dans la structure PIN et entraîne en même temps une diminution de la zone de charge d'espace (ZCE). L'augmentation du champ électrique va entraîner un accroissement du V_{CO} , en revanche, la diminution de la ZCE va entraîner une diminution du I_{CC} . Ces deux tendances opposées du V_{CO} et du I_{CC} vont par conséquent donner ces rendements maximums en fonction du dopage et de l'épaisseur de la couche I. Afin de confirmer notre analyse, nous avons calculé la caractéristique I-V de notre cellule PIN pour

différentes valeurs du dopage en fixant l'épaisseur de la couche à sa valeur optimale déterminée précédemment et les résultats obtenus sont présentés dans la **figure (III.10)**.

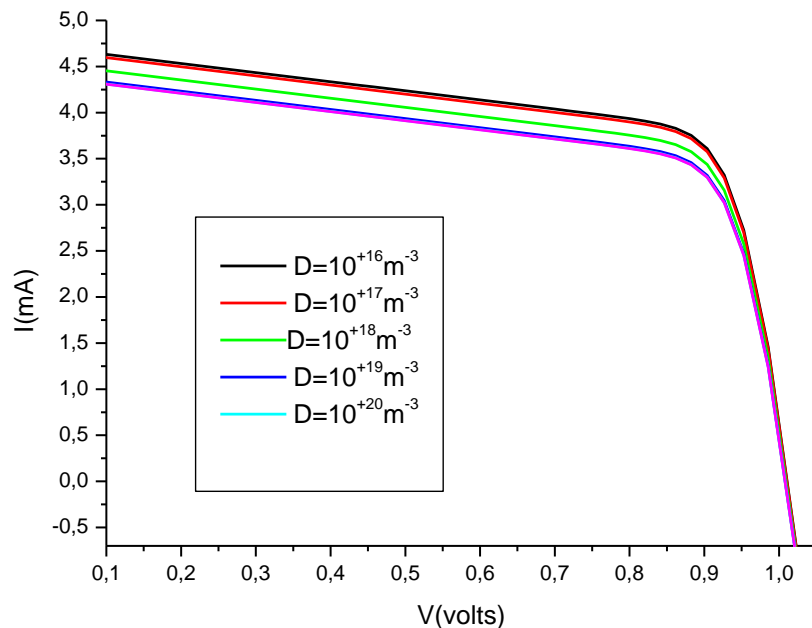


Figure III.10 : La caractéristique I(V) de la cellule PIN pour différentes valeurs du dopage.

Comme déjà dit précédemment, nous pouvons facilement remarquer que lorsqu'on augmente le dopage de la couche I, la tension de circuit ouvert augmente tandis que le courant de court-circuit (I_{CC}) diminuera. La valeur maximale de $I_{CC}=4.60\text{mA}$ est obtenu pour un dopage de 10^{+16} m^{-3} .

III.3.4. Effet de la résistance R_s sur le rendement

Dans cette partie, nous avons fixé la valeur de la résistance parallèle R_p à une valeur constante de (1000Ω) et nous avons autorisé la valeur de la résistance R_s de varier sur une plage de $0-22\Omega$. La figure(III.11) représente l'effet de la résistance R_s sur le rendement de la cellule. Nous remarquons que le rendement de la cellule diminue presque linéairement avec la croissance de la valeur de la résistance série. Le meilleur rendement (**28.55%**) est obtenu pour la valeur $R_s = 1 \Omega$ et l'épaisseur de la couche ($5\mu\text{m}$).

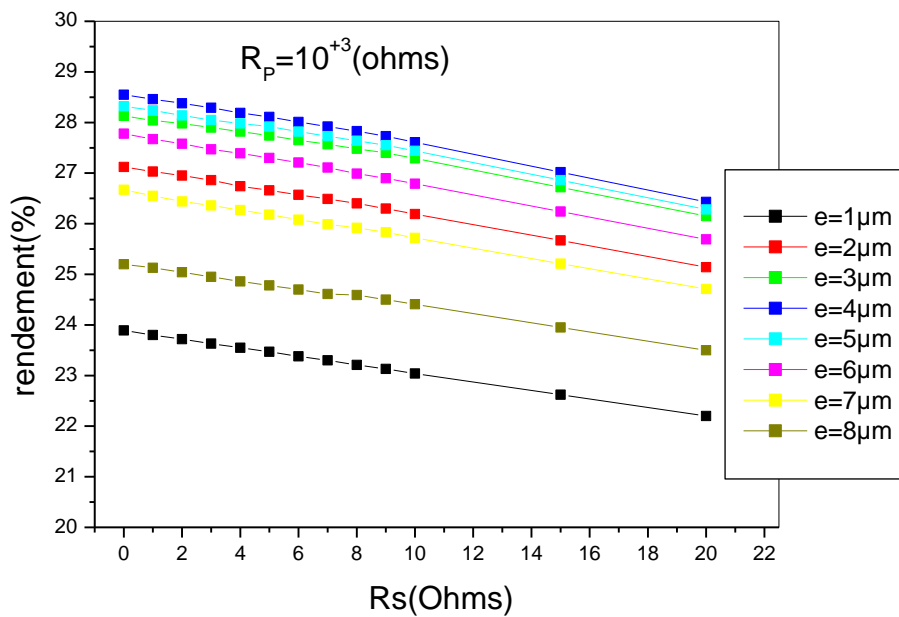


Figure III.11: Effet de la résistance R_s sur le rendement de la cellule PIN.

III.3.5.Effet de la résistance R_p sur le rendement

Dans cette partie, nous allons essayer d'étudier l'effet de la résistance parallèle (R_p) sur les performances de notre cellule type PIN. Tout d'abord, nous avons fixé la valeur de la résistance (R_s) à une valeur constante de 10Ω et nous avons autorisé de résistance R_p de varier sur un intervalle de $10^2\Omega$, $10^7\Omega$. La figure(III.12) représente la variation du rendement de la cellule PIN à base de GaAs en fonction de la valeur de la résistance R_p et l'épaisseur de la couche I. On remarque une augmentation rapide du rendement lorsque la valeur résistance parallèle R_p passe de 100Ω et $10^{+4}\Omega$, tandis qu'une variation moins rapide du rendement est observée lorsque la valeur de R_p est supérieure à $10^{+4}\Omega$. Pour des valeurs de de R_p supérieures à $10^{+4}\Omega$, la valeur du rendement devient presque constante. Une valeur maximale du rendement (34.10%) est obtenue pour une épaisseur de la couche I de $5\mu\text{m}$ et une résistance R_p de l'ordre de $10^{+6}\Omega$.

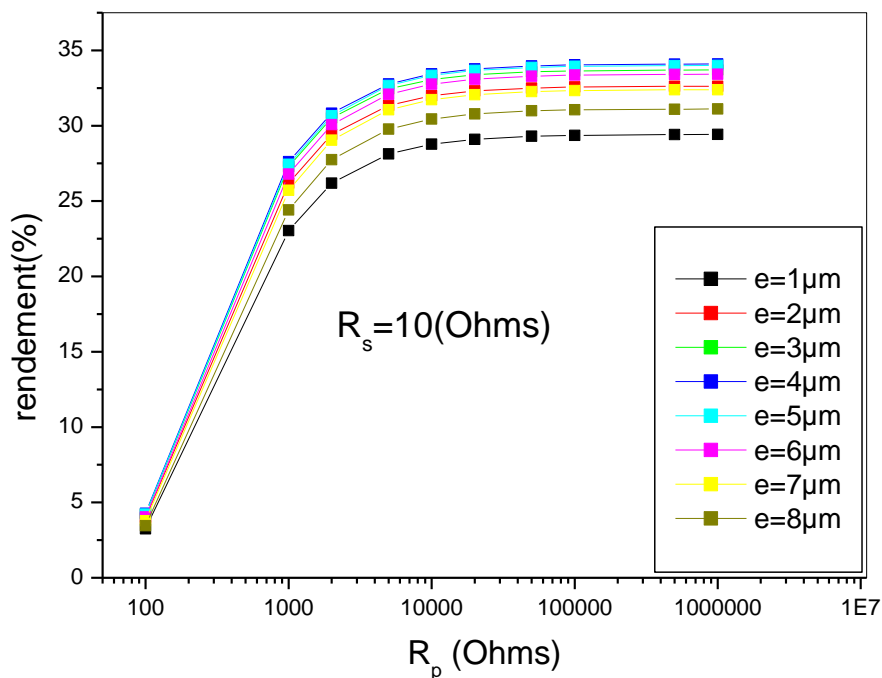


Figure III.12 : La variation du rendement en fonction la résistance R_p .

III.4.Effet de la couche TCO sur le rendement de la cellule de GaAs(PIN)

III.4.1.Les oxydes transparents conducteurs (TCO)

Les matériaux TCO sont des matériaux combinant la conductivité électrique (il s'agit de semi-conducteurs) et la transmittance dans le domaine visible. Ils sont utilisés en tant qu'électrodes transparents dans des dispositifs tels que les cellules solaires, les écrans plats ou écrans tactiles. Actuellement, les meilleurs TCO sont tous de type n alors que les TCO de type p possèdent des propriétés électriques et optiques inférieures [28]. Cela rend difficile la fabrication de jonctions p-n transparentes, qui pourraient ouvrir la voie à l'électronique transparente. En effet, afin d'obtenir une telle jonction, il est nécessaire de disposer d'un matériau de type n et d'un matériau de type p ayant des performances similaires.

III.4.1.1. Le ZnO (oxyde de zinc)

L'oxyde de zinc (ZnO) (il a été découvert en 1971 par M.Matsuoka [29]) est un semiconducteur qui possède une grande application et utilisation dans l'électronique et l'électronique organique grâce à ces propriétés multiples: sa grande conductivité thermique,

sa grande capacité calorifique, sa constante diélectrique moyenne et sa haute résistivité. Il a aussi une large bande interdite de 3.3eV ce qui permet de le classer parmi les semi-conducteurs à large bande interdite. D'autre part, ce matériau peut être facilement déposé en couches minces ou comme nanostructures ce qui permet des utilisations en nanotechnologie.

III.4.1.2. l'oxyde d'indium dopé étain (l'ITO)

L'ITO est un semiconducteur de type n fortement dégénéré à bande interdite directe (gap direct) variant entre 3eV et 4.3 eV selon les auteurs, offrant ainsi une bonne transmission dans le domaine visible du spectre optique. Il est utilisé dans les applications technologiques en raison de ces propriétés optiques et électriques remarquable: la transparence élevée, la bonne conductivité électrique, et la bonne résistance mécanique.

III.4.2. Structure étudiée

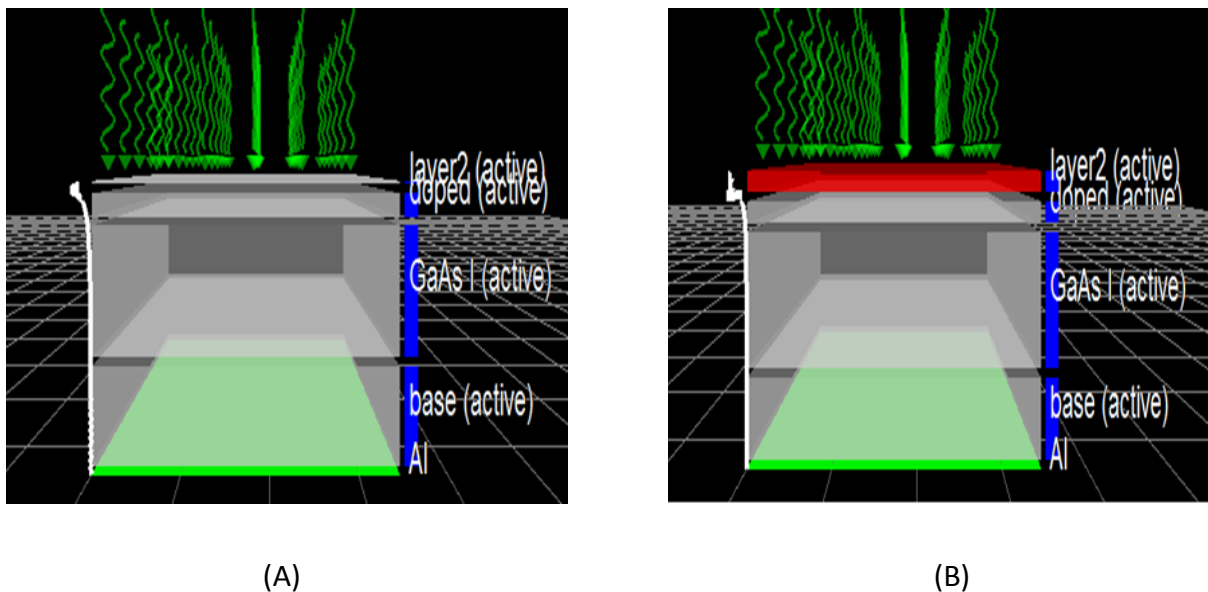


Figure III.13: Structure de la cellule TCO/GaAs(P)/GaAs(I)/GaAs(N). (A) : la couche TCO est une couche de ZnO, (B): la couche TCO est une couche de l'ITO.

Dans cette partie, nous avons considéré le cas d'une cellule solaire de type TCO/PIN ou la couche TCO est en surface avant comme indiquée dans **la figure(III.13)** Deux matériaux TCO (ZnO, ITO) ont été utilisés dans notre cas. La valeur de la résistance R_s est fixée à 10Ω tandis

que la valeur de R_p est $10^{+3}\Omega$. Les tableaux ci-dessous présentent les paramètres de simulation que nous avons utilisés.

Couche	Type de la couche	Epaisseur de la couche (μm)	Dopage (m^{-3})
GaAs (P)	Active	0.7	10^{+21}
GaAs (I)	Active	5	10^{+18}
GaAs (N)	Active	3	10^{+20}

Tableau III.2: Les paramètres décrivant la cellule.

	ZnO	ITO
La mobilité des électrons ($\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$)	2.10^{-02}	$6.862705.10^{-07}$
La mobilité des trous ($\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$)	1.10^{-02}	$3.750624.10^{-02}$
Travail de sortie χ_i (eV)	4.17	3
La densité d'état effective des électrons libres (m^{-3})	$3.72.10^{+24}$	5.10^{+26}
La densité d'état effective des trous libres (m^{-3})	$1.16.10^{+25}$	5.10^{+26}
E_g (eV)	3.37	3.3
Le taux de recombinaison (m^3S^{-1})	10^{-15}	10^{-15}

Tableau III.3 : propriétés électriques des matériaux TCO utilisés dans la cellule TCO/PIN.

III.4.3. Effet de l'épaisseur de la couche TCO sur le rendement

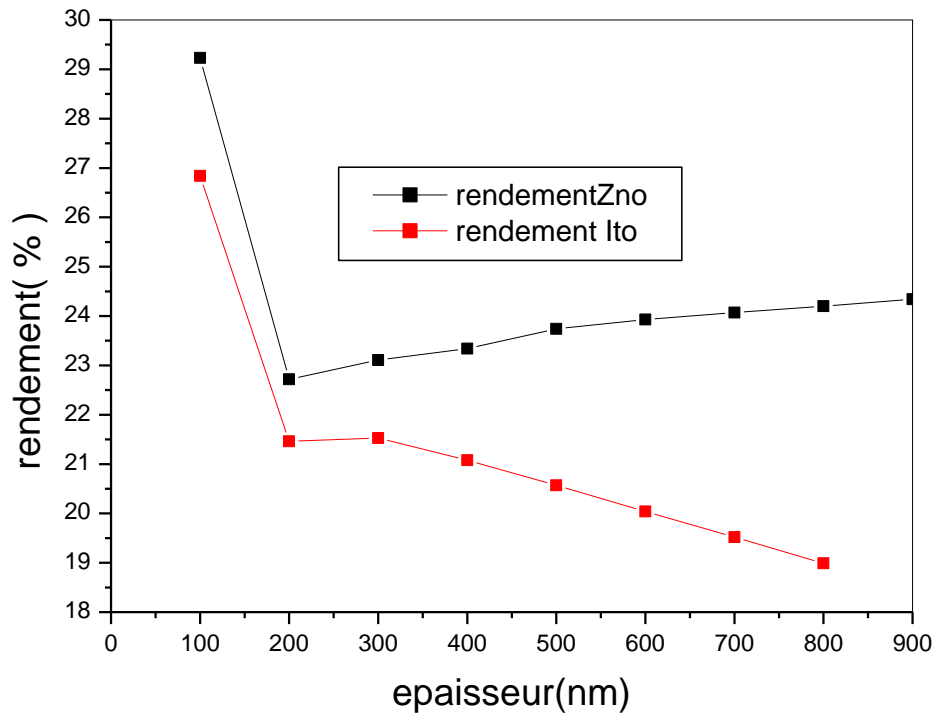


Figure III.14: La variation du rendement de la cellule TCO/PIN en fonction de l'épaisseur de la couche TCO.

La figure(III.14) représente la variation du rendement de la cellule TCO/GaAs(P)/GaAs(I)/GaAs(N) en fonction de l'épaisseur de la couche TCO dans le cas de ZnO et aussi dans le cas d'ITO. Nous pouvons observer facilement que le rendement de la nouvelle cellule dépend fortement de l'épaisseur de la couche TCO et aussi de sa nature (matériau utilisé). Nos résultats montrent que le rendement de la cellule PIN avec une couche active de ZnO est supérieur à celui de la cellule PIN avec une couche ITO. Nous avons constaté que la valeur optimale de la couche TCO est 100nm dans le cas des deux matériaux utilisés (ZnO et ITO), cependant l'allure de variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche TCO n'est pas le même pour les deux matériaux. Dans le cas d'ITO, le rendement de la cellule ITO/PIN diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche ITO. Dans le cas de ZnO, le rendement de la cellule ZnO/PIN diminue lorsque l'épaisseur de la couche ZnO augmente de 100nm à 200nm puis il augmente à nouveau lorsque l'épaisseur dépasse 200nm. Dans le cas de la cellule ITO/PIN, le meilleur rendement est toujours inférieur à **27%** ce qui signifie que l'amélioration par rapport au cas de la cellule PIN est très

faible. Dans le cas de la cellule ZnO/PIN, une valeur du rendement de **29.23 %** est obtenue lorsque l'épaisseur (e) de la couche ZnO est autour de 100 nm. Comparée au cas de la cellule sans couche TCO, cette valeur représente une amélioration de **3%** en rendement. Cela s'explique par l'augmentation de l'absorption dans la couche active. Donc, les couches TCO de faibles épaisseurs auront une transmission optique supérieure à celle de couches plus épaisse. Une couche TCO de faible épaisseur va transmettre le maximum de rayonnement donc réduire la réflexion de TCO.

Pour mieux comprendre l'effet de la couche TCO sur le rendement de la cellule PIN, nous avons calculé les spectres de réflexion et d'absorption des cellules TCO/PIN et les résultats obtenus sont présentés dans les **figures (III.15), (III.16), et (III.17)**.

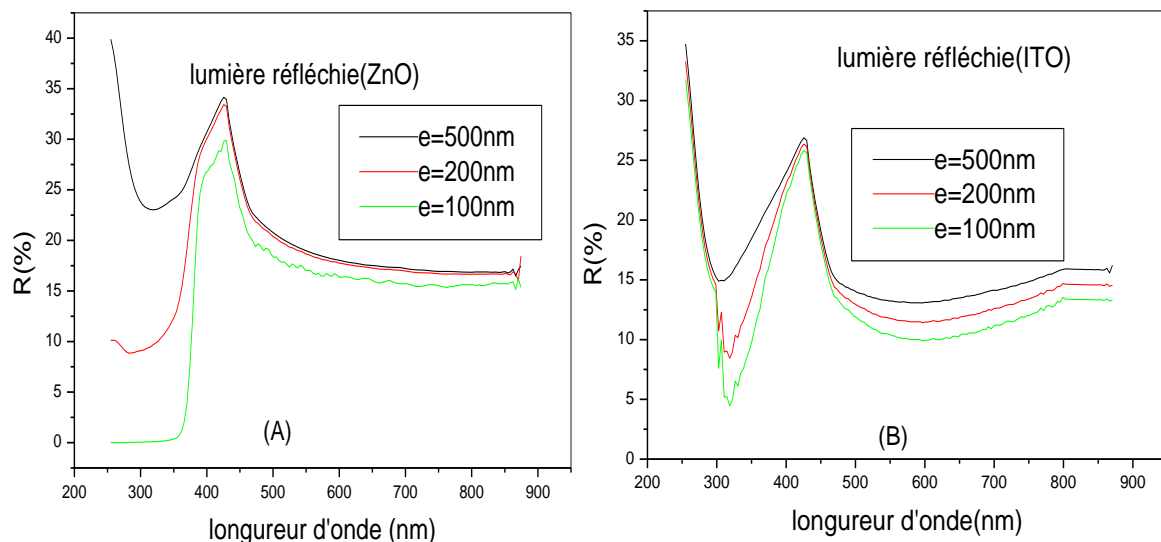


Figure III.15 : Spectre de réflexion optique de la cellule TCO/PIN obtenu pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche TCO : (a) ZnO, et (b) ITO.

La figure(III.15) montre que la réflexion minimale est obtenue pour une épaisseur de la couche TCO égale à 100nm. La diminution de la réflexion optique signifie une augmentation des parties transmis et absorbés. A partir des Figures (III.16) et (III.17), nous pouvons constater une forte absorption de la lumière dans le domaine visible du spectre optique. Cette absorption se produire sur une profondeur de l'ordre de 500 à 600nm.

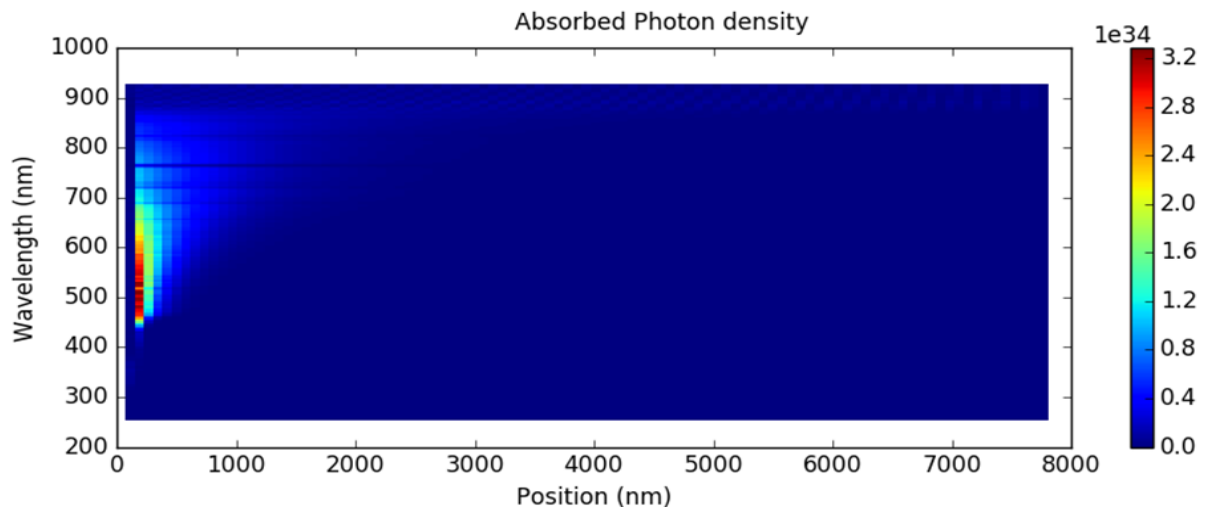


Figure III.16 : absorption de photons par une cellule ZnO/PIN avec couche ZnO d'épaisseur=100nm.

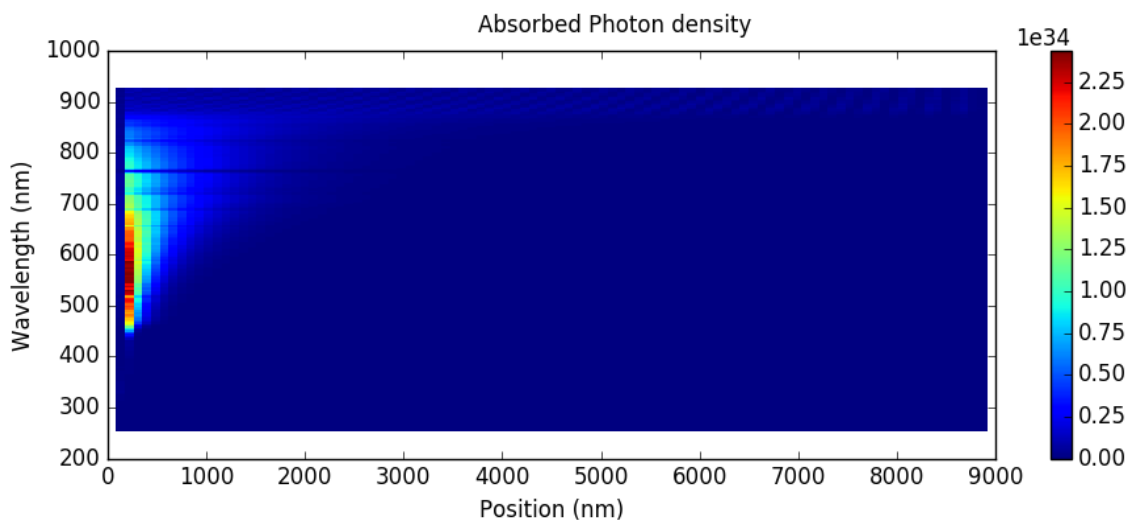


Figure III.17: absorption de photons par une cellule ITO/PIN avec couche ITO d'épaisseur=100nm.

En effet, l'absorption optique à des valeurs de longueur d'ondes est liée directement à la valeur du gap des matériaux semiconducteurs constituant la cellule. Ceci montre donc que ce paramètre a une influence considérable sur les performances des cellules photovoltaïques, car le matériau peut absorber les photons ayant une énergie supérieure ou égale à celui-ci. Cela implique que si nous souhaitons avoir un matériau qui transmette la lumière visible, son gap optique doit être suffisamment large pour empêcher l'absorption des photons visibles les plus énergétiques, c'est-à-dire ayant une longueur d'onde de 400 nm (soit une énergie de 3,1 eV). Dans le cas idéal, le gap optique doit donc être large d'au moins 3,1 eV. S'il est inférieur, la partie la plus énergétique de la lumière sera absorbée. S'il est inférieur à 1,5 eV, alors même la lumière rouge (800 nm) sera absorbée et le matériau sera

opaque. Ce critère est important car les photons suffisamment énergétiques sont fortement absorbés.

D'autre part, l'utilisation d'une couche TCO signifie la formation d'une hétérojonction constituée d'une part de la couche TCO et de l'autre part de la couche GaAs(P). Comme nous savons tous, les propriétés optiques et électroniques des hétérojonctions dépendent des propriétés des semiconducteurs utilisés, en particulier : la valeur du gap (E_g), l'affinité électronique (χ), et le dopage (P ou N).

Les figures (III.18) et (III.19) illustrent les diagrammes de bandes des cellules TCO/PIN. Comme nous pouvons le voir sur ces figures, il y a un changement important par rapport au cas de la cellule PIN.

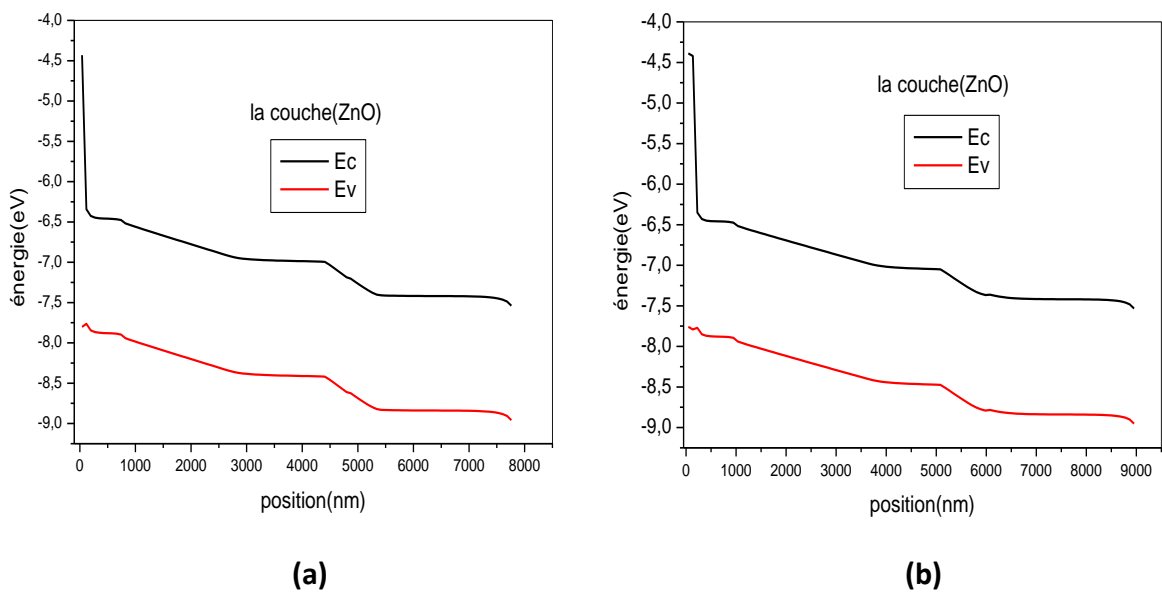


Figure III.18 : Les diagrammes de bandes de la cellule ZnO/PIN: (a) $e=100\text{nm}$ et (b) $e=200\text{nm}$.

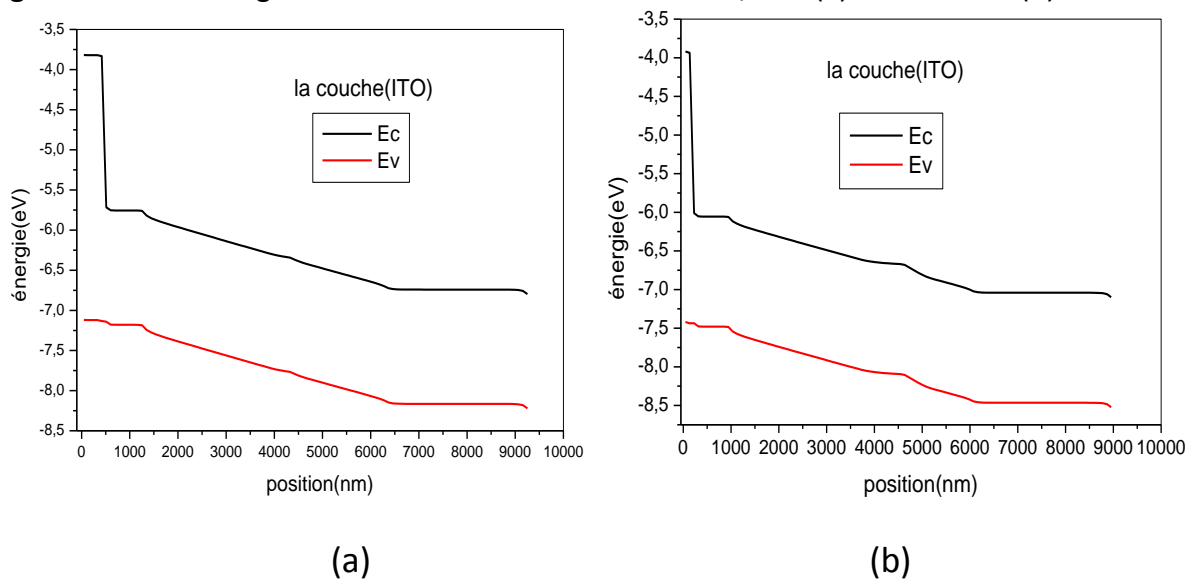


Figure III.19 : Les diagrammes de bandes de la cellule ITO/PIN : (a) $e=100\text{nm}$ et (b) $e=200\text{nm}$.

III.4.4. Caractéristique I(V) pour la cellule ZnO/PIN

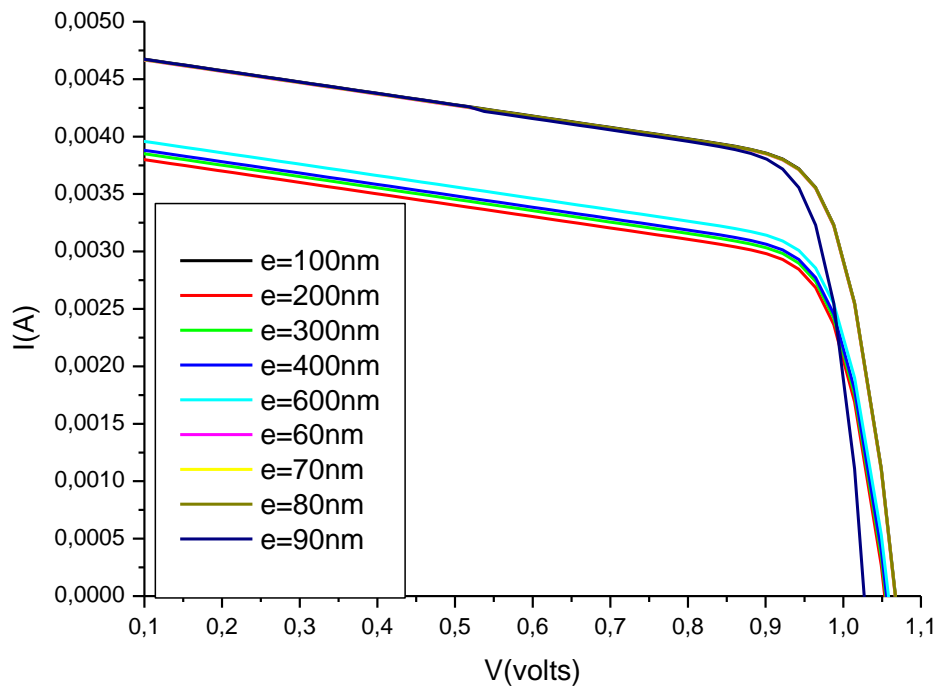


Figure III.20: La caractéristique $I(V)$ de la cellule ZnO/PIN pour différentes épaisseurs de la couche ZnO.

La **figure (III.20)** présente la caractéristique courant-tension de la cellule ZnO/PIN calculée pour différentes épaisseurs de la couche ZnO. Nous constatons que la valeur du courant de court-circuit (I_{CC}) diminue lorsque l'épaisseur E de la couche ZnO augmente. La valeur maximale du courant $I_{cc}=4.74\text{mA}$ est obtenus pour une épaisseur $e=100\text{ nm}$. D'autre part, nous pouvons voir que le changement de l'épaisseur de la couche ZnO. Les valeurs de V_{oc} changent entre 1.04V et 1.07 V.

III.4.5.Effet du dopage sur le rendement la cellule ZnO/PIN

Dans cette partie, on va étudier l'impact du dopage sur les performances de la cellule ZnO/PIN. Pour cela, nous avons varié la concentration des dopants dans la couche ZnO et nous avons calculé à chaque fois le rendement et la caractéristique courant-tension de notre cellule. La figure **(III.21)** montre l'effet du dopage de la couche ZnO sur le rendement de la cellule ZnO/PIN. Comme nous pouvons le voir sur cette figure, un très faible rendement est obtenus pour une concentration des dopants de 10^{16} cm^{-3} . Pour toutes les valeurs de l'épaisseur e de la couche ZnO, la valeur optimale du dopage est 10^{17} cm^{-3} . Si la concentration des dopants dépassera cette valeur optimale, le rendement de notre cellule diminuera.

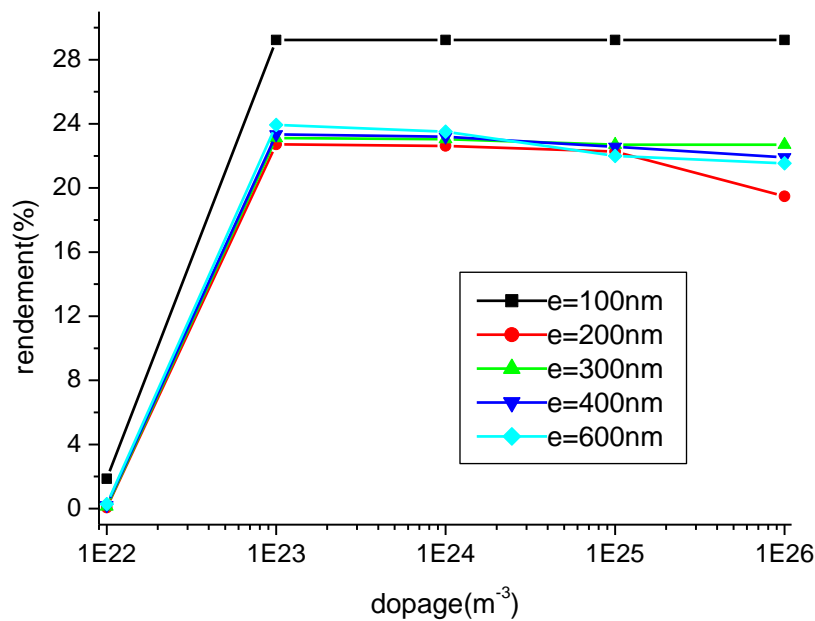


Figure III.21: La variation du rendement de en fonction du dopage de la couche de ZnO.

L'augmentation du rendement observée lorsque la concentration des dopants augmente de 10^{16} cm^{-3} à 10^{17} cm^{-3} peut être expliquée par l'augmentation de la concentration (densité) des porteurs de charges de la couche ZnO. Dans le cas de dopage, ZnO devient dégénéré, le niveau de Fermi est situé dans ce cas à l'intérieur de la bande de conduction (E_c), son comportement est alors quasi métallique [30].

III.4.6. Effet de la résistance R_s sur le rendement de la cellule ZnO/PIN

La figure(III.22) montre La variation du rendement de la cellule à ZnO/PIN en fonction de la résistance série de la cellule et pour différentes épaisseurs de la couche ZnO. Nous remarquons que le rendement de la cellule diminuera presque linéairement avec la croissance de la valeur de la résistance série. Le meilleur rendement (**30.43%**) est obtenu pour une valeur de $R_s = 1 \Omega$ et une épaisseur de la couche ZnO de 100nm.

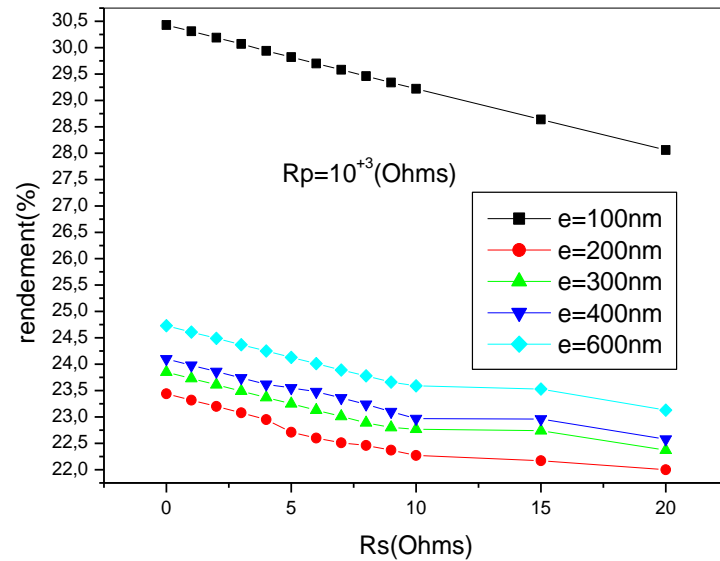


Figure III.22: Effet de la résistance R_s sur le rendement de la cellule ZnO/PIN.

III.4.7. Effet de la résistance R_p sur le rendement de la cellule ZnO/PIN

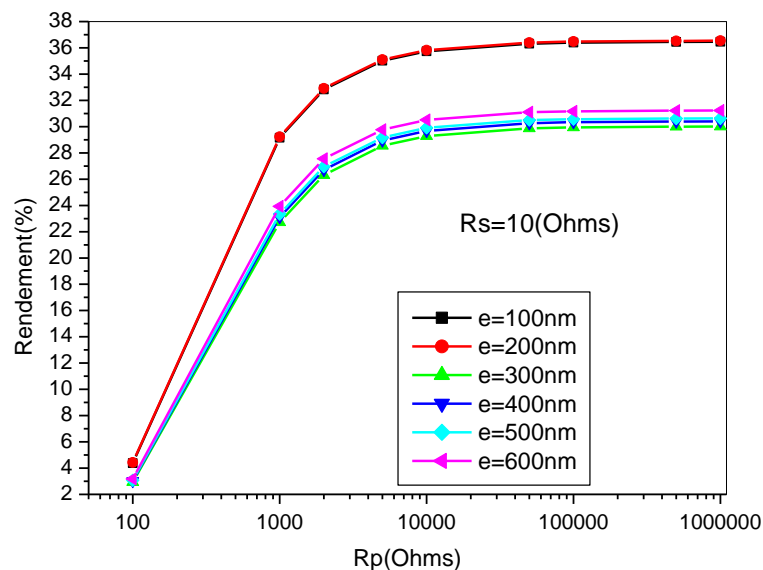


Figure III.23: La variation du rendement en fonction de la résistance R_p .

La figure(III.23) présente la variation du rendement en fonction de la valeur de R_p et pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche (ZnO). On remarque une augmentation rapide du rendement lorsque la valeur résistance parallèle R_p passe de $10^2 \Omega$ et $10^4 \Omega$, tandis qu'une variation moins rapide du rendement est observée lorsque la valeur de R_p dépasse la

valeur $10^{+4} \Omega$. Une valeur maximale du rendement de **36.54%** est obtenue une épaisseur de 100nm de la couche (ZnO) et une résistance $R_p = 10^{+6} \Omega$. Une valeur aussi très proche de cette valeur maximale est obtenue pour une épaisseur de 100nm de la couche(ZnO). Notons ici que La présence de tout courant de fuite causé par les recombinaisons et les défauts dans la cellule est traduite par la résistance parallèle (R_p). Donc, celle-ci doit être idéalement la plus élevée possible (dans le cas idéal, $R_p = \infty$).

III.5.Effet du dopage sur le rendement la cellule ITO/PIN

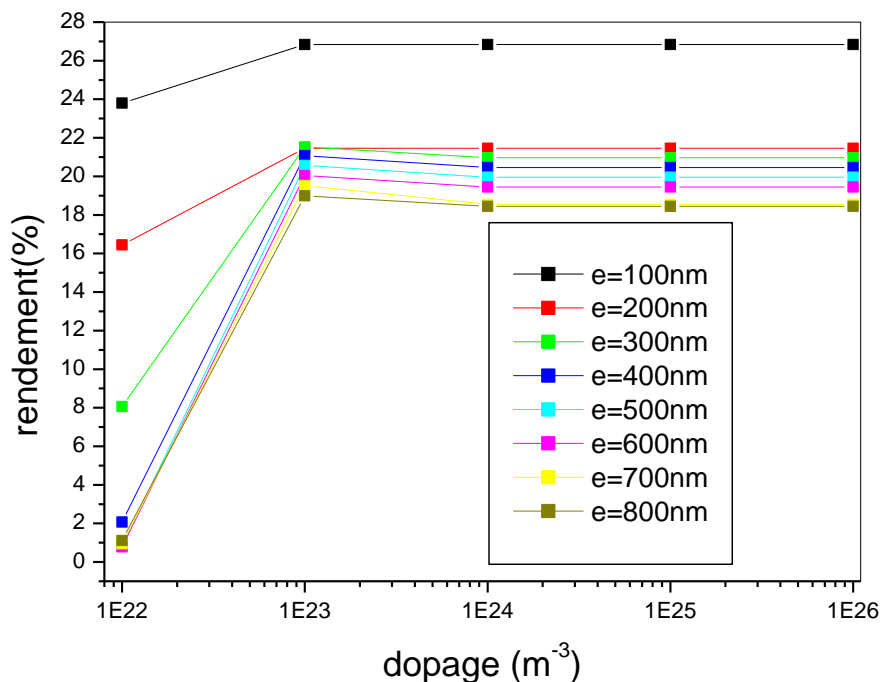


Figure III.24: La variation du rendement de la cellule ITO/PIN en fonction du dopage de la couche ITO.

Comme dans le cas de la cellule ZnO/PIN, nous avons autorisé la concentration des dopants dans la couche ITO de varier de 10^{16}cm^{-3} à 10^{20}cm^{-3} et nous avons calculé le rendement de la cellule ITO/PIN. Nous avons répété cette opération pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche ITO et les résultats obtenus sont présentés sur **la figure (III.24)**. Comme nous pouvons le voir sur cette figure, un très faible rendement est obtenu pour une concentration des dopants de 10^{16}cm^{-3} dans le cas des cellules contenant une couche ITO d'épaisseur supérieure à 200nm. Pour tous les valeurs de l'épaisseur e de la couche ZnO, la

valeur optimale du dopage est 10^{17} cm^{-3} . Si la concentration des dopants dépassera cette valeur optimale, le rendement de notre cellule devient presque constant.

III.6. La caractéristique I(V) de la cellule ITO/PIN

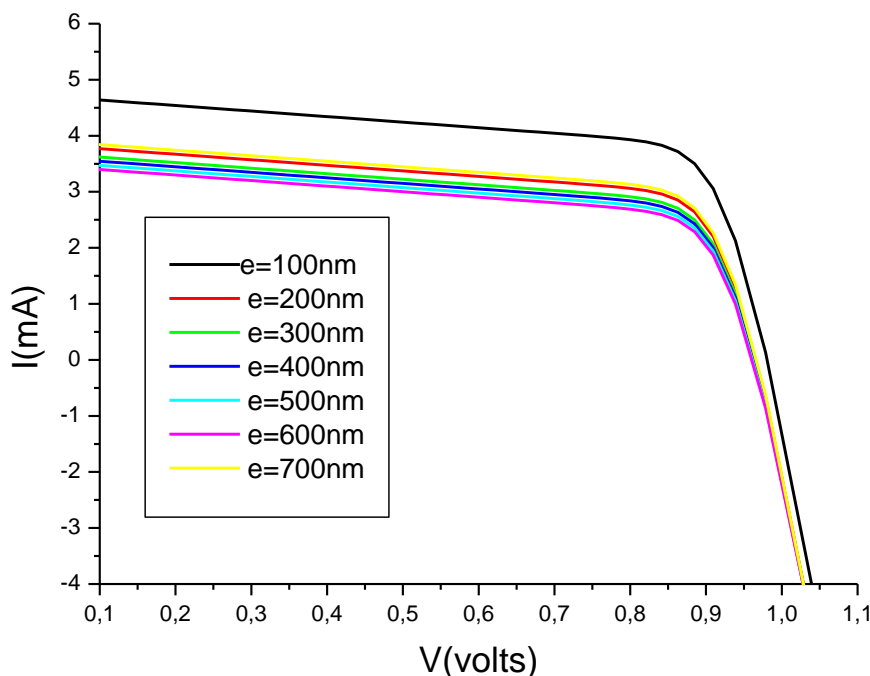


Figure III.25: La caractéristique I(V) de la cellule ITO/PIN pour différentes épaisseurs d'ITO.

La figure III.25 montre la caractéristique courant-tension de la cellule ITO/PIN obtenue pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche ITO. Comme nous pouvons le voir sur cette figure, le courant de court-circuit (I_{cc}) de la cellule ITO/PIN diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche ITO. La même remarque est valide aussi pour la tension V_{oc} . Une valeur optimale de $I_{cc} = 3.95 \text{ mA}$ est obtenue pour une épaisseur optimale de la couche ITO égale à 100nm. D'autre part, si nous comparons ces résultats avec ceux de la cellule ZnO/PIN, nous pouvons constater que la valeur optimale de I_{cc} dans le cas de ZnO est supérieure que celle d'ITO. Ceci peut être expliqué par le fait que la mobilité des électrons dans le cas de ZnO est supérieure à celle d'ITO.

III.7. l'effet R_s sur le rendement de la cellule ITO/PIN

La figure (III.26) présente la variation du rendement en fonction de la valeur de R_s et pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche ITO. Pour épaisseur donnée de la couche ITO, nous remarquons que le rendement de la cellule diminue linéairement avec l'augmentation de la valeur de la résistance série R_s . Le meilleur rendement (**28.07%**) est obtenu pour une valeur de R_s de 1Ω et une épaisseur de la couche ITO de 100nm.

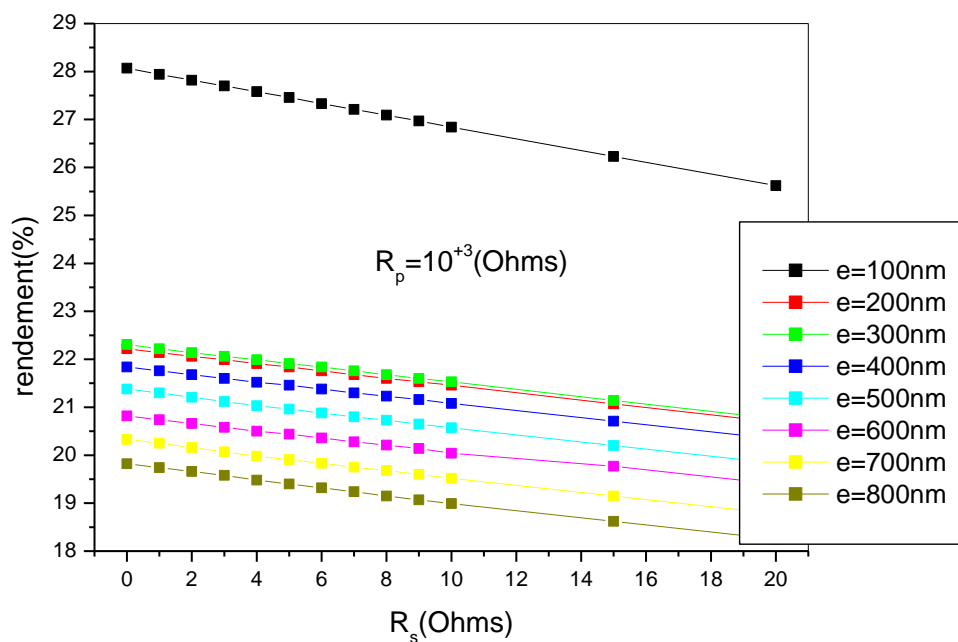


Figure III.26: variation du rendement en fonction de R_s .

III.8. l'effet R_p sur le rendement de la cellule ITO/PIN

La figure(III.27) montre la variation du rendement de la cellule ITO/PIN en fonction de la valeur de résistance R_p et pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche ITO. On remarque une augmentation rapide du rendement lorsque la valeur résistance parallèle R_p passe de $10^2 \Omega$ à $5 \cdot 10^3 \Omega$, tandis que la variation moins rapide du rendement lorsque la valeur de R_p est supérieure à $5 \cdot 10^3 \Omega$. Une valeur maximale du rendement égale à 32.84% est obtenu pour une épaisseur de la couche (ITO) égale à 100nm et une résistance $R_p = 10^6 \Omega$.

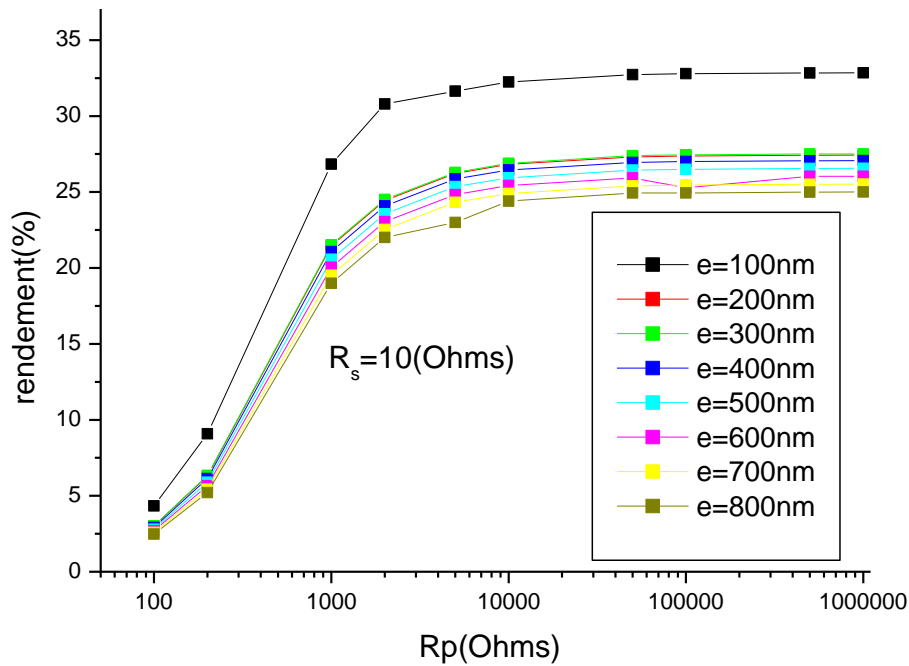


Figure III.27: La variation de rendement en fonction la résistance R_p de (ITO).

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des simulations des cellules solaires à base de GaAs. Nous avons étudié deux types de structures ; le premier type est celui des cellules à base de GaAs(PIN), Le deuxième est celui des cellules (PIN) avec une couche de TCO (ZnO et ITO). Nous avons étudié l'influence des paramètres de la cellule solaire tels que ; le dopage, les valeurs de la résistance série R_s et de la résistance parallèle R_p , L'épaisseur de la couche I, et l'épaisseur de la couche TCO (ZnO et ITO) sur les performances de ces cellules. En premier temps, nous avons comparé les performances des cellules PN et PIN à base de GaAs. Nos résultats montrent que le rendement de la cellule PIN est meilleur que celui de la cellule PN. Par la suite nous avons étudié l'influence de l'utilisation d'une couche TCO sur les performances de la cellule PIN. Nous avons constaté que l'utilisation d'une couche TCO améliore le rendement de la cellule PIN. Nos résultats montrent que les performances de la cellule ZnO/PIN sont supérieures que ceux de la cellule ITO/PIN.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons étudié par simulation numérique les propriétés de trois types de cellules solaires : GaAs(PIN), ZnO/GaAs(PIN) et ITO/GaAs(PIN) en utilisant le logiciel GPVDM (Général-Propose Photovoltaic Device Model). L'objectif était d'étudier l'effet de la nature, de l'épaisseur, et du dopage d'une couche TCO sur les performances d'une cellule PV de type PIN à base du GaAs. Cette étude nous a permis de faire une comparaison entre le rendement des trois cellules. L'oxyde de zinc (ZnO) et l'ITO ont été utilisés comme électrodes transparentes dans les cellules solaires pour leur bonne conductivité électrique combinée à une transparence élevée. Nous avons constaté que la cellule avec le rendement le plus élevé est la cellule solaire ZnO/GaAs(PIN). D'autre part, nos résultats montrent que le rendement des cellules TCO/GaAs(PIN) est très sensible à l'épaisseur de la couche TCO. Le meilleur rendement de ces cellules a été obtenu pour une couche TCO d'épaisseur de 100 nm. L'effet du dopage de la couche TCO sur les performances de nos cellules a été étudié en détail et les résultats obtenus montrent que le rendement de ces cellules restera presque constant pour un dopage supérieur à 10^{17} cm^{-3} , cependant si la concentration des dopants est inférieure à cette valeur, le rendement diminue d'une manière dramatique. Nous avons aussi étudié l'effet des résistances R_S et R_P sur le rendement de nos cellules et les résultats obtenus montrent que le rendement de nos cellules diminue d'une manière presque linéaire avec l'augmentation de la valeur de R_S . Contrairement au cas de R_S , le rendement de nos cellules augmente avec l'augmentation de la valeur R_P .

Références

Référence

- [1] G, Gomard. Cristaux photoniques pour le contrôle de l'absorption dans les cellules solaires photovoltaïques silicium ultramince. Thèse de Doctorat. Université de Lyon. 2012
- [2] S.Quoizola, Epitaxie en phase valeur de silicium sur silicium me soporeux pour report sur Substrats économiques et application photovoltaïque bas cout, Thèse de doctorat, Ecole Doctorale: Electronique, Electrotechnique et Automatisme, L'institut National des Sciences appliquées de Lyon, N d'ordre :(03ISAL0078). 2003
- [3] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUN OD, Paris, 2006.
- [4] Alonso Corinne « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.
- [5] Thomas Mambrini, Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies .THÈSE DE DOCTORAT. Laboratoire de Génie Electrique de Paris .soutenue le 16/12/2014.
- [6] M, Urien. Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible Thèse de Doctorat. Université de Bordeaux 1.2008
- [7] Rémy Mosseri , Catherine Jeandel , "L'énergie à découvert", CNRS Editions, Paris, 2013
- [8] Pierre Destruel ; Les cellules photovoltaïques organiques ; Article Université de Toulouse III ; <http://www.refletsdelaphysique.fr> ou <http://dx.doi.org/10.1051/refdp/2007064>; 2007.
- [9] M. V, Energie solaire photovoltaïque, 2ème édition, DUNOD Paris, 2005
- [10] A. Ricaud , Photopiles solaires, 1ère édition, presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne
- [11] Nandita Palit "Amorphous Silicon based Solar Cells: Experimental Characterisation and Computer Modelling" Thèse de doctorat- Jadavpur University-India
- [12] Jérôme Garnier ; Elaboration de couches minces d'oxydes transparents et conducteurs par spray cvd assiste par radiation infrarouge pour applications photovoltaïques ; Arts et Métiers ParisTech ; <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005629>; 2010
- [13] M. Petibon Stéphane « nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009
- [14]R. KHLIL, Étude d'un gaz bidimensionnel d'électrons dans des hétérostructures AlGaAs/GaAs par des mesures courant-tension et bruit basses fréquences en température", Thèse Docteur, Université de Reims Champagne-Ardenne. 2005.
- [15]Henry Mathieu,Herve Fenet,pfysique des semiconducteurs et des composants électroniques ,6ème edition,DUNOD ,Paris,2009
- [16]<https://www.zonetronic.com>;13.05.2021;14:30.

Références

- [17] A. Birane «Caractérisation et tri de cellules solaires par leur temps de recouvrement inverse » Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2005.
- [18] G. N. Tiwari, S. Dubey, Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their applications, Cambridge, 2010
- [19] A. Sellai, Z. Ouennoughi, « extraction of illuminated solar cell and Schottky diode parameters using a genetic algorithm » International Journal of Modern Physics Vol. 16, No. 7(2005) 1043-1050
- [20] A. BENYOUCEF, Développement de Surfaces à Base de Dioxyde de Titane par PVD pour une Application aux Cellules Solaires”, Thèse Doctorat, Université Abou Bakr Belkid- Tlemcen. 2008
- [21] B. Equer, Energie Solaire Photovoltaïque, Ellipses, Paris, 1993
- [22] Alain Ricaud « Photopiles solaires » de la physique de la conversion photovoltaïque aux Filières, matériaux et procédés, première édition ISBN 2-88074-326-5, 1997
- [23] Nichiporuk Oleksiy, Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, Thèse de doctorat, Lyon, 2005
- [24] M. Grundmann, The Physics of Semi-conductors”, Book, Université Leipzig, ©Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
- [25] S. Daniel, Modeling radiation effect on a triple junction solar cell using silvaco atlas”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012
- [26] Kerr M. J, Surface, emitter and bulk recombination in silicon and development of silicon nitride passivated solar cells, Thèse de Doctorat, Australian National University, 2002
- [27] Mathieu. H, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, 2ème Edition, Masson.
- [28] Laurent BERGEROT, « Etude de l'élaboration d'oxyde transparent conducteur de type-p en couches minces pour des applications à l'électronique transparente ou au photovoltaïque. », Thèse de Doctorat, L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE. soutenue le « 28/01/2015.
- [29] M. Matsuoka, Japanese Journal of Applied Physics, 10 (1971), 736-746.
- [30] L. Gupta, A. Mansingh and P. K. Srivastava, Thin Solid Films, 176, 33.

Résumé

Dans ce mémoire, nous avons étudié par simulation numérique les performances des cellules solaires à base de GaAs. En premier temps, nous avons considéré deux types de cellules solaires ; l'une de type PN et l'autre est de type PIN. Nous avons analysé l'influence de l'épaisseur de la couche P, du dopage, ainsi que celle des résistances série et parallèle sur les performances de ces cellules solaires. Nos résultats montrent que le rendement de la structure PIN est meilleur que celui de la structure type PN. Par la suite, nous avons étudié l'effet de l'addition d'une couche TCO sur les performances de la cellule PIN. Pour réaliser cette objective, deux types de matériaux TCO ont été utilisés ; ZnO et ITO. Les résultats obtenus montrent que les cellules PIN avec une couche TCO peuvent avoir un rendement théorique mieux qu'une cellule PIN simple à base de GaAs. D'autre part, nos résultats montrent que le rendement des cellules ZnO/GaAs(PIN) est meilleur que celui des cellules ITO/GaAs(PIN). Nous avons trouvé également que le rendement de ces cellules est sensible à l'épaisseur de la couche TCO. La valeur optimale de l'épaisseur de la couche TCO est 100nm.

Mots clés: Cellule photovoltaïque, GaAs, TCO, PIN.

Abstract

In this work, we studied the performance of GaAs-based solar cells by numerical simulation. First, we considered two types of solar cells; one is PN type and the other is PIN type. We have analyzed the influence of P layer thickness, doping, as well as that of series and parallel resistors on the performance of these solar cells. Our results show that the efficiency of the PIN structure is better than that of the PN type structure. We then studied the effect of the addition of a TCO layer on the performance of the PIN cell. To achieve this objective, two types of TCO materials were used; ZnO and ITO. The results obtained show that the performances of the TCO/GaAs(PIN) cells are better than those of a simple GaAs-based PIN cell. On the other hand, our results show that the efficiency of ZnO/GaAs(PIN) cell is higher than that of the ITO/GaAs(PIN) cell. We have also found that the performance of these cells is sensitive to the thickness of the TCO layer. The optimum value for the thickness of the TCO layer is 100nm.

Key words: photovoltaic cell, GaAs, TCO, PIN.

ملخص

في هذه المذكرة قمنا بدراسة أداء و خصائص الخلايا الشمسية المصنوعة من مادة GaAs عن طريق المحاكاة الرقمية. أولاً، درسنا نوعين من الخلايا الشمسية؛ أحدهما من نوع PN والآخر من النوع PIN. لقد قمنا بدراسة تأثير سمك الطبقة P، تركيز الشوائب، وكذلك تأثير المقاومات التسلسلية والمتوازية على أداء هذه الخلايا الشمسية. تظهر نتائجنا أن مردود الخلية PIN أفضل مردود الخلية PN. ثانياً قمنا بدراسة تأثير إضافة طبقة TCO على أداء الخلية PIN. لتحقيق هذا الهدف، تم استخدام نوعين من مواد TCO: ZnO و ITO. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن خلايا PIN مع طبقة TCO يمكن أن يكون لها مردود نظري أفضل من خلية PIN البسيطة. من ناحية أخرى، تُظهر نتائجنا أن مردود خلايا ZnO/GaAs أفضل من مردود خلايا ITO/GaAs. لقد وجدنا أيضاً أن مردود هذه الخلايا حساس لسمك طبقة TCO وأن القيمة المثلى لسمك طبقة TCO هي 100 نانومتر.

الكلمات المفتاحية: الخلية الكهروضوئية، GaAs، TCO، PIN.