

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

Université Abderrahmane Mira

Faculté de la Technologie



Département d'Automatique Télécommunication d'Électronique

Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière: Électronique

Spécialité: Instrumentation

Thème

Étude et simulation numérique d'une cellule solaire à base des
semi-conducteurs III-N

Préparé par :

LAZARI Rima

SALHI Assia

Dirigé par :

Mme. IDJDARENE

M. LAHRECHE

Examiné par:

M. BERRAH

M. KESSI

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude envers Allah pour nous avoir donné la force, la persévérance et la sagesse nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous voudrions adresser des remerciements spéciaux à notre encadrante, Mme Souad IDJDARENE, dont l'expertise, la patience et les conseils avisés ont été inestimables pour l'aboutissement de ce mémoire. Ses éclairages ont éclairé notre route tout au long de ce processus.

Nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance envers les membres du jury, pour leur précieux temps et le grande honneur d'évaluer ce travail.

Un grand merci à notre co-encadrant, M Aberrezak LAHRECHE, pour votre précieuse contribution à notre mémoire de master. Votre expertise et votre dévouement ont été essentiels à notre réussite académique.

Un sincère merci à nos parents, notre famille et nos proches pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et leur confiance en nous. Leur présence a été notre source d'inspiration. Nous n'oublions pas de remercier chaleureusement nos collègues et amis qui nous ont apporté leur aide et leurs encouragements tout au long de ce parcours. Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude envers toute personne qui, de près ou de loin, a contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Je tiens à dédier humblement ce travail à des personnes très chères à mon cœur.

Mes parents en particulier, qui ont eu la bienveillance de me transmettre une éducation empreinte de sagesse et de clarté de vision.

À mes sœurs kenza, et Lilia.

À mes frères Favez et Nadjim

À mon grand-père et ma grand-mère.

À ma chère binôme Assia.

À mon chère ami Mohamed qui a contribué à la conception de ce mémoire.

À mes copines Sabrina, Lynda, Kahina, Lina, Wissam et toutes les autres.

À tout mes camarades.

À moi.

Rima

Dédicace

Je tiens à dédier humblement ce travail à des personnes très chères à mon cœur
À celle qui m'a donné la vie, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, ma
mère...

À mon père, qui a été mon nombre durant toute les années d'études qui a veillé à me
donner l'aide, à m'encourager et à me protéger

À ma sœur Sarah, Sabrina, Wafa et leurs maris.

À mes frères Syphax et Aimen.

À mes neveux Massinasse, Koussay et Firas.

À mes nièces Sidra et Noursine.

À mes tantes et mes oncles et tantes.

À ma chère binôme Rima.

À mes meilleures copines Mouna et Naima.

À tout mes amis et collègues.

À moi.

Assia

Table des matières

Introduction général	1
Chapitre I Généralités sur les cellules photovoltaïques	2
I.1 Introduction	2
I.2 Source de l'énergie photovoltaïque	2
I.2.1 Spectre solaire	2
I.2.2 Notion de l'air masse	3
I.3 Effet photovoltaïque	4
I.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	4
I.4.1 Absorption des photons	5
I.4.2 Création paires électrons/trous	5
I.4.3 Collecte des porteurs de charges	6
I.5 Structure d'une cellule photovoltaïque	6
I.5.1 Texturation de la surface	6
I.5.2 Couche antireflet	6
I.5.3 Couche de champ arrière (BSF)	7
I.5.4 Contacts face avant et arrière	7
I.6 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque	7
I.7 Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire	8
I.7.1 Courant de court-circuit, I_{cc}	9
I.7.2 Tension à circuit ouvert, V_{co}	9
I.7.3 Puissance maximale, P_{max}	9
I.7.4 Facteur de forme, FF	10
I.7.5 Rendement de conversion, η	10
I.7.6 Réponse spectrale d'une cellule solaire	10
I.7.7 Rendement quantique externe et interne	10
I.8 Différentes générations des cellules photovoltaïques	11
I.8.1 Cellule solaire de première génération	11
I.8.2 Cellules solaires de deuxième générations	11
I.8.3 Cellules solaires de troisième générations	12
I.9 Cellules solaire à base de InGaN	12

Table des matières

I.9.1 Cellule homo-jonction	13
I.9.2 Cellule hétérojonction	14
I.9.3 Cellule multijonction	15
I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	16
I.10.1 Avantages	16
I.10.2 Inconvénients	16
I.11 Conclusion	17
Chapitre II Notions générales sur les matériaux semi-conducteurs III-V	18
II.1 Introduction	18
II.2 Définition des semi-conducteurs III-V	18
II.3 Différents composés des semi-conducteur III-V	19
II.3.1 composés binaires	19
II.3.2 composés ternaires	19
II.4 Semi-conducteur intrinsèque	19
II.5 Semi-conducteur extrinsèque	19
II.6 Dopage des semi-conducteurs	20
II.6.1 Dopage type N	20
II.6.2 Dopage type p	20
II.7 Description de nitrure de gallium-indium(InGaN)	21
II.8 Propriétés structurales de l'InGaN	21
II.9 Gap d'énergie bande interdite des nitrures	22
II.9.1 Gap d'énergie interdite des nitrures	22
II.9.1.1 Évolution du gap d'énergie dans InGaN	23
II.9.1.2 Évolution du gap d'énergie interdite en fonction de la température	24
II.9.2 Affinité électronique	25
II.9.3 Masses des électrons et des trous	25
II.9.4 Mobilité des porteurs dans les nitrures	25
II.9.5 Longueur de diffusion	26
II.10 Propriétés optiques	27

Table des matières

II.10.1 Indice de refraction	27
II.10.2 Coefficient d'absorption	28
II.10.3 Permittivité relative	29
II.11 Phénomènes de génération et de recombinaison	29
II.12 Mécanisme de recombinaison	30
II.12.1 Recombinaison shockey-read-hall	31
II.12.2 Recombinaison radiative (bande à bande)	31
II.12.3 Recombinaison Auger	31
II.13 Équation fondamentales dans les semi-conducteurs	32
II.13.1 Équation de poisson	32
II.13.2 Équation de continuité	32
II.13.3 Équation de transport	33
II.14 Conclusion	34
Chapitre III Simulation et interprétation des résultats	35
III.1 Introduction	35
III.2 Présentation du logiciel SCAPS-1d	35
III.2.1 Fonctionnement du logiciel	35
III.2.2 Édition de la structure d'une cellule solaire	36
III.2.3 Propriétés des contacts	37
III.2.4 Couches	37
III.3 Résultats de la simulation	38
III.3.1 Cellule $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{InN}$	39
III.3.1.1 Effet du gap de la couche $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ sur le rendement de la cellule	39
III.3.1.2 Effet de l'épaisseur de la couche $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$ sur le rendement de la cellule	41
III.3.1.3 Effet du dopage de la couche $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$ sur le rendement de la cellule	42
III.3.1.4 Effet l'épaisseur de la couche InN sur le rendement de la cellule	43
III.3.1.5 Effet du dopage de la couche InN sur le rendement de la cellule	44

Table des matières

III.3.2 Cellule $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$	46
III.3.2.1 Effet du gap de la couche $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ sur le rendement de la cellule	46
III.3.2.2 Effet de l'épaisseur de la couche $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$ sur le rendement de la cellule	47
III.3.2.3 Effet du dopage de la couche $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$ sur le rendement de la cellule	48
III.3.2.4 Effet de l'épaisseur de la couche GaN sur le rendement de la cellule	50
III.3.2.5 Effet de dopage de la couche GaN sur le rendement de la cellule	51
III.3.3 Cellules optimisés de $(\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N} / \text{InN})$ et $(\text{GaN}/\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N})$	52
III.3.3.1 La caractéristique courant-tension de la cellule optimisé $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N} / \text{InN}$	52
III.3.3.2 La caractéristique courant-tension de la cellule optimisé $\text{GaN}/\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$	53
III.4 Conclusion	54
Conclusion générale	55
Référence	57
Résumé	60
Abstract	60

Liste des figures

Figure I.1 Répartition spectrale du rayonnement solaire	3
Figure I.2 Définition de l'air masse	4
Figure I.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	5
Figure I.4 Constituants de base d'une cellule photovoltaïque	6
Figure I.5 Schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque	7
Figure I.6 Caractéristiques I (V) d'une cellule PV dans l'obscurité et sous illumination	8
Figure I.7 Cellule solaire pin homo-jonction proposée par Islam et al	13
Figure I.8 Schéma de la cellule solaire PIN proposée par Cai et al	14
Figure I.9 Schéma de la cellule solaire pin en double hétérojonction proposée par Jani et al	14
Figure I.10 Schéma de la structure de cellule solaire à puits quantiques InGaN/GaN étudiée par Liu et al	15
Figure I.11 Schéma de la cellule solaire à double-jonction simulée par Zhang et al	15
Figure II.1 Tableau périodique	18
Figure II.2 Silicium dopé au Phosphore	20
Figure II.3 Silicium dopé au Bore	21
Figure II.4 Structures cristallines du GaN	22
Figure II.5 Diagramme de bandes d'énergies pour les matériaux semi-conducteurs.....	23
Figure II.6 Gap d'énergie d'InGaN en fonction de la variation d'indium à T=300°K	24
Figure II.7 Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan	28
Figure II.8 Différentes types de recombinaisons	31
Figure III.1 fenêtre d'exécution du logiciel SCAPS-1D.....	36
Figure III.2 Interface de la définition des couche des la cellule	37
Figure III.3 Définition des paramètres des couches de la cellule.....	38
Figure III.4 Structures des cellules PN.....	39
Figure III.5 Effet de la variation du gap de la couche InGaN sur les paramètres	

Liste des figures

(J_{sc}, V_{oc}, FF, η) de la cellule.	41
Figure III.6 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche InGaN sur les paramètres (J_{sc}, V_{oc}, FF, η) de la cellule.	42
Figure III.7 Effet de la variation du gap de la couche InGaN sur les paramètres (J_{sc}, V_{oc}, FF, η) de la cellule.	43
Figure III.8 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche InN sur les paramètres (J_{sc}, V_{oc}, FF, η) de la cellule.	44
Figure III.9 Effet de la variation du gap InN sur les paramètres (J_{sc}, V_{oc}, FF, η) de la cellule.	45
Figure III.10 Effet de la variation du gap InGaN sur les paramètres (J_{sc}, V_{oc}, FF, η) de la cellule.	47
Figure III.11 Effet de la variation de l'épaisseur $In_{0.66}Ga_{0.34}N$ sur les paramètres (J_{sc}, V_{oc}, FF, η) de la cellule.	48
Figure III.12 Effet de la variation du dopage InGaN sur les paramètres (J_{sc}, V_{oc}, FF, η) de la cellule.	49
Figure III.13 Effet de la variation de l'épaisseur GaN sur les paramètres (J_{sc}, V_{oc}, FF, η) de la cellule.	50
Figure III.14 Effet de la variation du dopage GaN sur les paramètres (J_{sc}, V_{oc}, FF, η) de la cellule.	51
Figure III.15 La caractéristique courant-tension de la cellule $In_{0.8}Ga_{0.2}N/InN$.	52
Figure III.16 La caractéristique courant-tension de la cellule $GaN/In_{0.66}Ga_{0.34}N$.	53

Table des tableaux

Tableau II.1 Paramètres structuraux pour le GaN et l'InN	21
Tableau II.2 Les paramètres de l'équation de Varshni	24
Tableau II.3 Les propriétés électriques du GaN et InN à 300K	27
Tableau III.1 Signification des blocs de logiciel SCAPS-1D.	36
Tableau III.2 Paramètres utilisé pour la simulation de la cellule $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}/\text{InN}$ 40	
Tableau III.3 Paramètres utilisé pour la simulation de la cellule $\text{GaN}/\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$ 46	
Tableau III.4 Paramètres caractéristiques de la cellule optimisé $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}/\text{InN}$ 52	
Tableau III.5 Paramètres caractéristiques de la cellule optimisé $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}/\text{InN}$	53

Abbréviations

Liste des abréviations

Abbréviations	Définitions
AM	Air Mass
BSF	Back Surface Field
Eg	Gap énergie interdit
EQE	Rendement quantique externe
FF	Facteur de forme
Icc	Courant de court-circuit
Iph	Photo-courant
IQE	Rendement quantique interne
IR	Infra Rouge
NA	Concentration des accepteurs
NC	Densité d'états effective de la bande de conduction
ND	Concentration des donneurs
NV	Densité d'états effective de la bande de valence
PV	Photovoltaïque
Rs	Résistance série
Rsh	Résistance shunt
UV	Ultra Violet
VOC	Tension de circuit-ouvert
VS	Tension de seuil

Introduction général

Au cours des dernières décennies, la consommation mondiale d'électricité a augmenté en raison du développement industriel et des moyens de communication. La plupart de cette électricité est produite à partir de ressources non renouvelables (charbon, pétrole, gaz, nucléaire), qui sont polluantes et dont les réserves sont épuisables. Il est donc essentiel de développer des sources d'énergies renouvelables et non polluantes, comme l'énergie éolienne, marine, géothermique et solaire photovoltaïque (PV).

Pour convertir l'énergie solaire en électricité, on utilise des dispositifs photovoltaïques (cellules solaires) faits de semi-conducteurs. Les premières études sur les cellules solaires ont commencé au 19^{ème} siècle, mais ce n'est qu'au milieu du 20^{ème} siècle qu'une cellule solaire en silicium efficace a été développée [1]. Les recherches se sont concentrées sur l'amélioration de leur efficacité, la réduction des coûts et l'augmentation de leur stabilité. Toutefois, pour surmonter certaines limitations des cellules en silicium, de nouveaux matériaux comme les semi-conducteurs III-V, tels que l'InGaN (nitrure d'indium et de gallium), sont explorés pour leurs propriétés exceptionnelles. Dans ce contexte, notre étude consiste à simulation numérique d'une cellule solaire à base des semi-conducteurs III-N.

Notre étude de simulation est réalisée sur deux cellules solaires InN(p)/ In_xGa_{1-x}N(n) et In_xGa_{1-x}N(n)/GaN(p). Ces simulations visent à optimiser les paramètres caractéristiques de la cellule en utilisant le logiciel SCAPS. En premier lieu, on a optimisé la fraction molaire d'indium pour obtenir un meilleur rendement pour les deux cellules, ensuite on a trouvé les épaisseurs et le dopage de la couche In_xGa_{1-x}N qui donne le meilleur rendement.

Nous avons choisi d'utiliser ce matériau pour explorer les possibilités d'amélioration des performances des cellules photovoltaïques. Ses propriétés uniques peuvent contribuer à une conversion plus efficace de l'énergie lumineuse en électricité.

La structure de ce manuscrit est comme suit :

- Le premier chapitre décrit l'énergie solaire puis l'effet photovoltaïque et l'architecture d'une cellule photovoltaïque ainsi que le matériau InGaN, en mentionnant quelques avantages et inconvénients.
- Le deuxième chapitre décrit les notions générales concernant les semi-conducteurs III-V et en particulier le matériau InGaN.
- Le dernier chapitre décrit la méthode de la simulation ainsi que les résultats obtenus de ce travail commentés et discutés, dans lequel on a optimisé la fraction molaire de l'Indium, l'épaisseur et le dopage de la couche In_xGa_{1-x}N(n) qui donnent un meilleur rendement.
- une conclusion générale qui résume les résultats et quelques perspectives envisagées

Chapitre I

Généralités sur les cellules photovoltaïques

I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque représente une innovation majeure dans le domaine de la production d'électricité verte. En exploitant la capacité des cellules solaires à convertir directement la lumière du soleil en électricité, cette technologie offre une solution durable et renouvelable pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux.

Ce chapitre s'intéresse à l'effet photovoltaïque et aux concepts de base relatifs à la cellule PV, ainsi que leurs principales caractéristiques. Il explore les différentes générations de cellules PV, notamment celles à base de InGaN, et aborde enfin quelques avantages et inconvénients de l'énergie PV.

I.2 Source de l'énergie photovoltaïque

I.2.1 Spectre solaire

Le soleil émet des particules qu'on appelle des photons en quantité massive. Ces flux de photons et également appelé radiation ou rayons, voyagent dans l'espace à une vitesse de 300 000 km/s. Ce rayonnement est compris dans une bande de longueur d'onde variée (voir Figure I.1).

Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est liée à leur longueur d'onde par la relation:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Où

h: est la constante de Planck.

ν : la fréquence.

c: la vitesse de la lumière.

λ : la longueur d'onde.

Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par les satellites est désignée sous le nom de AMO. Sa distribution en énergie est répartie comme suit [2]:

Ultraviolet UV	$0,20 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$	6,4%
----------------	-------------------------------------	------

Visible	$0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$	48%
Infra- Rouge IR	$0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$	45,6%

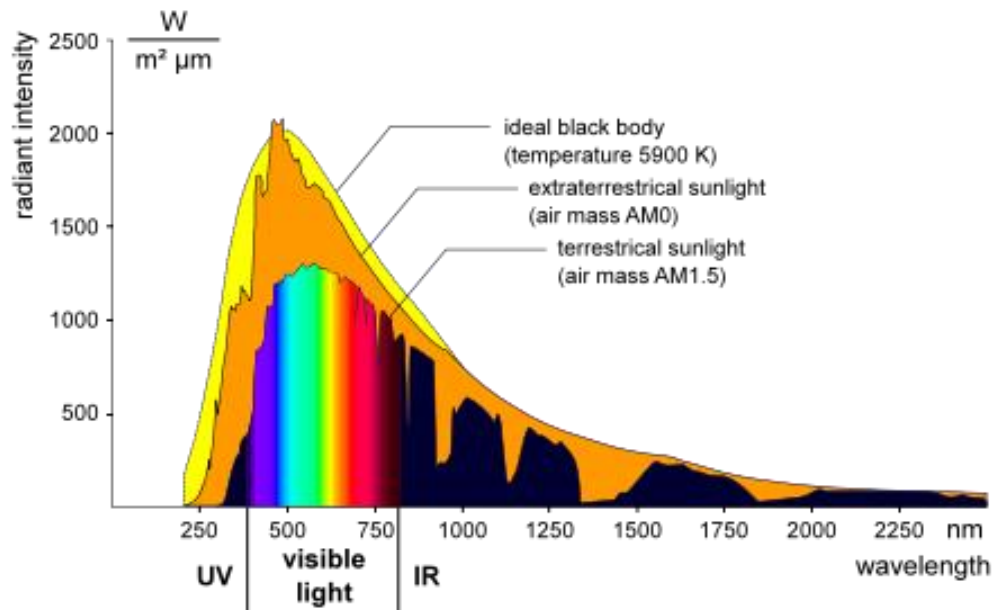


Figure I.1 Répartition spectrale du rayonnement solaire [3].

I.2.2 Notion de l'air masse

Avant que le rayonnement solaire atteigne le sol de la terre, il doit traverser l'épaisseur atmosphérique pour évaluer la quantité de ce rayonnement, la notion d'air masse (AM) a été créée. En dehors de l'atmosphère, on a le spectre AM0 (masse d'air nulle) d'une intensité du rayonnement qui vaut 1367 W/m^2 . Au niveau de l'équateur, le rayonnement traverse une épaisseur d'atmosphère, on a le spectre AM1. Lorsque le rayonnement fait un angle de 60° par rapport à l'équateur, on a le spectre AM2. On définit le spectre AM1.5 pour un rayonnement faisant un angle de $41,8^\circ$ par rapport à l'équateur correspondant à un rayonnement traversant 1,5 fois l'épaisseur de la couche atmosphérique. Dans ces conditions, l'intensité du rayonnement est normalement inférieure à 1000 W/m^2 (environ 827 W/m^2), un facteur de normalisation est donc appliqué afin de faire passer l'intensité du spectre à 1000 W/m^2 . Les spectres AM0 et AM1.5, présentés sur la Figure I.2, servent aujourd'hui de norme pour les tests standardisés [4].

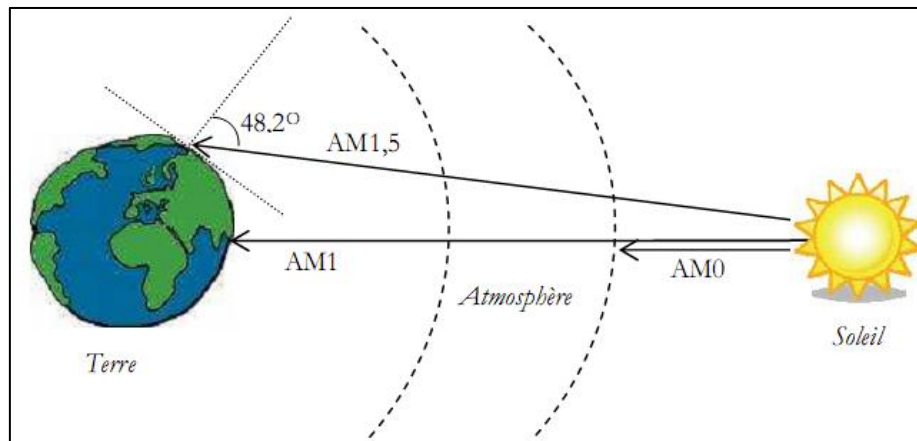


Figure I.2 Définition de l'air masse [2].

I.3 Effet photovoltaïque

La naissance de l'effet photovoltaïque était en 1839 par le savant Français Alexandre Edmond Becquerel qui a obtenu une tension électrique générée par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur. La conversion photovoltaïque a été réalisée pour la première fois dans le laboratoire Bell en 1954 sur une simple jonction PN au Silicium. Par suite, plusieurs semi-conducteurs ont été utilisés pour cet objectif.

L'effet photovoltaïque est le phénomène physique par lequel certains matériaux, lorsqu'ils sont exposés à la lumière, génèrent une différence de potentiel électrique (tension) et un courant électrique. C'est le principe de base sur lequel fonctionnent les cellules photovoltaïques pour convertir la lumière solaire directement en électricité [5].

I.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le principe d'une cellule photovoltaïque est de réduire les recombinaisons ce qui force les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau, ce qui donne lieu à un photon-courant. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basé sur les trois étapes suivante illustré sur la Figure I.3.

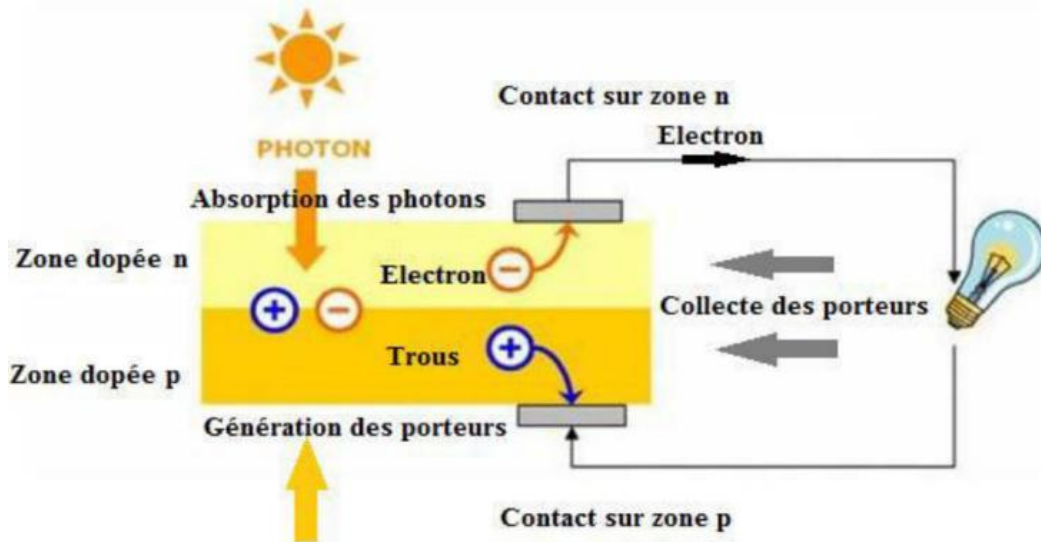


Figure I.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [6].

I.4.1 Absorption des photons

Le phénomène d'absorption permet la restitution d'une partie de flux lumineux sous forme d'électricité. L'absorption est caractérisée par le gap qui signifie l'écart entre le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence d'un matériau.

La bande de valence doit être occupée par les électrons et la bande de conduction vide. Lorsque l'énergie du photon est inférieure à celle du gap ; le photon n'est pas absorbé. Dans le cas d'un photon suffisamment énergétique ; l'interaction (photon/semi-conducteur) est traduite par la génération d'une paire (électron/trou) qui modifie localement la conductivité du matériau [7].

I.4.2 Création paires électrons/trous

Lorsque les photons incidents heurtent la surface du matériau photovoltaïque, une création de porteurs est provoqué dans les différentes zones N, P et la zone de charge d'espace. Le comportement des photo-porteurs dépendra de la région [7]:

- Au niveau de la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge seront renvoyés par un champ électrique soit dans la zone P pour les trous ou bien dans la zone N pour les électrons. Leur accumulation permettra de créer un photo-courant de diffusion.
- Au niveau de la zone de charge, les paires électron/trou résultantes des photons incidents seront séparées par le champ électrique, d'où les électrons vont se diriger vers la région N et les trous vers la région P. Ceci permettra de créer un photo-courant de génération

I.4.3 Collecte des porteurs de charges

La collecte des particules générées dans le dispositif est un autre mécanisme clé de la cellule photovoltaïque. Pour ce faire, le matériau utilisé doit avoir deux niveaux d'énergie et être suffisamment conducteur pour permettre le flux de courant, ce qui explique l'utilisation de semi-conducteurs dans l'industrie photovoltaïque. Pour collecter les particules, un champ électrique est nécessaire pour dissocier les paires électron-trou créées [7].

I.5 Structure d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches, l'élément de base est la jonction PN qui joue le rôle principal dans le dispositif solaire plus quelques couches donnant une structure industrielle standard qui est présentée sur la Figure I.4

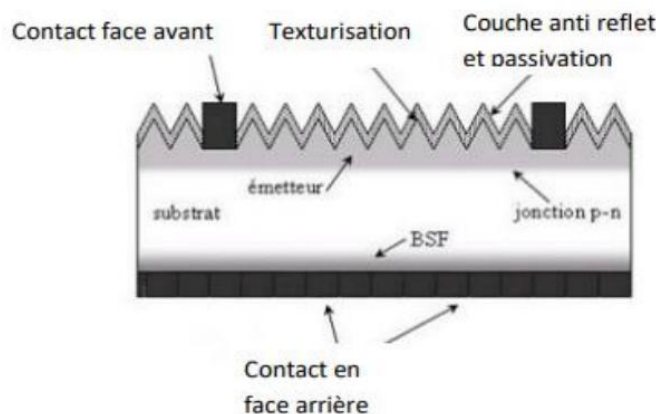


Figure I.4 Constituants de base d'une cellule photovoltaïque [8].

I.5.1 Texturation de la surface

La texturation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule, cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramide. Cela permet de mieux absorber le spectre solaire en conséquence améliorer le rendement [8].

I.5.2 Couche antireflet

Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface au niveau de la face avant, cette surface est recouverte d'une couche anti-réfléchissante (Anti-Reflective Coatings CAR). Sans cette couche, la cellule solaire agit comme un miroir et reflète jusqu'à 33% de la lumière incidente sur la cellule [8].

I.5.3 Couche de champ arrière (BSF)

C'est une couche fortement dopée sur la face arrière de la cellule. Cette zone a le même type de dopage que celui de la base. Ce qui crée une barrière de potentiel sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence du niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Donc le but du champ arrière est de diminuer la vitesse de recombinaison [8].

I.5.4 Contacts face avant et arrière

Les contacts métalliques de l'émetteur et du substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est à dire que la caractéristique tension du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme ainsi que le rendement [8].

I.6 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

La Figure I.5 présente le schéma équivalent d'une cellule solaire sous éclairage. I_{ph} correspond à un générateur de courant monté en parallèle avec une diode. On a notamment introduit deux résistances parasites dans ce schéma, ces résistances ont une influence sur la caractéristique courant-tension de la cellule [9]:

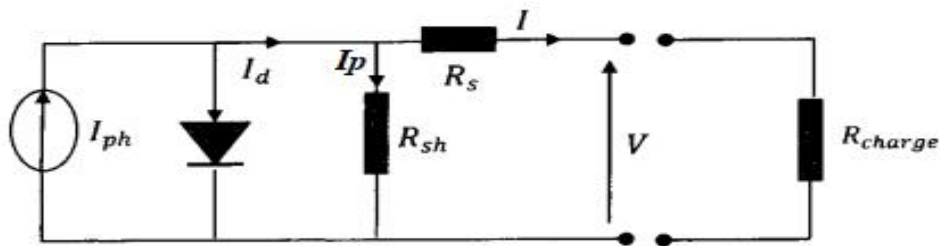


Figure I.5 Schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque [9].

Résistance série R_s : Cette résistance est liée de l'impédance des électrodes et de la base. Il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction. La pente de la courbe courant-tension au point V_{co} représente l'inverse de la résistance série ($1/R_s$).

Résistance shunt R_{sh} : elle correspond aux dans la surface et pertes dues aux défauts dans le matériau. Il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera drivée par cette résistance et il ne pourra être délivrée à la charge. La pente de la courbe courant-tension au point I_{cc} représente l'inverse de la résistance shunt ($1/R_{sh}$).

Le photo-courant I_{ph} crée dans la structure par une partie de rayonnement absorbé (ce

courant est pratiquement le courant de court-circuit de la cellule).

- Le courant direct I_d d'obscurité de la jonction.
- Le courant I généré par la cellule et fourni à la charge
- Le courant I_p correspond au courant des résistances parallèles.

la variation du courant I en fonction de la tension V à l'obscurité et sous éclairissement permet d'évaluer la performance de la cellule solaire. La Figure I.6 montre un exemple de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire sans et avec éclairissement.

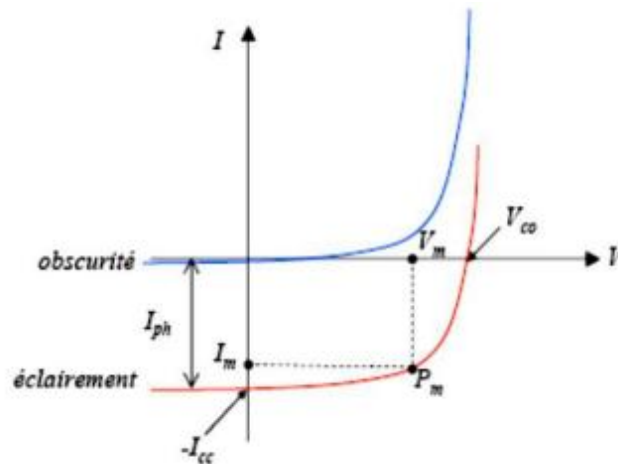


Figure I.6 Caractéristiques $I(V)$ d'une cellule PV dans l'obscurité et sous illumination [7].

On constate que la cellule solaire suit le comportement d'une diode classique à l'obscurité, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s . Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité, la caractéristique $I-V$ peut être représenté par la relation suivante [7]:

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \times \left(e^{\frac{qV}{kt}} - 1 \right) \quad (\text{I.2})$$

Avec:

I_{ph} : courant généré sous éclairissement

I_s : courant de saturation

k : constante de Boltzmann ($1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.61400 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)

T : température absolue en Kelvin (K)

q : charge absolue d'un électron en coulomb

I.7 Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire

À partir de la caractéristique $I-V$ sous éclairissement illustrée au dessus dans la Figure

I.6 représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule, on constate que le comportement d'une cellule solaire peut être étudié à travers des grandeurs physiques principales:

I.7.1 Courant de court-circuit, I_{cc}

Le courant de court-circuit exprimé en mA (ou densité de courant de court-circuit mA/cm²), est le courant généré par la cellule sous éclairage et en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température [4].

Le courant de court-circuit I_{cc} se confond avec le photo-courant I_{ph} :

$$I_{cc} (v = 0) = I_{ph} \quad (\text{I.3})$$

I.7.2 Tension à circuit ouvert, V_{co}

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant de la cellule est nul. Il est lié à la résistance shunt, lorsque cette dernière n'est pas connectée ou connectée mais sa valeur est infinie. La valeur de cette tension diminue avec la température et dépend de l'éclairage de la cellule [4].

$$V_{oc} = \frac{k \times T_c}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{I.4})$$

$\frac{k \times T_c}{q}$: représente la potentielle thermodynamique;

T_c : température absolue ;

q : constante de charge d'un électron = 1.602×10^{-19} C ;

k : constante de Boltzmann = 1.38×10^{-23} ;

I_{ph} : photo courant ;

I_s : courant de saturation inverse.

I.7.3 Puissance maximale, P_{max}

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance; elle est donnée par la relation [4]:

$$P_m = I_{max} \times V_{max} \quad (\text{I.5})$$

I.7.4 Facteur de forme, FF

On appelle facteur de forme (fill-factor), le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit $I_{cc} \times V_{co}$ où [3]:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} I_{cc}} \quad (\text{I.6})$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique I-V de la cellule solaire.

I.7.5 Rendement de conversion, η

Le rendement est donné par le rapport de la puissance électrique maximale générée à la puissance du rayonnement solaire incident P_{in} :

$$\eta = \frac{V_{max} \times I_{max}}{P_{in}} \quad (\text{I.7})$$

Si S est la surface de la cellule en (m²) et E est l'éclairement « irradiance » (en W/m²) le rendement énergétique s'écrit[3]:

$$\eta = \frac{ff \times V_{co} \times I_{cc}}{S \times E} \quad (\text{I.8})$$

le rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [4].

I.7.6 Réponse spectrale d'une cellule solaire

La réponse spectrale RS d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. La réponse spectrale RS est donnée par la relation suivante [4]:

$$RS = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} (A/W) \quad (\text{I.9})$$

I.7.7 Rendement quantique externe et interne

Le rendement quantique externe EQE de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents pour chaque longueur d'onde, il est relié à la réponse spectrale par [4]:

$$EQE(\lambda) = RS(\lambda) \cdot \frac{h.c}{\lambda.e} \quad (\text{I.10})$$

Le rendement quantique interne IQE de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons pénétrant dans le matériau, il est relié au rendement quantique externe EQE par l'équation [4]:

$$\text{IQE}(\lambda) = \frac{\text{EQE}(\lambda)}{1-R(\lambda)} \quad (\text{I.11})$$

Où $R(\lambda)$ représente le coefficient de réflexion pour la longueur d'onde λ .

I.8 Différentes générations des cellules photovoltaïques

Il existe plusieurs technologies de cellules qui ont toutes des propriétés différentes. Dans ce qui suit, on va présenter les principales générations photovoltaïques :

I.8.1 Cellule solaire de première génération

Les cellules de premières générations sont basées sur une seule jonction p-n et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur.

Les cellules cristallines se subdivisent en deux catégories: mono- et poly- cristalline selon le type de structure. Ces deux types de cellules proviennent de procédé de purification et de solidification différents:

- Le silicium mono-cristallin est complexe à produire car il requiert un niveau de pureté extrêmement élevé, impliquant plusieurs étapes de purification. Les cellules monocristallines affichent un rendement élevé (de 16% à 24%), mais leur fabrication est laborieuse, délicate et donc coûteuse, nécessitant une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur [3].
- Le silicium poly-cristallin, également appelé polycristallin, est aujourd'hui la technologie la plus largement utilisée, représentant près de 50% du marché. Il est fabriqué à partir de techniques de croissance qui favorisent la formation d'une structure colonne avec de gros cristaux, ce qui réduit les effets négatifs des joints de grains. Les cellules polycristallines ont un coût de production moins élevé et offrent un rendement qui varie de 14% à 18% [3].

I.8.2 Cellules solaires de deuxième générations

La deuxième génération de cellules solaires utilise la technique de dépôt de matériaux semi-conducteurs en couches minces. Ces matériaux sont déposés sur un substrat. L'épaisseur de ces couches varie de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de micromètres. Parmi les technologies en couches minces, trois types de cellules sont distingués:

- Les cellules solaires à base de silicium amorphe sont produites en déposant une

ou plusieurs couches minces sur un substrat en verre. Cette technologie est moins coûteuse et moins polluante que la génération précédente, et elle fonctionne efficacement même sous faible éclairage. Cependant, ces cellules présentent un rendement très faible, typiquement entre 5% et 8%, et elles peuvent subir une perte de rendement initiale lors des premiers mois d'utilisation, connue sous le nom de "stabilisation sous lumière". De plus, leur durée de vie est plus courte que celle des cellules en silicium cristallin, généralement d'environ 10 ans, et leurs processus de fabrication ne sont pas encore complètement maîtrisés [10].

- Le tellure de cadmium (CdTe) se distingue comme le matériau le plus prometteur pour la production de modules solaires à moindre coût. Bien que le CdTe offre une absorption lumineuse efficace, sa toxicité constitue un obstacle au développement de cette technologie. Les cellules les plus performantes basées sur le CdTe affichent des rendements de conversion photoélectrique atteignant environ 17% [3].
- Les cellules CIS/CIGS montrent un potentiel de développement prometteur pour l'avenir, affichant des rendements en laboratoire dépassant les 20%. Cependant, la disponibilité limitée des matériaux nécessaires à leur fabrication constitue un défi majeur [10].

I.8.3 Cellules solaires de troisièmes générations

La troisième génération vise à améliorer l'efficacité des cellules solaires a conduit au développement de la troisième génération de technologies photovoltaïques. Cette nouvelle génération inclut les technologies en couches minces, telles que les cellules à base de polymères, qui maintiennent des coûts de production bas tout en améliorant les performances électriques. L'industrie photovoltaïque continue d'évoluer grâce à l'automatisation croissante de la production des cellules solaires en couches minces, permettant une plus grande efficacité et des coûts réduits.

Les progrès futurs dans cette industrie dépendront de découvertes révolutionnaires dans les matériaux photovoltaïques et les technologies de fabrication, essentielles pour améliorer la compétitivité des coûts et étendre le marché du photovoltaïque. L'innovation, basée sur de nouvelles compréhensions de la physique et de la science des matériaux, est primordiale pour surmonter les anciennes limites en matière d'efficacité et de coût, ouvrant ainsi la voie à une révolution dans ce domaine [10].

I.9 Cellules solaire à base de InGaN

Les cellules photovoltaïques présentant les plus hauts rendements, en simple et multijonctions, sont composées de matériaux III-V. L'alliage InGaN, faisant également partie de cette catégorie de matériaux, possède aussi un fort potentiel pour des cellules solaires à haut rendement. L'avantage principal de cet alliage est son gap modulable sur quasiment tout le spectre solaire sel on l'évolution du gap d'énergie

dans l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Dans cette section, nous faisons un état de l'art de la filière InGaN, de la simple jonction aux concepts de cellules tandem à hétérojonction.

I.9.1 Cellule homo-jonction

En 2013, Islam et ses collaborateurs ont conçu une structure de type n+ p homo-jonction $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ sur un substrat de GaN d'une épaisseur de $0,65 \mu\text{m}$. Lorsqu'ils l'ont testée sous illumination AM 1.5, ils ont mesuré une tension en circuit ouvert de $1,4\text{V}$ et une densité de courant de court-circuit de $0,25 \text{ mA/cm}^2$. Afin d'améliorer les performances et d'augmenter l'absorption des photons solaires, ils ont par la suite fabriqué le dispositif sur un substrat de GaN plus épais avec une teneur en indium de 25%. Les caractéristiques de cette nouvelle cellule solaire, ont montré une augmentation à une tension en circuit ouvert de $1,5\text{V}$ et une densité de courant de court-circuit de $0,5 \text{ mA/cm}^2$. Cependant, cela a conduit à un rendement de conversion très faible, inférieur à 1%. [11]

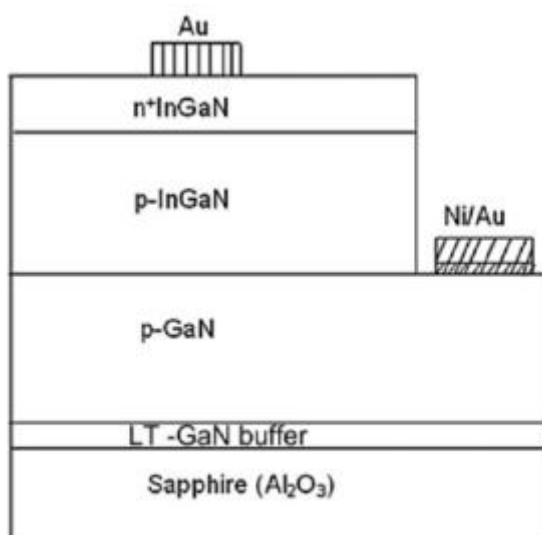


Figure I.7 Cellule solaire pin homo-jonction proposée par Islam et al [11].

En même année (2009), Cai et al. ont étudié les caractéristiques courant-tension de cellules à homojonction P-InGaN/ I-InGaN/ N-InGaN en fonction du pourcentage d'indium ($0,02 < x < 0,15$). Les meilleures performances sont atteintes pour les cellules possédant le moins d'indium, soit $\eta = 5,14\%$ pour une incorporation de 4% d'indium, la qualité cristalline du matériau InGaN "épais" étant toujours au cœur du problème (consulter Figure I.8) [12].

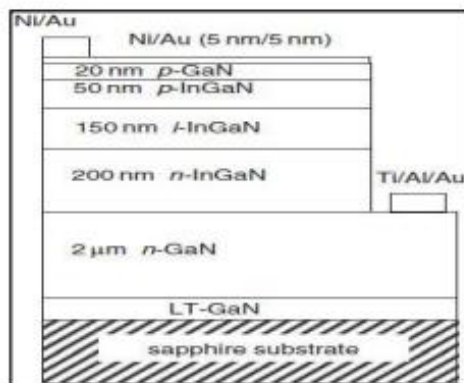


Figure I.8 Schéma de la cellule solaire PIN proposée par Cai et al [12].

En 2014, Shloe et al. ont étudié une structure PIN sous éclairage AM1.5. Ils ont étudié l'effet de la concentration d'indium dans la couche intrinsèque. Le rendement optimal obtenu est de 17% pour une couche intrinsèque de 500nm d'épaisseur avec une composition d'indium de 0,55. Ceci montre que le rendement optimal des cellules solaires à base d'InGaN s'obtient avec de très fortes teneurs en indium dépassant les 50% [13].

I.9.2 Cellule hétérojonction

Plusieurs études sur les cellules solaires PIN à hétérojonction à base d'InGaN sont réalisées durant les dernières années. L'un des premiers travaux a été en 2007 par Jani et al. Ils ont élaboré une cellule PV dont les caractéristiques sont une tension en circuit ouvert (V_{co}) de 2, 4V, une densité de courant de court-circuit (J_{cc}) de 3,7mA/cm². Ces valeurs ont été obtenues pour un spectre solaire amplifié dans la gamme UV (l'éclairage n'a été pas bien précisé dans cet article). Le V_{co} élevé montre le potentiel de ce matériau. Figure I.9 illustre le schéma de la structure [14].

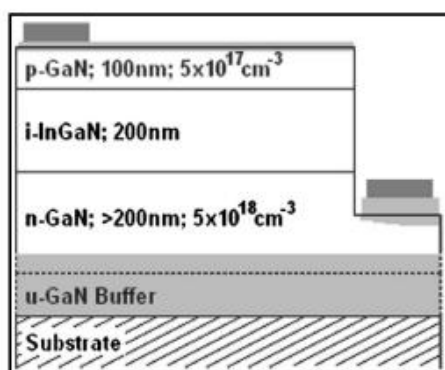


Figure I.9 Schéma de la cellule solaire pin en double hétérojonction proposée par Jani et al [14].

Dernièrement, en 2017, Liu et al. ont étudié deux structures de cellules solaires à puits quantiques InGaN/GaN, illustrée sur la Figure I.10 l'une avec une composition d'indium de 0,14 (cellule A) et l'autre avec une composition d'indium de 0,19 [15].

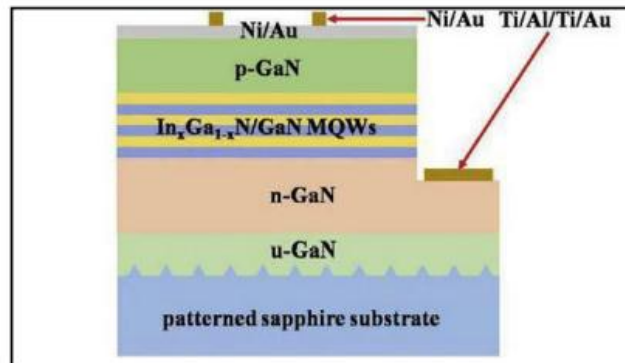


Figure I.10 Schéma de la structure de cellule solaire à puits quantiques InGaN/GaN étudiée par Liu et al [15].

I.9.3 Cellule multijonction

Pour la technologie multijonction à base d'InGaN, des études ont également été réalisées sur différentes structures de cellules solaires. En 2008, Zhang et al. ont simulé une cellule solaire multijonction à base d'InGaN (Figure I.11). C'est une structure composée de deux jonctions : la première avec une composition d'indium de 0,48 et la seconde avec une composition d'indium de 0,73. Ils obtiennent un rendement de conversion de 35,1% [16].

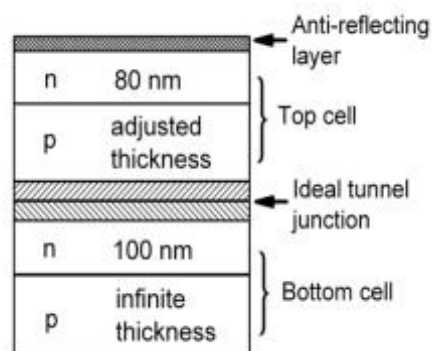


Figure I.11 Schéma de la cellule solaire à double-jonction simulée par Zhang et al [16].

I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

l'énergie photovoltaïque offre de nombreux avantages en tant que source d'énergie renouvelable mais aussi présente quelques inconvénients:

I.10.1 Avantages

- Une haute fiabilité car les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs, Elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt;
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit final est non polluant, silencieux, peu de déchet, pas de ligne électrique supplémentaire et pas de nuisance sonore olfactive [17].

I.10.2 Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé;
- L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions ;
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %);
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées;
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis [17].

I.11 Conclusion

Le premier chapitre a fait l'objet de la représentation des notions générales sur l'effet photovoltaïque, incluant la constitution des cellules photovoltaïques, y compris les cellules à base d'InGaN.

le chapitre suivant, va représenter les semi-conducteurs III-V et va se focaliser plus exactement sur l'InGaN.

Chapitre II

Notions générales sur les matériaux semi-conducteurs III-V

II.1 Introduction

Ces dernières années, les semi-conducteurs III-V ont été largement utilisés dans divers domaines technologiques, notamment dans les cellules photovoltaïques où ils sont devenus parmi les meilleurs choix pour améliorer l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité, parmi ces composés le nitrure d'indium et du gallium ou « InGaN ».

Ce chapitre représente une étude des semi-conducteurs III-V, avec une attention particulière portée au matériau InGaN, en présentant ses caractéristiques ainsi que ses propriétés physiques, électriques et optiques.

II.2 Définition des semi-conducteurs III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la 3ème colonne et d'un élément de la 5ème colonne de la classification périodique. Il sont utilisé notamment dans la fabrication des cellules solaires photovoltaïques [18].

La Figure II.1 représente le tableau périodique (table de Mendeleïev) avec le regroupement des éléments de la colonne IIIA et VA, lesquels représentent des matériaux semi-conducteurs.

Le tableau périodique des éléments chimiques est présenté, avec les colonnes IIIA et VA mises en évidence par une couleur verte. Les éléments de la colonne IIIA sont : B, Al, Ga, In, Tl. Les éléments de la colonne VA sont : N, P, As, Sb, Bi. Les masses atomiques et les électro-négativités de Pauling sont indiquées pour chaque élément.

1		2															
H	He															He	
1,008	4,00															4,00	
3		IIIA										VA				8	
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne					Ar					
6,94	9,01	10,81	12,01	14,01	16,00	19,00	20,18					39,95					
11		IIIA										VA				18	
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar					Ar					
22,99	24,31	26,98	28,09	30,97	32,06	35,45	39,95					39,95					
19		IIIA										VA				36	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
39,10	40,08	44,96	47,87	50,94	52,00	54,94	55,85	58,93	58,69	63,55	65,38	69,72	72,63	74,92	78,96	79,90	83,80
37		IIIA										VA				54	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
85,47	87,62	88,91	91,22	92,91	95,96	[98]	101,07	102,91	106,42	107,87	112,41	114,82	118,71	121,76	127,60	126,90	131,29
55		IIIA										VA				86	
Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
132,91	137,33	138,91	140,12	140,91	144,24	[145]	150,36	151,96	157,25	158,93	162,50	164,93	167,26	168,93	173,05	174,97	
87		IIIA										VA				118	
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	
[223]	[226]	[227]	232,04	231,04	238,03	[237]	[244]	[243]	[247]	[247]	[251]	[252]	[257]	[258]	[259]	[262]	

Figure II.1 Tableau périodique [19].

II.3 Différentes composés des semi-conducteur III-V

Les composés semi-conducteurs III-V représentent une nouvelle classe de matériaux qui à fait son apparition ces dernières années, basés sur la création d'un potentiel dans un cristal par La variation de composition d'un alliage qui désigne un mélange homogène de deux ou plusieurs matériaux [20].

II.3.1 composés binaires

Les semi-conducteurs binaires sont composés de deux types atomes dont la somme d'électrons de valence des deux atomes égale à huit. Les semi-conducteurs binaires les plus courants sont les semi-conducteurs composés d'éléments des colonnes III-V du tableau périodique Figure II.1 sous forme $A^{III}B^V$ [21].

II.3.2 composés ternaires

Si deux éléments binaires AB et AC sont associés, le composé ainsi formé est un alliage Ternaire qui peut être soit:

Un alliage ternaire anionique sous forme AB_xC_{1-x} . ou un alliage ternaire cationique sous forme $A_xB_{1-x}C$ [21].

Un alliage ternaire est caractérisé par le coefficient stœchiométrique x .

Les propriétés physiques de cet alliage peuvent être représentées par une simple interpolation analytique des propriétés de ses constituants binaires, plutôt que de traiter cet alliage comme un nouveau composant chimique avec ses propres caractéristiques [21].

II.4 Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur idéalement pur est appelé intrinsèque, est un semi-conducteur non dopé, c'est à dire qu'il contient peu d'impuretés (atomes étrangers), qui pouvant changer la concentration en porteurs libres en comparaison avec la quantité de trous et d'électrons générés thermiquement [22].

II.5 Semi-conducteur extrinsèque

Un semi-conducteur extrinsèque est créé par dopage d'un semi-conducteur intrinsèque. Le dopage est l'introduction d'atomes est d'impuretés qui peuvent ajouter des électrons ou des trous dans le semi-conducteur, Ces impuretés sont ajoutées au matériau semi-conducteur pour augmenter sa conductivité électrique ou pour conférer des propriétés spécifiques telles que la sensibilité à la lumière ou la conductivité

thermique [22].

II.6 Dopage des semi-conducteurs

Dans le domaine des semi-conducteurs, le dopage est l'action d'ajouter des impuretés en petites quantités à une substance pure afin de modifier ses propriétés de conductivité. Les impuretés ajoutées, également appelées dopants, peuvent être de deux types: dopants de type N et dopants de type P [23].

II.6.1 Dopage type N

Le dopage de type N consiste à augmenter la densité en électrons dans le semi-conducteur intrinsèque [24]. Pour ce faire, on ajoute des atomes pentavalente (P, As, Sb) à un semi-conducteur ces atomes se substituant aux atomes cristallines et fournissent des électrons libres, et en obtient un semi-conducteur de type N (charges négatives en excès) [25].

L'atome donneur participe avec 4 électrons et le cinquième électron devient libre voir la Figure II.2.

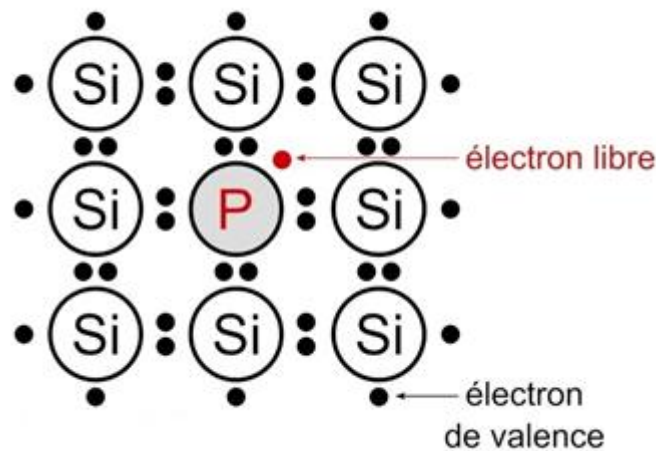


Figure II.2 Silicium dopé au Phosphore [26].

II.6.2 Dopage type p

Le dopage de type P consiste à augmenter la densité en trous dans le semi-conducteur intrinsèque. Pour ce faire, on inclut un certain nombre d'atomes pauvres en électrons dans le semi-conducteur afin de créer un excès de trous [24].

L'atome accepteur à trois électrons donc elle va recevoir un quatrième électron. Voir illustration du la Figure II.3.

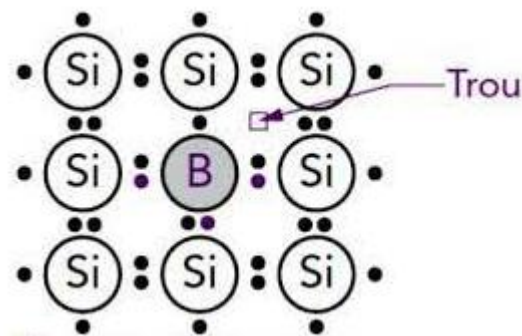


Figure II.3 Silicium dopé au Bore [26].

II.7 Description de nitrure de gallium-indium(InGaN)

Le nitrure d'indium et de gallium, ou InGaN est un semi-conducteur faisant partie de la catégorie des nitrures-III c'est-à-dire, composé d'azote et d'éléments de la colonne III du tableau de Mendeleïev, à savoir le gallium et l'indium [27].

L'InGaN apparaît à l'heure actuelle comme le matériau le plus prometteur pour les applications photovoltaïques. Il est activement étudié parce qu'il représente une nouvelle catégorie de matériaux possédant des propriétés uniques un large gap d'énergie interdite direct, lui permettant une large couverture spectrale, de fortes liaisons interatomiques ou encore une forte conductivité thermique [21].

II.8 Propriétés structurales de l'InGaN

Les nitrures GaN et InN se présentent essentiellement sous deux formes cristallines : la structure hexagonale (wurtzite) et la structure cubique (zinc -blende). Dans les conditions ambiantes, la structure la plus stable thermodynamiquement est la structure hexagonale, Cette structure est définie par trois paramètres, la largeur d'un côté hexagonale a , la hauteur de la maille élémentaire c , et le paramètre interne u décrivant la séparation des sous-réseaux des anions (N^{3-}) et des cations (Ga^{+3}) selon l'axe c . Le Tableau II.1 présente ces paramètres pour le GaN et l'InN [28].

Tableau II.1 Paramètres structuraux pour le GaN et l'InN [26].

	a (Å)	c (Å)	U
GaN	3,189	5,185	0,377
InN	3,54	5,70	0,378

La plupart des matériaux semi-conducteurs binaires III-V ont une structure Zinc-Blende. En effet dans cette phase, la maille primitive comporte deux atomes, un cation d'un élément III et un anion d'un élément V en occupant les positions (0, 0,0)

et $(1/4, 1/4, 1/4)$ respectivement Cette structure est constituée de deux sous réseaux cubique faces centrée. La première zone de Brillouin pour la structure zinc-blende à la forme d'un octaèdre tronqué (voir la Figure II.4) [24].

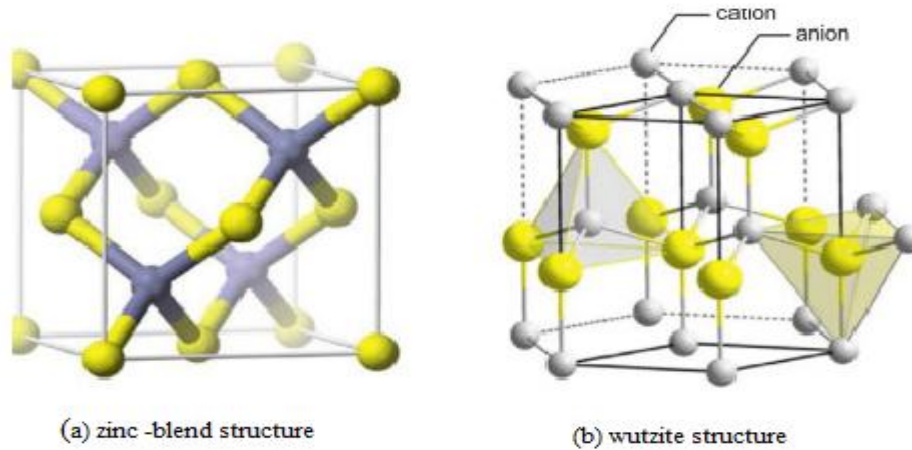


Figure II.4 Structures cristallines du GaN [29]

II.9 Gap d'énergie bande interdite des nitrures

Les propriétés électriques d'un matériau proviennent de son gap de bande interdite E_g , et de sa densité de porteurs [23].

II.9.1 Gap d'énergie interdite des nitrures

La caractéristique principale pour laquelle les nitrures sont tant étudiés est leur gap d'énergie interdite direct, y compris à travers leurs alliages. Ceci permet d'avoir des meilleurs rendements de conversion ou d'émission de lumière [27].

Les bandes de valence et de conduction sont composées de niveaux énergétiques continus, le nombre de ces niveaux n'est cependant pas constant à cause des différents niveaux électroniques des atomes. On parle alors de densité d'état. Ces dernières dépendent des caractéristiques du matériau et de la température [28].

La Figure II.5 représente le diagramme énergétique qui est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparées par une bande interdite ou gap.

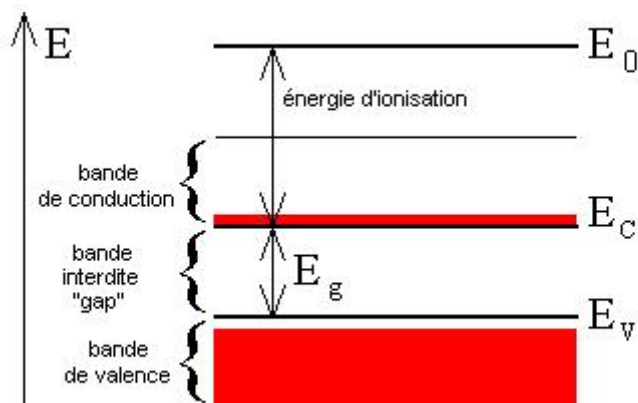


Figure II.5 Diagramme de bandes d'énergie pour les matériaux semi-conducteurs [30].

Pour la structure InGaN, la densité d'état aux bords des bandes de conduction et de valence (N_c) et (N_v) respectivement, est donnée par [28]:

$$N_c = [0,9x + (1 - x) \times 2,3] \times 10^{18} \text{ [cm}^{-3}\text{]} \quad \text{(II.1)}$$

$$N_v = [5,3x + (1 - x) \times 1,8] \times 10^{19} \text{ [cm}^{-3}\text{]} \quad \text{(II.2)}$$

Avec:

x: concentration d'indium

II.9.1.1 Évolution du gap d'énergie dans InGaN

A partir des gaps d'énergie interdite des composés binaires GaN et InN, il est possible de déterminer le gap d'énergie de l'InGaN en utilisant la loi de Végard avec un Paramètre de courbure [28]. La loi de Végard est définie par:

$$E_{g_{In_xGa_{1-x}N}} = x.E_{g_{InN}} + (1 - x)E_{g_{GaN}} - b.x(1 - x) \quad \text{(II.3)}$$

x : la concentration d'indium dans $In_xGa_{1-x}N$.

b : le paramètre de courbure.

E_g $In_xGa_{1-x}N$: le gap d'énergie de l'InGaN.

E_g GaN: le gap d'énergie du GaN.

E_g InN: le gap d'énergie de l'InN.

La Figure II.6 nous montre l'influence de la concentration d'indium sur l'énergie de la bande interdite. On remarque que l'accroissement de la concentration d'indium provoque une diminution considérable de l'énergie de la bande interdite.

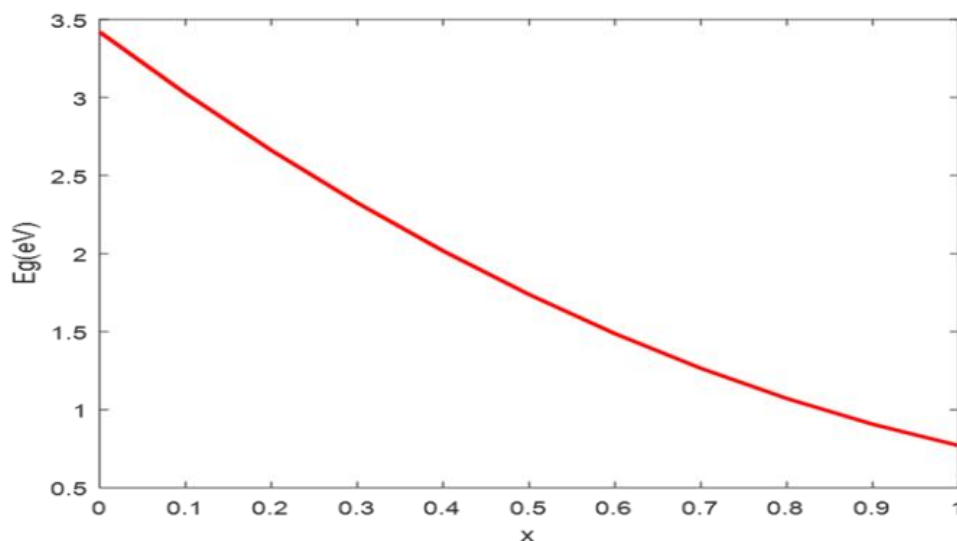


Figure II.6 Gap d'énergie d'InGaN en fonction de la variation d'indium à T=300°K [31].

II.9.1.2 Évolution du gap d'énergie interdite en fonction de la température

L'évolution du gap d'énergie interdite en fonction de la température peut généralement être décrite par l'expression de Varshni [23]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (\text{II.4})$$

$E_g(T)$: est l'énergie de la bande interdite à une température T.

$E_g(0)$: le gap d'énergie du matériau à 0 K [eV].

α : une constante empirique [eV. K⁻¹].

β : une constante associée à la température de Debye [K].

Ces paramètres pour le GaN et l'InN sont rassemblés dans le Tableau II.2.

Tableau II.2 Les paramètres de l'équation de Varshni [23]

	$E_g(0K)$ [eV]	α [m eV/K]	β [K]	$\Delta E(300 - 0K)$ [eV]
GaN	3,507	0.909	830	72.10 ⁻³
InN	0.69	0.41	454	49,9.10 ⁻³

II.9.2 Affinité électronique

L'évolution de l'affinité électronique χ en fonction du coefficient stœchiométrique est donnée par la relation [4]:

$$\chi^{InGaN} = x \cdot \chi^{InN} + \chi^{GaN}(1 - x) \quad (\text{II.6})$$

Avec les affinités électroniques suivantes:

$$\chi^{InN} = 5.8 \text{ eV}$$

$$\chi^{GaN} = 4.1 \text{ eV}$$

II.9.3 Masses des électrons et des trous

Les masses des électrons et trous en fonction du coefficient stœchiométrique x sont donnés par la relation suivante [4]:

$$m_{e,t}(In_xGa_{1-x}N) = x \cdot m_{e,t}(InN) + (1 - x) \cdot m_{e,t}(GaN) \quad (\text{II.7})$$

Tels que:

m_e : La masse effective des électrons.

m_t : La masse effective des trous.

II.9.4 Mobilité des porteurs dans les nitrures

L'équation de la mobilité des porteurs de charge peut être exprimée en fonction de la densité de dopage et de la température. Pour un semi-conducteur donné, la mobilité μ des porteurs de charge (électrons ou trous) est souvent modélisée par l'expression [32]:

$$\mu = \mu_{min} \left(\frac{T}{300} \right)^\beta + \frac{\mu_{max} \left(\frac{T}{300} \right)^\alpha - \mu_{min} \left(\frac{T}{300} \right)^\beta}{1 + \left(\frac{N_{tot}}{N_{ref}} \right)^\gamma} \quad (\text{II.7})$$

Avec:

T: température.

N_{tot} : densité de dopage total.

N_{ref} : densité de dopage de référence.

α, γ et β : constantes empiriques qui dépendent du matériau.

II.9.5 Longueur de diffusion

La longueur de diffusion (L) est la distance moyenne sur laquelle les porteurs peuvent se déplacer par diffusion [28]. Elle est définie par:

$$L = \sqrt{D \times \tau} \quad (\text{II.8})$$

Avec:

τ : la durée de vie des porteurs

D : le coefficient de diffusion des porteurs, défini par :

$$D = \frac{kT}{q} \mu \quad (\text{II.9})$$

Avec:

μ : la mobilité des porteurs

La longueur de diffusion est un paramètre à connaître lors de la conception d'un composant électronique, comme une cellule solaire. En effet, si les électrodes collectant le courant produit par la cellule sont éloignées d'une distance supérieure à la longueur de diffusion, alors les charges se recombineront avant d'être collectées [28].

Les propriétés électriques du GaN et de l'InN sont rassemblées dans le Tableau II.3

Tableau II.3 Les propriétés électriques du GaN et InN à 300K [21].

	GaN	InN
Gap d'énergie interdite (eV)	3.39	0.7
Affinité électronique	4.1	5.8
Masse effective des électrons, m_e	0.20 m_0	0.11 m_0
Masse effective des trous, m_h	0.80 m_0	0.65 m_0
Mobilité des électrons ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$)	1400	3200
Mobilité des trous ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$)	<20	17-36
Paramètres de varshni: α (eV)	0.909	0.41
β (K)	830	454
Densité d'états effective de la bande de conduction N_c (cm^{-3})	2.3×10^{18} ($4.3 \times 10^{14} \cdot T^{3/2}$)	9×10^{17} ($1.76 \times 10^{14} \cdot T^{3/2}$)
Densité d'états effective de la bande de valence N_v (cm^{-3})	4.6×10^{19} ($8.9 \times 10^{15} \cdot T^{3/2}$)	5.3×10^{19} ($10^{16} \cdot T^{3/2}$)

II.10 Propriétés optiques

La description des propriétés optiques des semi-conducteurs vise explicitement à la compréhension des phénomènes d'interaction d'une radiation lumineuse avec la matière ; généralement l'étude de l'interaction des photons avec le solide présente deux aspects :

D'une part, elle traite la connaissance quantitative de la propagation de la lumière dans le solide et ses applications [20].

D'autre part, la possibilité de confrontation des évidences expérimentales avec les modèles théoriques [20].

II.10.1 Indice de refraction

L'indice de réfraction d'un matériau est défini par le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide (c) sur la vitesse de la lumière dans le matériau (v) [27] par :

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{II.10})$$

La vitesse de la lumière dans un matériau n'est pas constante, elle change avec la longueur d'onde. L'indice de réfraction dans le cas du GaN, est égal à environ 2,3. Pour l'InN, il vaut environ 2,9 dans l'infrarouge.

L'indice de réfraction intervient également dans la détermination des coefficients de réflexion et de transmission à travers la relation de Snell-Descartes [27] :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{II.11})$$

Avec :

n_1 et n_2 : les indices de réfractons de deux milieux.

θ_1 et θ_2 : les angles des rayons lumineux par rapport à la normale.

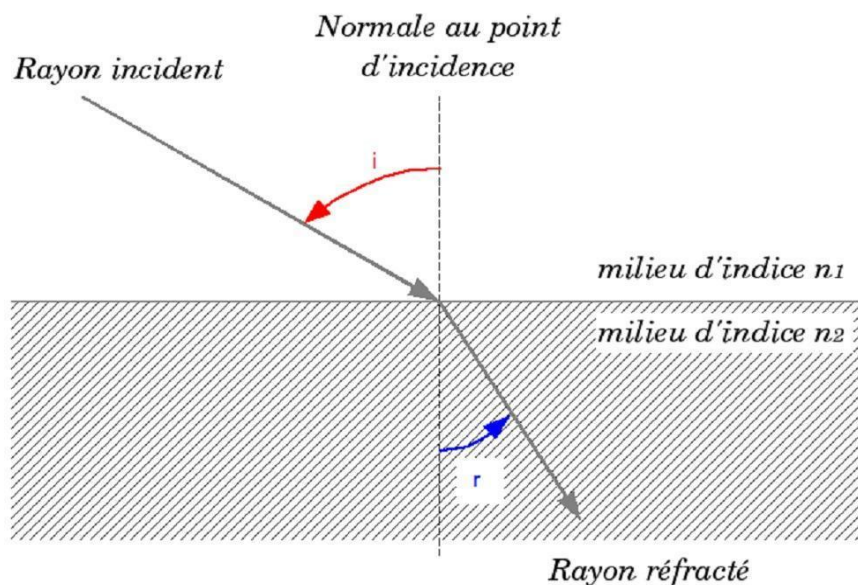


Figure II.7 Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan [34]

II.10.2 Coefficient d'absorption

Pour les cellules solaires, le coefficient d'absorption est un paramètre important puisqu'il va déterminer la quantité de photons absorbés par le matériau et donc la quantité de porteurs pouvant être produits [6]. L'absorption à travers une couche de semi-conducteur d'épaisseur peut être décrite par l'équation suivante :

$$I_t(\lambda) = I_i \times e^{-\alpha(\lambda)d} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

I_i : intensité incidente.

I_t : intensité transmise.

λ : longueur d'onde.

$\alpha(\lambda)$: coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde [cm^{-1}].

Le coefficient d'absorption, α , est défini par : $\alpha(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda}$

K : coefficient d'atténuation

II.10.3 Permittivité relative

La permittivité relative d'un matériau, aussi appelée constante diélectrique, décrit la réponse d'un matériau à un champ électrique appliqué et est définie par [27] :

$$\epsilon_r = \chi \epsilon_0 \quad (\text{II.13})$$

Avec :

χ : la susceptibilité du matériau.

ϵ_0 : la permittivité du vide [$8.85 \times 10^{-12} \text{F.m}^{-1}$].

Elle est reliée à l'indice de réfraction par la relation :

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (\text{II.14})$$

En introduisant la permittivité relative dans les coefficients de réflexion et de transmission, on obtient :

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\epsilon_r} + 1} \quad (\text{II.15})$$

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_r}}{\sqrt{\epsilon_r} + 1} \quad (\text{II.16})$$

On considérant le dioptré air/GaN, on obtient un coefficient de réflexion de 39 % et un coefficient de transmission de 61% [27].

II.11 Phénomènes de génération et de recombinaison

À une température différente de zéro absolu, la bande de conduction contient une quantité d'électrons et un nombre de trous est dans la bande de valence. Un électron libre peut perdre de l'énergie (il cesse alors d'être un électron libre de circuler dans le cristal) et venir occuper une place vacante (occupée par un trou) dans la bande de valence. Il s'agit alors d'un phénomène de recombinaison [35].

Aussi, un électron peut se détacher d'un atome (si une énergie suffisante lui est fournie) et passer de la bande de valence à la bande de conduction, où il devient un électron libre, ce qui donne naissance à un trou libre dans la bande de valence. Ce phénomène est appelé phénomène de génération (d'une paire électron-trou) [35].

L'écriture des équations de continuité de tout matériau introduit un terme que nous avons appelé "génération –recombinaison" et qui représente les divers mécanismes physiques qui vont perturber les concentrations des porteurs libres, En réalité, il y'a plusieurs modèles qui décrivent les phénomènes de génération - recombinaison, dans ce cas nous considérons une loi en volume régit par le modèle de "SCHOKLY-READ HALL" [36].

$$g_n = g_p = \frac{n_i p - n_i^2}{\tau_p(p + p_i) + \tau_n(n + n_i)} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

g_n : La vitesse de génération volumique des électrons ou (Taux de génération des électrons).

g_p : Taux de génération des trous.

n : est la concentration d'électrons libres.

p : est la concentration de trous.

n_i : est la concentration intrinsèque de porteurs de charge.

τ_n et τ_p : sont les temps de vie des porteurs de charge.

n_1 et p_1 : sont les densités de centres de recombinaison.

II.12 Mécanisme de recombinaison

La durée de vie des porteurs est un paramètre électronique très important. D'une part pour évaluer la qualité cristalline des semi-conducteurs et d'autre part pour déterminer le comportement des composants électroniques [37].

Dans l'InN, les électrons et les trous photogénérés se recombinent principalement de trois manières : par l'intermédiaire de défauts de manière non-radiative, de manière radiative par des transitions inter bande, et par le phénomène de recombinaison Auger de manière non-radiative [28]. Le taux de recombinaison total peut alors s'écrire:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{défaut}}} + \frac{1}{\tau_{\text{radiatif}}} + \frac{1}{\tau_{\text{auger}}} = \sigma \bar{v} N_{\text{défaut}} + B_{\text{radiatif}} n + B_{\text{Auger}} n^2 \quad (\text{II.18})$$

Avec

σ : la section efficace de capture [cm^2]

\bar{v} : La vitesse moyenne des porteurs libres [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$]

$N_{\text{défaut}}$: la densité de défauts [cm^{-3}]

n : la densité d'électrons libres [cm^{-3}]

B_{radiatif} et B_{Auger} : des constantes qui dépendent du matériau [$\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$] respectivement

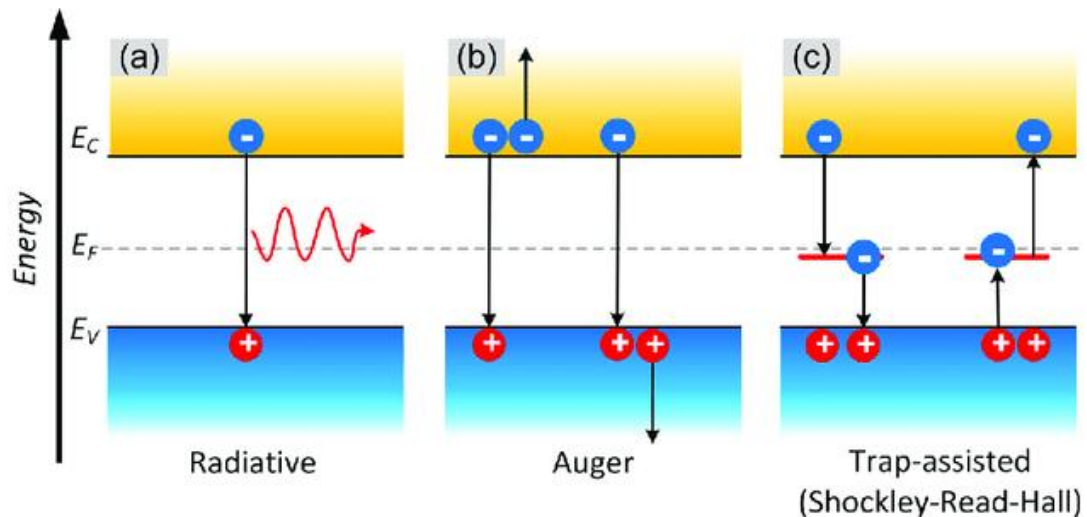


Figure II.8 Différents types de recombinaisons [38]

II.12.1 Recombinaison shockley-read-hall

Le mécanisme de recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH) se fait par l'intermédiaire d'un défaut dans le gap (défauts structuraux, impuretés, etc.) qui peut être un centre recombinant pour les porteurs libres. Selon le niveau énergétique introduit par le défaut dans le gap et la section efficace de capture de ce défaut, un type de porteur peut être plus facilement capturé qu'un autre. A noter que le phénomène inverse existe également où un trou ou un électron peuvent être émis. Ce type de recombinaison est très probable dans les matériaux possédant une forte densité de défauts, ce qui est le cas des nitrures [39].

II.12.2 Recombinaison radiative (bande à bande)

Cette recombinaison est spontanée et correspond à la transition d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence avec émission d'un photon. Ce photon peut éventuellement être absorbé et engendrer la formation d'une nouvelle paire électron-trou [39].

II.12.3 Recombinaison Auger

La recombinaison Auger est non radiative et implique l'interaction de trois particules. Lorsqu'une paire électron-trou se recombine, l'énergie libérée est transférée à un autre porteur libre (électron ou trou) sous forme d'énergie cinétique dissipée par la suite par interaction avec les phonons. Ce type de transition bande à bande dans le cas d'un transfert d'énergie à un électron libre [39].

II.13 Équation fondamentales dans les semi-conducteurs

Trois équations aux dérivées partielles, non linéaires, décrivant le comportement électrique des semi-conducteurs dans un état stationnaire sont présentées ci-dessous.

II.13.1 Équation de poisson

L'équation de Poisson, issue du théorème de Gauss, exprime la variation spatiale du champ électrique due à une densité locale de charge [35]:

$$\text{div}(\varepsilon \Delta \varphi) = -\rho \quad (\text{II.19})$$

Avec:

φ : représente le potentiel électrostatique

ε : désigne la permittivité absolue du matériau, qui peut être exprimée par le produit de sa permittivité relative multipliée par la permittivité du vide $\varepsilon_0 \times \varepsilon_r$

ρ : est la densité volumique nette de charges libres.

Le champ électrique est donné par la relation [23]:

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}(\varphi) \quad (\text{II.20})$$

II.13.2 Équation de continuité

L'équation de continuité est une équation locale valable en chaque point du semi-conducteur et à chaque instant, elle s'écrit pour les électrons et les trous [37]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div} \vec{j}_n + G_n - R_n \quad (\text{II.21})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \text{div} \vec{j}_p + G_p - R_p \quad (\text{II.22})$$

Avec :

G_n et G_p : taux de génération pour les électrons et les trous par des agents externes respectivement.

R_n et R_p : taux de recombinaisons (internes) pour les électrons et les trous respectivement .

J_n et J_p : densités des courants des électrons et des trous respectivement.

II.13.3 Équation de transport

Le déplacement des porteurs de charges se fait soit sous l'effet d'un champ électrique soit sous l'action d'un gradient de concentration de porteurs de charges. Sous l'action d'un champ électrique, on a un courant appelé courant de dérive (ou courant de conduction) proportionnel au champ électrique, défini par la relation suivante[37] :

$$\vec{J}_n = n \cdot q \cdot \mu_n \cdot \vec{E} \quad (\text{II.23})$$

$$\vec{J}_p = n \cdot q \cdot \mu_p \cdot \vec{E} \quad (\text{II.24})$$

Avec:

E: champ électrique.

μ_n et μ_p : mobilités des électrons et des trous respectivement.

Sous l'action d'un gradient de la densité des porteurs, le mouvement de ces derniers s'effectue des régions à forte concentration vers les régions à faible concentration [37]. On a un courant qui porte le nom de courant de diffusion :

$$\vec{J}_n = q \cdot D_n \cdot \nabla_n \quad (\text{II.25})$$

$$\vec{J}_p = - q \cdot D_p \cdot \nabla_p \quad (\text{II.26})$$

D_n et D_p Sont les constantes de diffusion des électrons et des trous [37]. Elles sont définies par la relation d'Einstein :

$$D_n = \frac{K_B \cdot T}{q} \cdot \mu_n \quad (\text{II.27})$$

$$D_p = \frac{K_B \cdot T}{q} \cdot \mu_p \quad (\text{II.28})$$

K_B : La constante de Boltzmann.

T: la température.

En faisant la somme de ces deux types de courants (courant de dérive et diffusion) on obtient [37]:

$$\vec{J}_n = n \cdot q \cdot \mu_n \cdot \vec{E} + q \cdot D_n \cdot \nabla_n \quad (\text{II.29})$$

$$\vec{J}_p = n \cdot q \cdot \mu_p \cdot \vec{E} - q \cdot D_p \cdot \nabla_p \quad (\text{II.30})$$

II.14 Conclusion

Ce chapitre analyse les définitions et les propriétés fondamentales des semi-conducteurs III-V et du nitrure de gallium. De plus, il expose les équations essentielles qui définissent le comportement physique des semi-conducteurs.

Le chapitre suivant portera sur la simulation de différentes couches d'InGaN. Nous présenterons les résultats de ces simulations, en examinant en détail les performances, les propriétés spécifiques et les applications potentielles de ces structures.

Chapitre III

Simulation et interprétation des résultats

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons en détail le logiciel SCAPS-1D ainsi que son principe de fonctionnement. Ensuite, nous effectuerons la simulation de deux cellules solaires à base d'InGaN en hétérojonction de type PN, tout en variant le gap, l'épaisseur et la concentration du dopage. L'objectif est de déterminer les meilleurs paramètres pour lesquels nos cellules atteignent le meilleur rendement.

III.2 Présentation du logiciel SCAPS-1d

La simulation est un outil puissant utilisé pour analyser et comprendre les phénomènes physiques présents dans les dispositifs à semi-conducteurs.

En vue de la modélisation et de la simulation de cellules solaires, de nombreux logiciels ont été élaborés au cours du temps. SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulation One Dimension) est le simulateur qui fera l'objet de notre étude ; il s'agit d'un programme unidimensionnel de simulation établi par le département de l'électronique et système d'information de l'université de Gent, Belgique[40].

SCAPS est spécialement conçu pour la simulation des cellules solaires à hétérojonction. Il permet de calculer les paramètres photovoltaïques tels que le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le rendement, le facteur de forme et le rendement quantique. Le logiciel calcule les bandes d'énergie, les caractéristiques I-V ainsi que la réponse spectrale.

III.2.1 Fonctionnement du logiciel

Le logiciel est divisé en de nombreux panneaux, dont chacun permet à l'utilisateur de définir les paramètres et de calculer les résultats.

La fenêtre principale de SCAPS (Figure III.1) est l'interface du panneau de lancement du logiciel appelée "Action Panel". Tous les paramètres de simulation externes peuvent être manipulés à travers ce panneau.



Figure III.1 fenêtre d'exécution du logiciel SCAPS-1D

La signification des blocs numérotés de 1 à 5 est expliquée dans le Tableau II.1.

Tableau III.1 Signification des blocs de logiciel SCAPS-1D.

Blocs	Signification
1	Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
2	spécifier le point de fonctionnement
3	Indiquer la mesure ou la caractéristique à simuler.
4	Commencer le calcul.
5	Afficher les courbes de simulation.

III.2.2 Édition de la structure d'une cellule solaire

On clique sur le bouton 'Set Problem' sur le panneau d'action, le panneau 'SOLAR CELLDEFINITION' s'affichera. Ce dernier permettra de créer ou de modifier les structures des cellules solaires et de les enregistrer, ou bien de les charger à partir d'autres fichiers. Ces fichiers de définition sont des fichiers standards ASCII (American Standard Code for Information Inter change) d'extension qui peuvent s'ouvrir avec notepad.exe ou Wordbad.exe. Il est déconseillé de les modifier au risque de les rendre inutilisables par la suite. Les propriétés des couches, des contacts et d'interfaces peuvent être modifiées. De la même manière, des couches peuvent être

rajoutées en cliquant « ADD LAYER » [40].

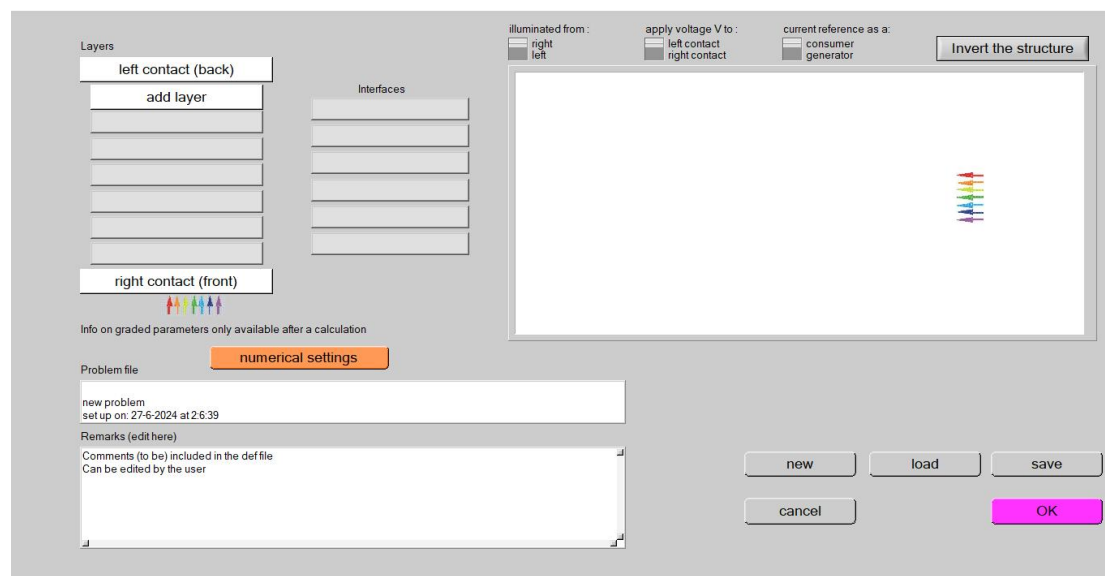


Figure III.2 Interface de la définition des couche des la cellule

III.2.3 Propriétés des contacts

Les propriétés des contacts se divisent en deux catégories : électriques et optiques. Pour les propriétés électriques, on définit les vitesses de recombinaison surfacique des électrons et des trous libres, la présence d'un travail de sortie du contact ou sa condition idéale (régime de bandes plates), la barrière des porteurs majoritaires, et l'effet tunnel si celui-ci doit être pris en compte. Concernant les propriétés optiques, la transmission ou la réflexion peuvent être définies soit par une valeur fixe, soit par un fichier de données.

III.2.4 Couches

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre s'ouvre qui contient les Différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau,(voir Figure III.3).

The screenshot shows the SCAPS-1D software interface for defining layer parameters. The interface is divided into several sections:

- LAYER 1 (InGaN type p):**
 - thickness (μm): 2000
 - The layer is pure A: y = 0, uniform
 - Semiconductor Property P of the pure material: pure A (y = 0)
 - bandgap (eV): 1.300
 - electron affinity (eV): 5.400
 - dielectric permittivity (relative): 13.130
 - CB effective density of states (1/cm³): 1.400E+18
 - VB effective density of states (1/cm³): 4.075E+19
 - electron thermal velocity (cm/s): 1.000E+7
 - hole thermal velocity (cm/s): 1.000E+7
 - electron mobility (cm²/Vs): 1.000E+3
 - hole mobility (cm²/Vs): 1.700E+2
 - effective mass of electrons: 1.000E+0
 - effective mass of holes: 1.000E+0
 - no ND grading (uniform)
 - shallow uniform donor density ND (1/cm³): 1.000E+1
 - no NA grading (uniform)
 - shallow uniform acceptor density NA (1/cm³): 1.000E+19
- Recombination model:**
 - Band to band recombination
 - Radiative recombination coefficient (cm³/s): 0.000E+0
 - Auger electron capture coefficient (cm⁶/s): 0.000E+0
 - Auger hole capture coefficient (cm⁶/s): 0.000E+0
 - Recombination at defects: Summary
- Absorption interpolation model:**
 - alpha pure A material (y=0)
 - from file [] from model
 - Set absorption model
 - List of absorption submodels present: sqrt(hv-Eg) law (SCAPS traditional)
- Buttons:** Add a Defect 1, Accept, cancel, Load Material, Save Material

Figure III.3 Définition des paramètres des couches de la cellule

Pour modéliser une couche dans un espace 1D, il est crucial de renseigner des informations spécifiques dans chaque case. Les paramètres à entrer incluent le nom de la couche, le type de dopage (par exemple "N" ou "P"), l'épaisseur de la couche en nanomètres, le gap d'énergie en électron-volts (eV), l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, les vitesses thermiques des électrons et des trous libres, et les mobilités des électrons et des trous. Si le transport des porteurs par effet tunnel est pris en compte, les masses effectives des électrons et des trous doivent être ajoutées. Pour les matériaux composés avec des concentrations non uniformes, il est important de spécifier les variations graduelles des paramètres.

III.3 Résultats de la simulation

Notre objectif dans ce chapitre est de faire la simulation de deux cellules hétérojonctions InGaN/InN et GaN/InGaN avec le logiciel SCAPS-1D. Afin de comprendre leurs mécanismes physiques et leurs caractéristiques électriques qui sont d'une grande importance pour leurs développement dans le but de désigner et optimiser d'autres structures (voir Figure III.4).

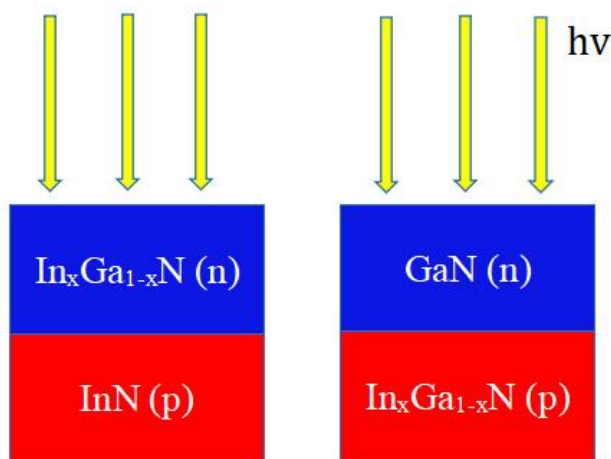


Figure III.4 Structures des cellules PN

Pour déterminer les paramètres de couche $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, on a créé un programme Matlab qui fait varier la fraction molaire d'Indium x (de 0.1 à 0.9) et calcule en fonction de cette fraction molaire l'indice de réfraction n , le gap d'énergie interdite (eV), la densité d'états effective de la bande de conduction N_c et la densité d'états effective de la bande de valence N_v . Ensuite, on introduit ces paramètres dans le logiciel SCAPS-1D pour effectuer nos simulations.

III.3.1 Cellule $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{InN}$

III.3.1.1 Effet du gap de la couche $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ sur le rendement de la cellule

Pour obtenir la meilleure fraction molaire x qui donne le meilleur rendement de la cellule $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}(n)/\text{InN}(p)$ (figure III.5 (a)), on fait varier le gap de la couche $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ de 0.7 jusqu'à 3.3 eV. Les résultats de cette simulation sont présentés sur la figure (III-6).

La simulation par variation de la fraction molaire d'Indium pour notre première cellule a montré que le meilleur rendement correspond à une concentration $x=0.8$.

Les paramètres utilisés pour cette simulation sont présentés sur le Tableau III.2

Tableau III.2 Paramètres utilisé pour la simulation de la cellule $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}/\text{InN}$

Paramètres	$\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$	InN
Épaisseur (μm)	0.01	2
Gap d'énergie interdite (eV)	variable	0.77
Affinité électronique(eV)	5.46	5.8
La permittivité diélectrique	13.1	15.3
Densité d'états effective de la bande de conduction N_c (cm^{-3})	1.18×10^{18}	9×10^{17}
Densité d'états effective de la bande de valence N_v (cm^{-3})	4.6×10^{19}	5.3×10^{19}
Mobilité des électrons($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$)	1000	3200
Mobilité des trous ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$)	170	36
N_D (cm^{-3})	10^{19}	10
N_A (cm^{-3})	10	10^{19}

La Figure III.5 présente la variation de la tension a circuit ouvert (V_{oc}), la densité de courant (J_{sc}), le facteur de forme (FF)et le rendement (η) en fonction de la variation du gap de la couche $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}(n)$ (variation de la fraction molaire de In). Les résultats montrent que les paramètres de la cellule dépendent de la concentration de l'indium dans la couche.

Les résultats montrent que les trois paramètres électriques (V_{oc} , FF et η) évoluent de manière similaire avec l'augmentation de l'énergie de bande interdite, jusqu'à atteindre des valeurs optimisées à une énergie de gap qui est égale à 0,9 ensuite ils gardent presque le même rythme pour le reste de la variation.

Les bons paramètres sont : $V_{oc} = 0,633$ V, FF= 83,32 %, $\eta = 31,88$ %

Le courant de court-circuit augmente progressivement avec l'augmentation de l'énergie de gap jusqu'à atteindre une valeur de 60,5 mA/cm².

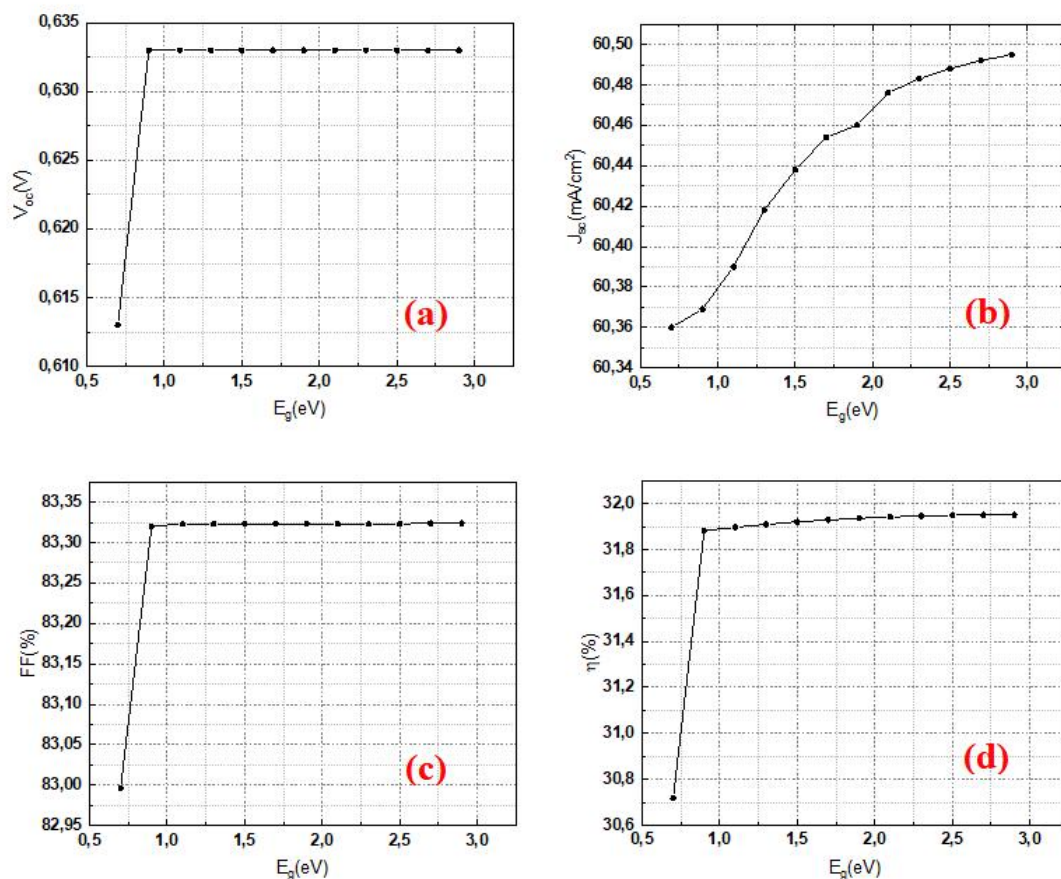


Figure III.5 Effet de la variation du gap de la couche InGaN sur les paramètres (J_{sc} , V_{oc} , FF, η) de la cellule.

III.3.1.2 Effet de l'épaisseur de la couche $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$ sur le rendement de la cellule

Une fois la fraction molaire de la couche est fixée. Nous passons à l'optimisation de l'épaisseur de cette couche. On fait varier l'épaisseur de la couche $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ de 0.01 jusqu'à 2 μm . Les résultats de cette simulation sont illustrés sur la Figure III.6:

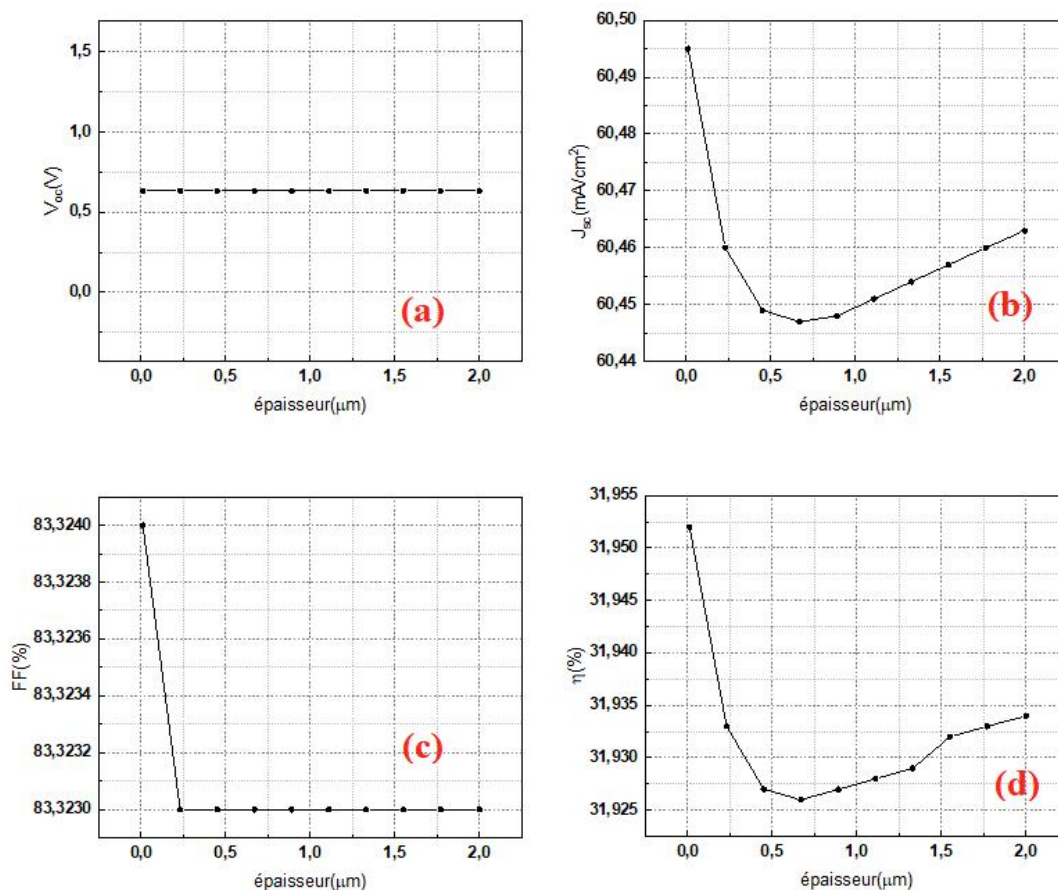


Figure III.6 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche InGaN sur les paramètres (J_{sc} , V_{oc} , FF, η) de la cellule.

Le V_{oc} est indépendant de l'épaisseur de la couche il est égale à 0,633 V.

Pour les deux paramètres J_{sc} et η suivent la même tendance ; ils atteignent des valeurs maximales à une épaisseur égale à 0,01 μm , puis ces valeurs diminuent pour atteindre des valeur minimales a une épaisseur égale à 0,67 μm , ensuite ils augmentent légèrement pour les grandes épaisseurs. Le facteur de forme FF commence par une diminution légère entre l'épaisseur 0,01 μm et 0,023 μm après une stabilisation pour tout le reste de la variation.

III.3.1.3 Effet du dopage de la couche $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$ sur le rendement de la cellule

Dans ce qui se suit on va optimiser le dopage de cette couche. Donc nous allons varier la concentration N_D de 10^{16}cm^{-3} jusqu'à $5 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$, pour identifier les valeurs optimales du dopage. Les résultats de la simulation sont montrés sur la Figure III.7.

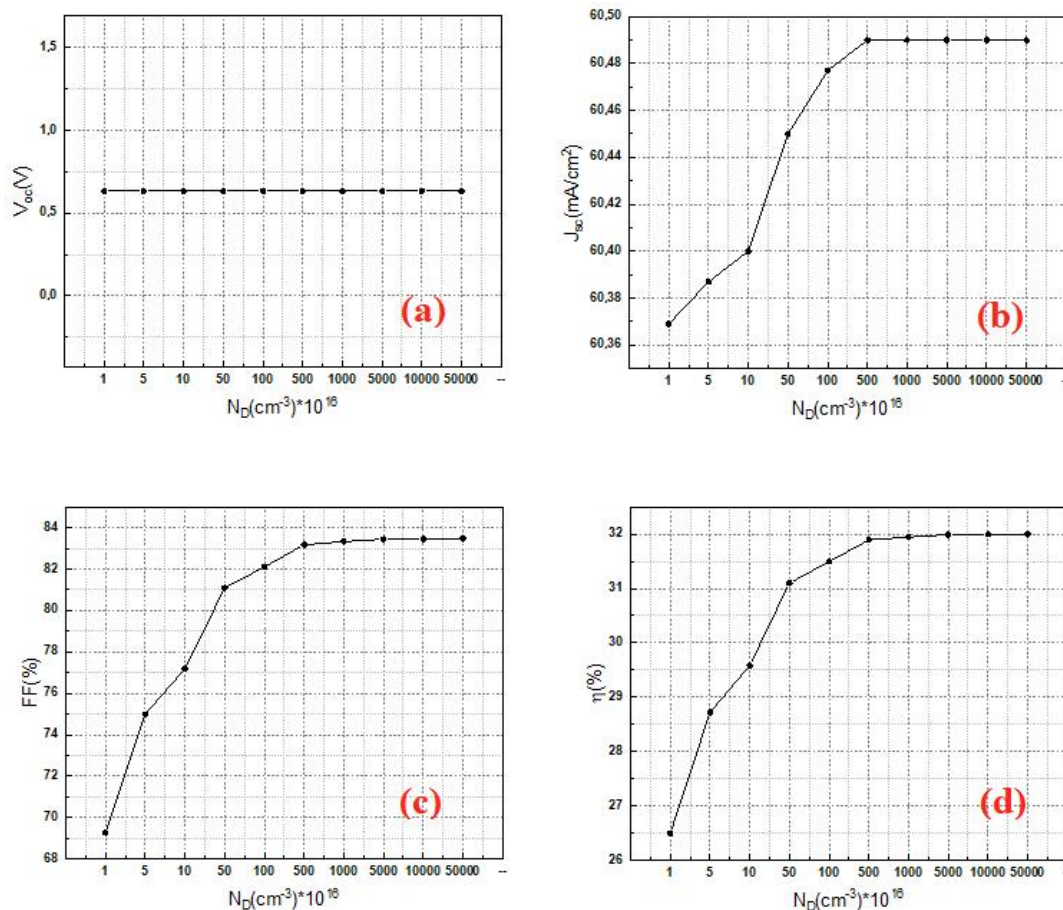


Figure III.7 Effet de la variation du dopage de la couche InGaN sur les paramètres (J_{sc} , V_{oc} , FF, η) de la cellule.

La tension de circuit-ouvert n'est pas influencée par la variation de la concentration des donneurs N_D , elle reste stable à une valeur égale à 0,633V. Par contre, les autres paramètres augmentent avec l'augmentation de N_D . Les meilleurs résultats sont obtenus à partir d'un dopage de $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$. On remarque que la densité de courant de court-circuit atteint des valeurs optimales allant jusqu'à 60,49 mA/cm^2 pour un dopage entre $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ et $5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$.

III.3.1.4 Effet l'épaisseur de la couche InN sur le rendement de la cellule

Pour déterminer la valeur optimale de l'épaisseur de la couche InN on a fait varier l'épaisseur de la couche InN de 0.01 à 2 μm . Cette variation a conduit aux résultats illustrés dans la Figure III.8.

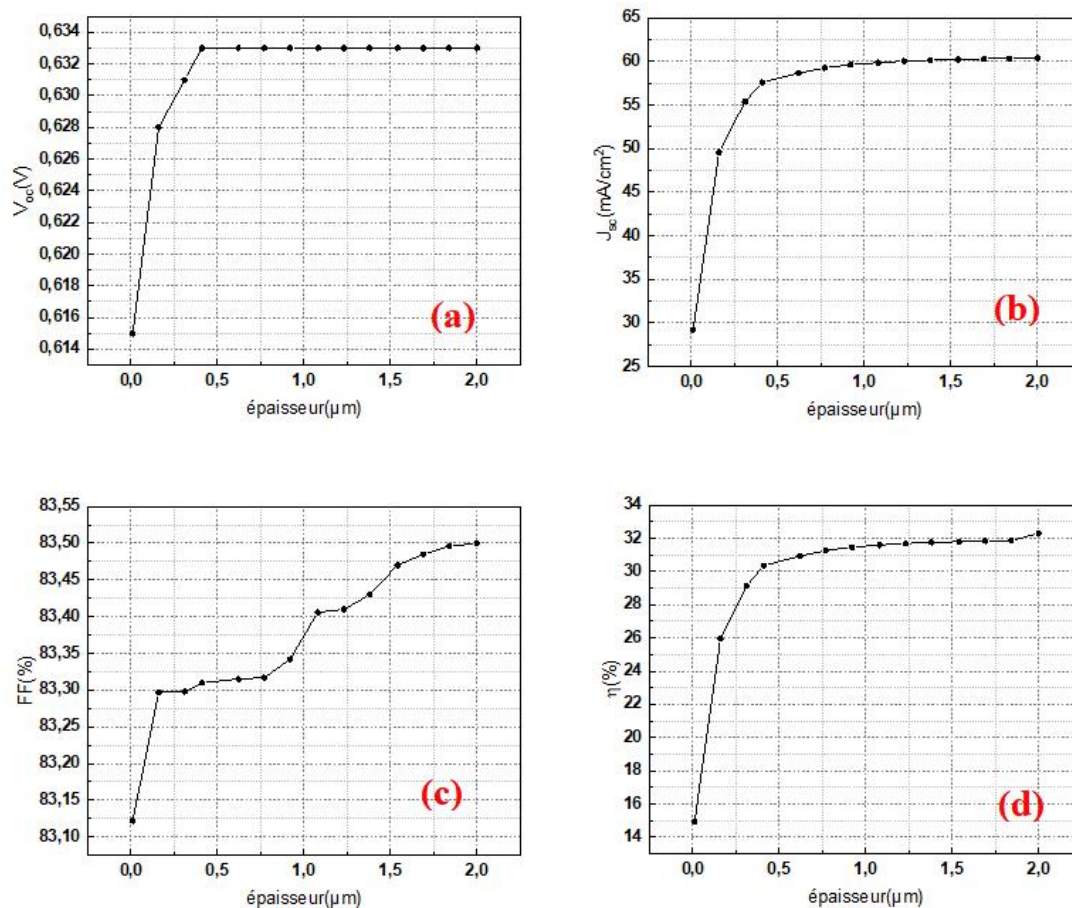


Figure III.8 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche InN sur les paramètres (J_{sc} , V_{oc} , FF, η) de la cellule.

La tension de circuit-ouvert augmente en fonction de l'épaisseur jusqu'à atteindre 0,633V lorsque l'épaisseur atteint 0,62 μm , puis elle demeure stable quel que soit le changement d'épaisseur.

La variation du courant de court-circuit est similaire à celle du V_{oc} , avec une valeur optimale qui est égale à 60,02 mA/cm^2 à une épaisseur égale à 1,23 μm puis reste constant pour la suite de cette variation.

Le facteur de forme s'accroît progressivement avec l'épaisseur, atteignant la valeur 84,46% à une épaisseur de 2 μm .

Le rendement de la cellule suit également la même tendance de V_{oc} , il augmente jusqu'à atteindre une valeur égale à 31,88% pour une épaisseur de 2 μm .

III.3.1.5 Effet du dopage de la couche InN sur le rendement de la cellule

Pour optimiser le dopage de la couche InN. On va varier la concentration de son

dopage N_A (puisque'elle est de type P) de 10^{16} jusqu'à 1×10^{20} . Les résultats de la simulation sont montrés sur la Figure III.9.

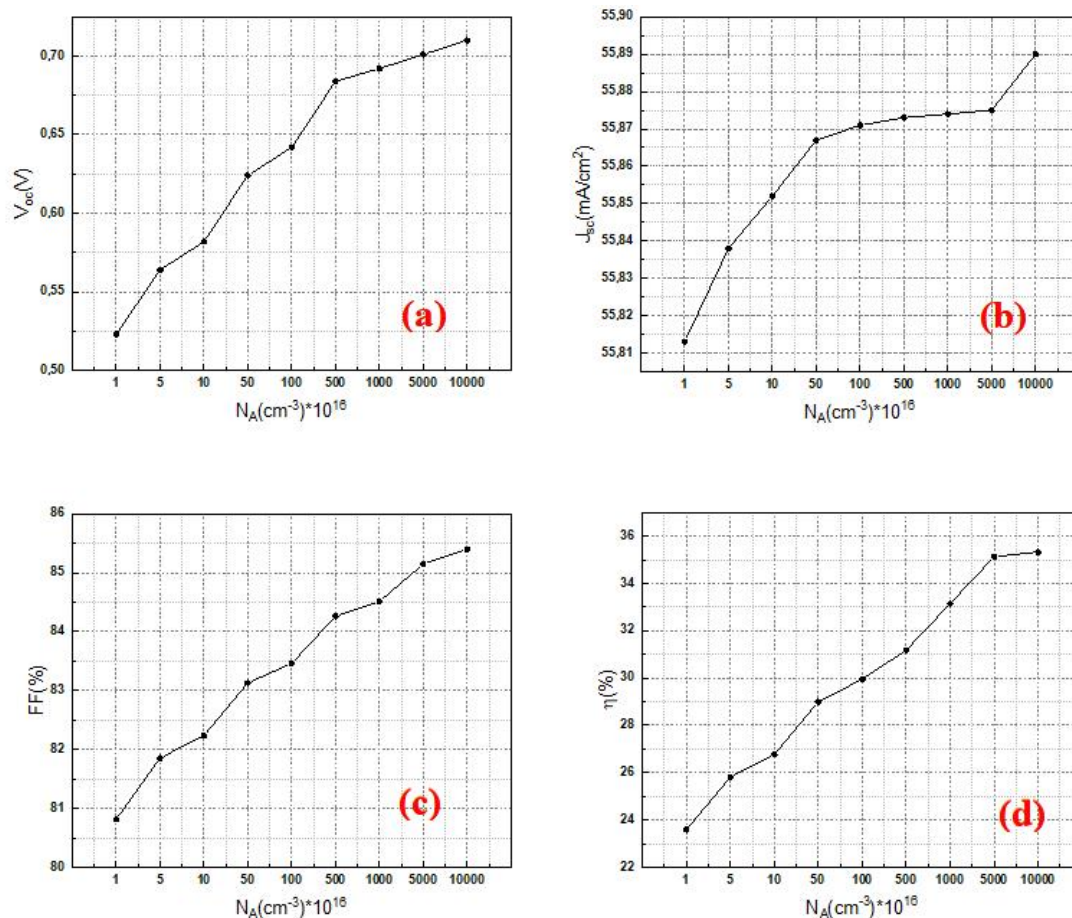


Figure III.9 Effet de la variation du dopage InN sur les paramètres (J_{sc} , V_{oc} , FF, η) de la cellule.

Les résultats montrent que les quatre paramètres électriques (V_{oc} , J_{sc} , FF et η) de la cellule suit la même tendance. Ils augmentent avec l'augmentation du dopage et atteignent les valeurs suivantes au dopage 10^{20} cm^{-3} :

$$V_{oc} = 0.710 \text{ V}$$

$$J_{sc} = 55.87 \text{ mA}/\text{cm}^2$$

$$\text{FF} = 85.398 \%$$

$$\eta = 35.33 \%$$

III.3.2 Cellule $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$

III.3.2.1 Effet du gap de la couche $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ sur le rendement de la cellule

Afin de déterminer la fraction molaire de In dans la couche $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ pour le cas de la cellule $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}(\text{n})/\text{GaN}(\text{p})$, nous avons fait varier le gap de la cellule de 0.9 eV jusqu'à 3.3 eV. Les résultats de simulation révèlent que la fraction molaire d'Indium molaire optimale de la cellule est de $x=0.66$.

Les paramètres utilisés dans cette simulation sont récapitulés sur le Tableau III.3.

Tableau III.3 Paramètres utilisé pour la simulation de la cellule $\text{GaN}/\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$

Paramètres	$\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$	GaN
Épaisseur (μm)	2	0.1
Gap d'énergie interdite (eV)	1.3	3.39
Affinité électronique(eV)	5.4	4.9
La permittivité diélectrique	13.1	9
Densité d'états effective de la bande de conduction N_c (cm^{-3})	1.4×10^{18}	2.3×10^{18}
Densité d'états effective de la bande de valence N_v (cm^{-3})	4.075×10^{19}	4.6×10^{19}
Mobilité des électrons($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$)	1000	1400
Mobilité des trous ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$)	170	20
N_D (cm^{-3})	10	10^{19}
N_A (cm^{-3})	10^{19}	10

Figure III.10 montre la variation des principaux paramètres de la cellule en fonction de l'énergie de gap de la couche

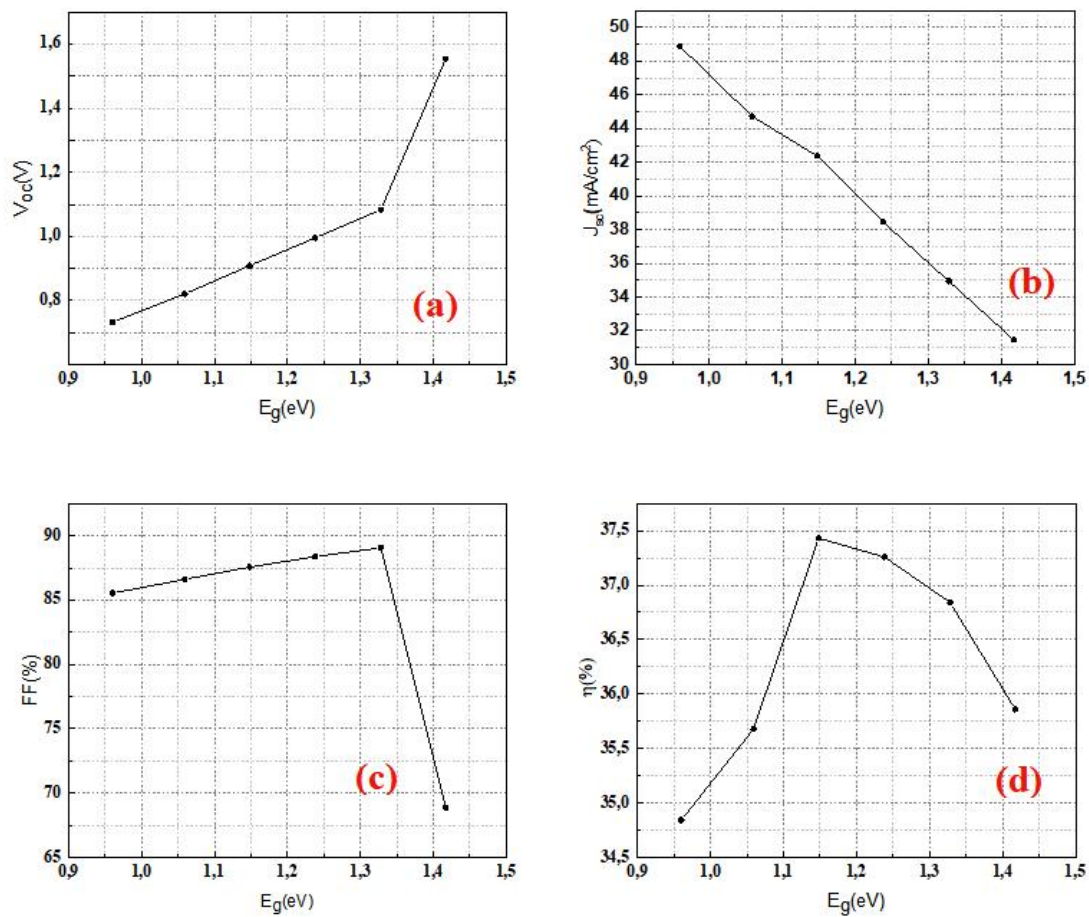


Figure III.10 Effet de la variation du gap InGaN sur les paramètres (J_{sc}, V_{oc}, FF, η) de la cellule.

La tension V_{OC} croît avec l'augmentation du gap. Par contre le courant de court circuit diminue avec l'augmentation de ce dernier. Le facteur de forme augmente avec E_g , il atteint la valeur de 88,8% pour une valeur de gap de $E_g = 1,33$ eV, ensuite il chute rapidement. En fin pour le rendement, on remarque une croissance totale où il atteint son optimum à la valeur 37,4 %, après il diminue pour le reste de la variation.

III.3.2.2 Effet de l'épaisseur de la couche $In_{0.66}Ga_{0.34}N$ sur le rendement de la cellule

Dans ce qui se suit on va optimiser l'épaisseur de cette couche. Donc on va faire varier son épaisseur de $0.01\mu m$ jusqu'à $2\mu m$. Les résultats de cette étude sont présentés sur la figure III.11.

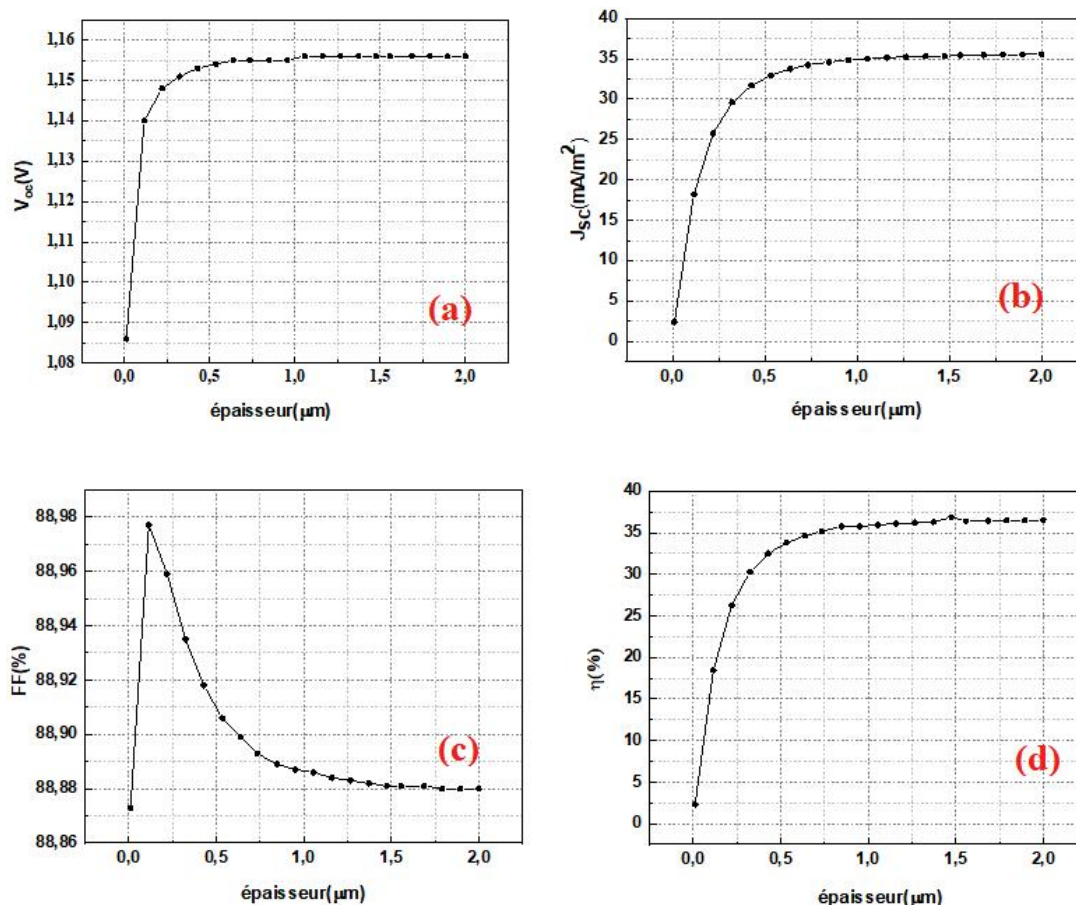


Figure III.11 Effet de la variation de l'épaisseur InGaN sur les paramètres

(J_{sc} , V_{oc} , FF, η) de la cellule.

La tension en circuit-ouvert croît de manière graduelle en réponse à l'augmentation de l'épaisseur, suivant une tendance exponentielle décroissante, pour se stabiliser à 1.15 V une fois que l'épaisseur atteint 1 μm . La même observation pour courant de court-circuit et le rendement. Le courant de court-circuit et le rendement se stabilisent respectivement à une valeur égale à 35 mA/cm^2 et de 35.5% à partir de l'épaisseur 1 μm . Le facteur de forme diminue progressivement avec l'augmentation de l'épaisseur.

III.3.2.3 Effet du dopage de la couche $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$ sur le rendement de la cellule

La Figure III.12 présente la variation des différents paramètres de la cellule en fonction du dopage de la couche $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$.

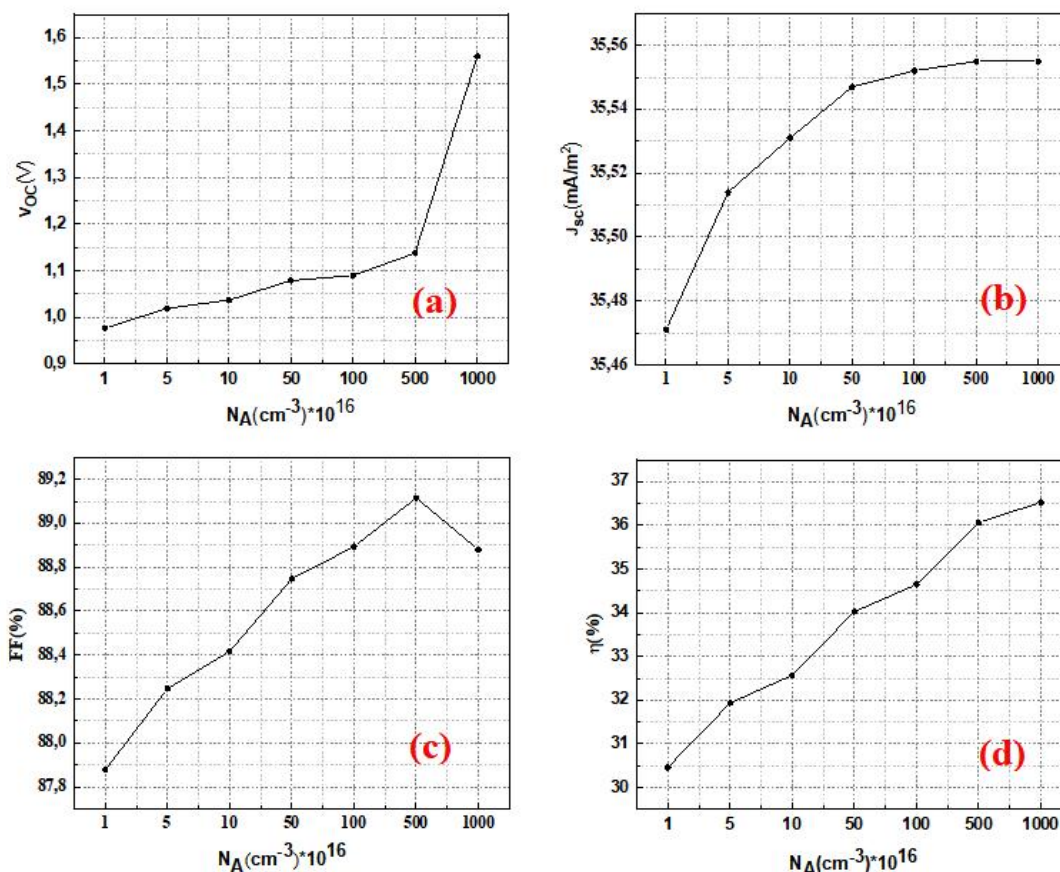


Figure III.12 Effet de la variation du dopage InGaN sur les paramètres (J_{sc} , V_{oc} , FF, η) de la cellule.

Une augmentation progressive de la tension de circuit-ouvert avec l'augmentation du dopage est constatée, suivie par une augmentation significative à partir d'un dopage de $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ pour atteindre un pic à 1.56 V au dopage de 10^{19} .

Le courant de court-circuit s'accroît avec l'augmentation du dopage, jusqu'à atteindre une valeur est égale à $35.55 \text{ mA}/\text{cm}^2$ situé entre $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ et 10^{19}cm^{-3} .

Le facteur de forme augmente avec la concentration des accepteurs N_A jusqu'à atteindre une valeur optimale qui est égal à 89.12% pour un dopage de $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ au-delà de cette concentration le facteur de forme rechute.

Le rendement de la cellule croît avec la densité des accepteurs N_A jusqu'à atteindre une efficacité maximale de 36.53% pour une concentration de dopage de 10^{19}cm^{-3} .

III.3.2.4 Effet de l'épaisseur de la couche GaN sur le rendement de la cellule

L'évolution des principaux paramètres électriques de cette cellule en fonction de l'épaisseur de la couche GaN est illustrée sur la Figure III.13.

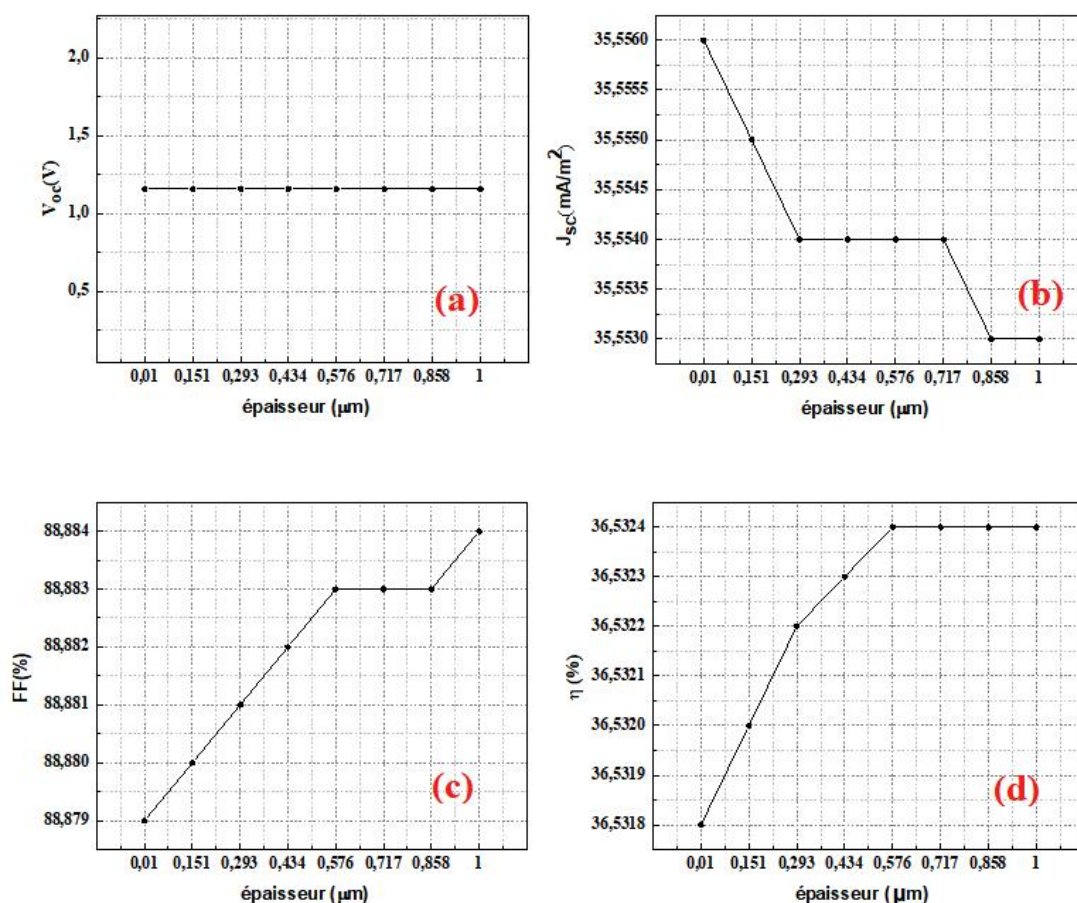


Figure III.13 Effet de la variation de l'épaisseur GaN sur les paramètres (J_{sc} , V_{oc} , FF, η) de la cellule.

Les résultats montrent que la valeur de la tension circuit-ouvert est indépendante de la valeur de l'épaisseur. Elle est égale à 1,156V tout au long de la plage de variation.

Le courant de court-circuit diminue dans les intervalles de l'épaisseur l'intervalle [0,01 - 0,293] et [0,717 - 0,858] et il se stabilise dans les intervalles [0,293- 0,717] et [0,858 - 1]. Par contre, le rendement de la cellule augmente avec l'épaisseur de la couche jusqu'à la valeur de 0,576 μm où le rendement atteint sa valeur optimale de 36,5324%, après il stabilise pour tout le reste de la variation.

III.3.2.5 Effet de dopage de la couche GaN sur le rendement de la cellule

Le dopage de la couche GaN a également un impact sur les caractéristiques de la cellule

La Figure III.14 montre la variation de principaux paramètres de la cellule en fonction du dopage de la couche GaN.

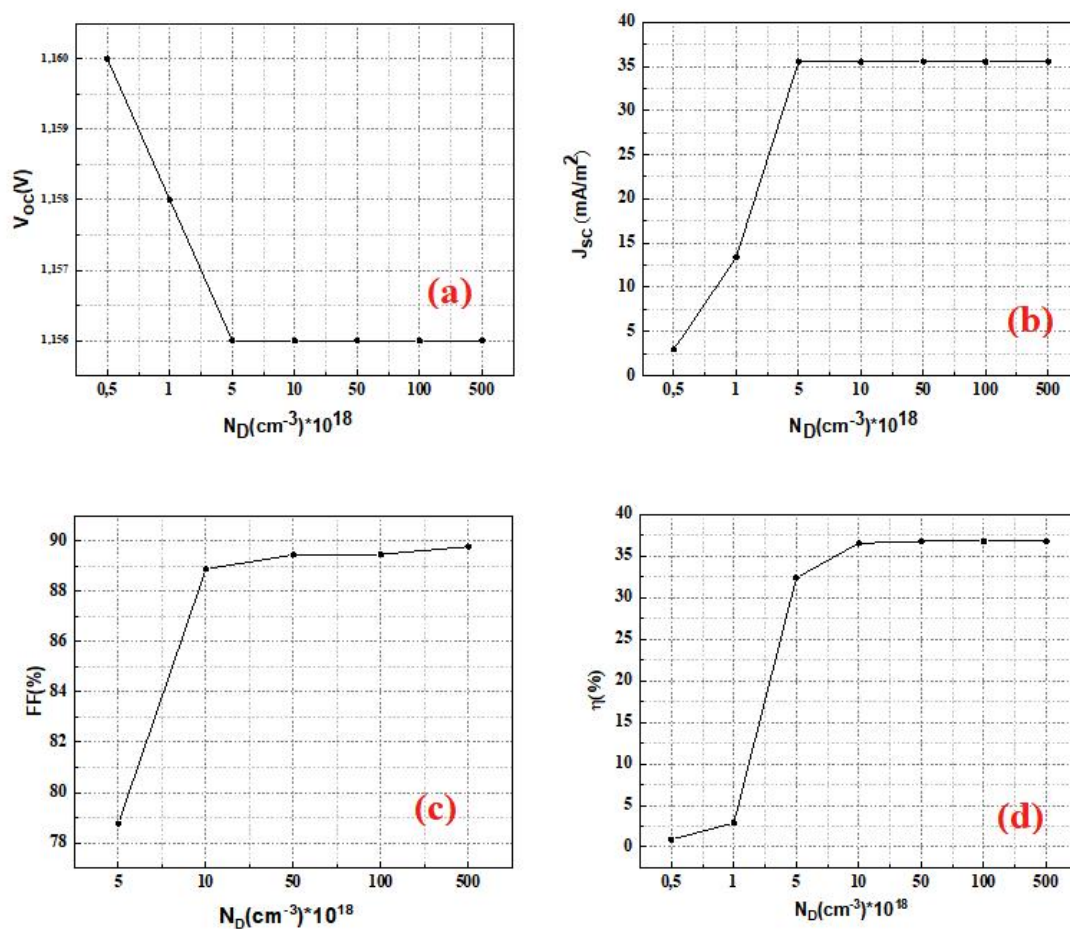


Figure III.14 Effet de la variation du dopage GaN sur les paramètres (J_{sc} , V_{oc} , FF, η) de la cellule.

On remarque que la variation de la tension de circuit-ouvert chute rapidement avec l'augmentation de N_D ensuite il se stabilise. Les autres paramètres augmentent avec N_D et un meilleur rendement de la cellule est obtenu avec un dopage de 10^{19} cm^{-3} .

III.3.3 Cellules optimisés de ($\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N} / \text{InN}$) et ($\text{GaN}/\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$)

Après avoir simulé et examiné les résultats, nous avons gardé les meilleurs paramètres pour chaque couche de chaque cellule, afin de concevoir des cellules optimisées avec un meilleur rendement tout en minimisant la quantité de matériaux.

Dans les sections à suivre on va exposer la caractéristique courant-tension de chaque cellule et les paramètres électriques qui vont avec.

III.3.3.1 La caractéristique courant-tension de la cellule optimisée

$\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N} / \text{InN}$

La Figure III.15 représente la $I(V)$ de la cellule optimisée $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N} / \text{InN}$.

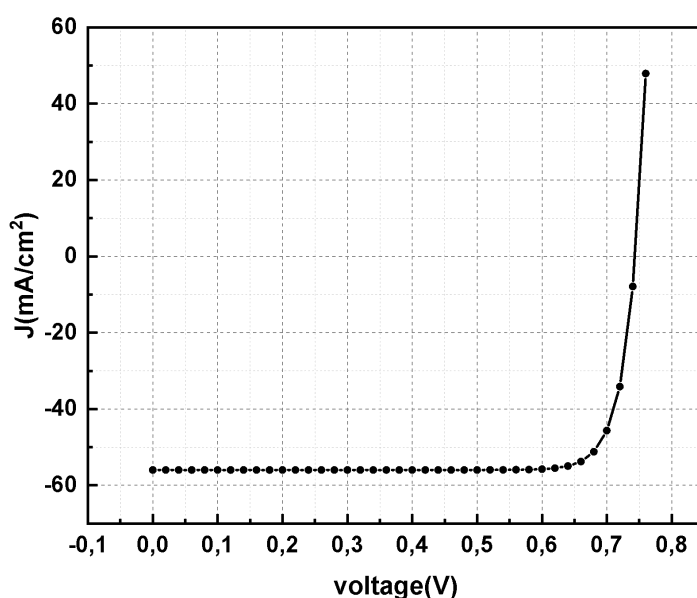


Figure III.15 La caractéristique courant-tension de la cellule $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}/\text{InN}$.

Les paramètres caractéristiques de la cellule optimisée $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}/\text{InN}$ sont récapitulés sur le Tableau III.4

Tableau III.4 Paramètres caractéristiques de la cellule optimisée $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}/\text{InN}$

Paramètres	Couche InN	Couche $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$
Epaisseur (μm)	0.01	2
Gap E_g (eV)	0.7	0.9
Concentration de dopage en (cm^{-3})	10^{19}	10^{19}

Les paramètres électriques de la cellule optimisée $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}/\text{InN}$ sont :

$$V_{oc}=0.743 \text{ V} ; J_{SC}=55.972 \text{ mA/cm}^2 ; FF=85.26 \% ; \eta=35.489 \%$$

III.3.3.2 La caractéristique courant-tension de la cellule optimisé $\text{GaN}/\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$.

La Figure III.16 représente la $I(V)$ de la cellule optimisé $\text{GaN}/\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$

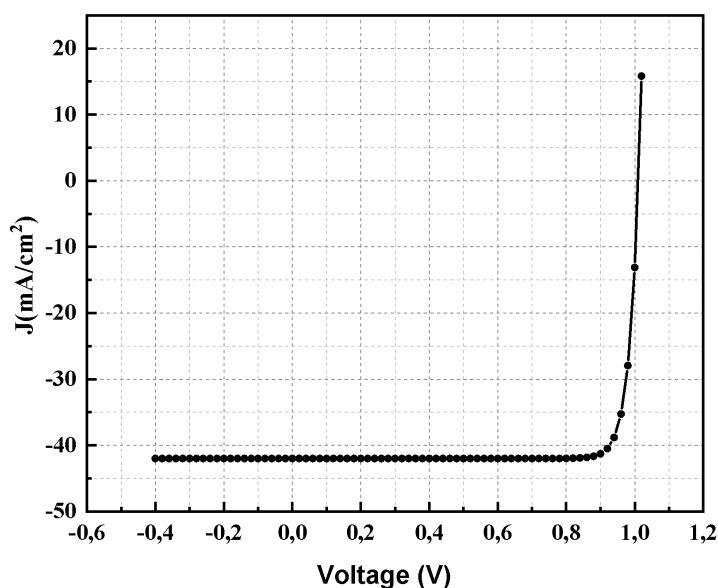


Figure III.16 La caractéristique courant-tension de la cellule $\text{GaN}/\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$.

Les paramètres caractéristiques de la cellule optimisé $\text{GaN}/\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$ sont récapitulés sur le Tableau III.5.

Tableau III.5 Paramètres caractéristiques de la cellule optimisé $\text{GaN}/\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$.

Paramètres	Couche GaN	Couche $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$
Epaisseur (μm)	0.576	1.5
Gap $E_g(\text{eV})$	3.39	1.15
Concentration de dopage en (cm^{-3})	10^{19}	10^{19}

Les paramètres électriques de la cellule optimisée $\text{GaN}/\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$ sont

$$V_{oc}=1.010 \text{ V} ; J_{SC}=42.00 \text{ mA/cm}^2 ; FF=87.87\% ; \eta=37.28\%$$

III.4 Conclusion

La simulation des cellules à base de nitrure de gallium avec le logiciel SCAPS-1D nous a permis de déterminer les meilleurs paramètres aboutissant à un rendement optimal. Ces résultats ouvrent la voie à des applications potentielles dans le domaine des énergies renouvelables, particulièrement pour les dispositifs photovoltaïques de nouvelle génération.

La simulation a permis de déterminer que les paramètres optimaux pour la cellule $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}/\text{InN}$ sont une épaisseur de $0.01 \mu\text{m}$ pour la couche de $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$, un gap de 0.9 eV et une concentration de dopage de 10^{19} cm^{-3} . Les meilleurs paramètres électriques obtenus sont un $V_{oc} = 0.633 \text{ V}$, $J_{sc} = 605 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 83.32 \%$ et un rendement η de 31.88% .

Pour la cellule $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}/\text{GaN}$ sont une épaisseur de $1.5 \mu\text{m}$ pour la couche de $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$, un gap de 1.15 eV et une concentration de dopage de 10^{19} cm^{-3} . Les meilleurs paramètres électriques obtenus sont un $V_{oc} = 1.01 \text{ V}$, $J_{sc} = 42 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 87.87 \%$ et un rendement η de 37.28% .

Conclusion générale

Notre étude s'est basée sur la simulation de deux cellules solaires à base des nitrures des éléments III-N de type InGaN, avec l'utilisation de modèle PN à l'aide du logiciel SCAPS-1d. Nous avons pu effectuer des simulations détaillées qui ont fourni des informations précieuses sur l'efficacité potentielle des cellules solaires à base d'InGaN.

On a simulé deux types de cellules, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (n)/InN (p) et GaN(n)/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (p). Les résultats montrent que la meilleure fraction molaire de In pour le cas de la cellule $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (n)/InN (p) est de $x=0,8$ et de $x=0,66$ pour le cas de la cellule GaN(n)/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (p) ce qui correspond à une énergie de gap $E_g= 0,96\text{eV}$ et $E_g= 1,148\text{eV}$ respectivement.

Dans notre cas les résultats montrent que la variation de l'épaisseur des couches des cellules étudiées influe énormément sur leurs caractéristiques physiques. Pour le cas de la couche InN une forte croissance de la tension de court-circuit (V_{oc}) jusqu'à atteindre une valeur optimale puis il reste constant pour la suite de variation. Pour la densité de courant et le rendement suivent le même comportement que le V_{oc} .

Pour le cas de la couche $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ une forte croissance de la tension de court-circuit (V_{oc}) jusqu'à atteindre une valeur optimale puis il reste constant pour la suite de variation, même cas pour le rendement.

Cas de la couche GaN, le V_{oc} suit le même comportement pour tout l'intervalle de variation. Pour la densité de courant une décroissance légères tout au long de la variation, le J_{sc} diminue et stabilisé dans des intervalles déférentes de l'épaisseur, le rendement varier d'une manière croissante totale jusqu'à il obtient son optimum qui prendre la valeur de 36.53%.

Pour la couche $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, le V_{oc} augmente progressivement en réponse à l'augmentation de l'épaisseur, puis il reste constant pour la suite de variation, la même observation pour le J_{sc} et η .

Par ailleurs, le dopage des couches influe sur les caractéristiques de la cellule, Pour le cas de la couche InN, les paramètres V_{oc} , J_{sc} et η augmentent avec l'augmentation du dopage.

Cas de la couche $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ le V_{oc} n'est pas influencer par la variation de la concentration des donneurs. Contrairement aux autres paramètres quel sont augmenter par l'augmentation de la concentration N_D .

Cas de la couche GaN, le V_{oc} chute rapidement avec l'augmentation de N_D en suit il se stabilise, pour J_{sc} et η augmentent avec N_D le meilleur rendement obtenu avec un dopage de 10^{19}cm^{-3} .

Cas de la couche $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ augmentation de la valeur de V_{oc} suivi par une augmentation de dopage. Pour η et J_{sc} augmentent avec l'augmentation du dopage.

Conclusion générale

Comme perspective nous souhaitons l'ajout d'une couche supplémentaire d'InGaN à la structure de la cellule solaire $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (n)/InN (p), cette approche présente un potentiel prometteur pour améliorer le rendement. En optimisant les propriétés de cette couche additionnelle, il serait possible d'améliorer l'absorption de la lumière et la collecte des porteurs de charge, ce qui pourrait augmenter la performance globale de la cellule solaire. Cette perspective souligne l'importance de l'innovation matérielle dans la technologie photovoltaïque et ouvre des possibilités pour le développement futur de cellules solaires à haut rendement, contribuant ainsi à l'avancement des solutions d'énergie renouvelable.

Référence

- [1] Chilcott, N. J. A brief history of solar energy. *Solar Energy*, 18(3), 93-111.(1976).
- [2] M. Benaïcha, «Contribution à l'étude des propriétés physiques et électriques des composés semi-conducteurs III-V. Application à l'effet photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université El-hadj Lakhdar–Batna (2018).
- [3] A. Bouchelaghem, F. Meriai, «Étude et simulation d'une cellule photovoltaïque à base de silicium nanocristallin : effet des propriétés électroniques de la couche active», Mémoire de master, Université MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL (2022).
- [4] Y. Marouf, «Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V», Thèse de doctorat, Mohamed Khider–Biskra (2019).
- [5] O. Souilah, «Contribution à la modélisation d'une cellule photovoltaïque multijonction à la base de InGaN», Université Djillali Liabas–Sidi Bel Abbès (2021).
- [6] R. Kihal, «Préparation par électrodéposition de semi-conducteurs en couche minces à base d'étain pour des cellules photovoltaïques», These de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma (2018).
- [7] A. Amanaine, «Caractérisation par simulation des panneaux solaires photovoltaïques», Mémoire de master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret (2022).
- [8] H. Chabane, «Etude d'une cellule solaire a base de PIN», Mémoire de magister, Université hadj lakhdar de batna (2015).
- [9] S. Mekliche «Etude et Simulation des paramètres électriques d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Silicium», mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (2017).
- [10] M. Belkhamssa, B. Bettayeb «Optimisation par simulation d'une cellule solaire en couches minces à base de $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$ », mémoire de master, Université KASDI MERBAH de OUARGLA (2023).
- [11] Islam, M. R., Kaysir, M. R., Islam, M. J., Hashimoto, A., & Yamamoto, A. MOVPE growth of $In_xGa_{1-x}N$ ($x \sim 0.4$) and fabrication of homo-junction solar cells. *Journal of Materials Science & Technology*, 29(2), 128-136, 2013
- [12] X. M. Cai, S. W. Zeng, and B. P. Zhang. Favourable photovoltaic effects in InGaN pin homojunction solar cell. *Electronics Letters*, 45(24) :1266 – 1267, 2009.
- [13] A. Chloe, M. Fabien and W. Alan Doolittle. Guidelines and limitations for the design of high-efficiency InGaN single-junction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130: 354–363, Novembre 2014.
- [14] O. Jani, I. Ferguson, C. Honsberg, and S. Kurtz. Design and characterization of GaN/ InGaN solar cells. *Applied Physics Letters*, 91(13) :132117, 2007.

Référence

- [15] S. Liu, Q. Wang, H. Xiao, K. Wang, C. Wang, X. Wang, W. Ge, and Z. Wang. Optimization of growth and fabrication techniques to enhance the InGaN/GaN multiple quantum well solar cells performance. *Superlattices and Microstructures*, 109 :194–200, 2017.
- [16] Xiaobin Zhang, Xiaoliang Wang, Hongling Xiao, Cuibai Yang, Junxue Ran, Cuimei Wang, Qifeng Hou, Jinmin Li, and Zhanguo Wang. Theoretical design and performance of InGaN two-junction solar cells. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 41(24) :245104, 2008. 37, 38, 39, 116, 122.
- [17] M. Ali Cherif, « Etude par simulation numérique d'une cellule solaire à base de silicium par PC1D », Mémoire de master, Université Ibn Khaldoun – Tiaret (2016).
- [18] A. SKENDER, « Etude et simulation des cellules solaires à triples-jonctions à concentration à base des semi-conducteurs III-V », Mémoire de Magister, Université Mouloud Maamri–Tizi ousou (2016).
- [19] H.M.Hadj Ahmed, « Exploration des alliages III-V-Nitrides (AlGa_N, B Ga_N et BAlN) par algorithme évolutionnaire couplé à la théorie de la fonctionnelle de la densité », Thèse de doctorat, Université USTO-MB(2020).
- [20] M. Berber, « Etude Des Nanostructures Lasers A Base De Nitrides D'antimoniures Gansb/Algainnsb », Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes-Sidi Bel Abbes(2014).
- [21] S. Bout, « Contribution à L'étude des propriétés structurales et électronique du ternaire (In_{1-x}GaxN) par la méthode (FP-LMTO) », Mémoire de master, Université Ibn Khaldoun – Tiaret (2020).
- [22] F. Moussaoui, A. Bourahla, « Etude par simulation et modélisation électrique Des Modules photovoltaïques », Mémoire de master, université Ahmed Draia-Adrar-(2021).
- [23] M.A. MOSTEFAOUI, « Contribution à l'amélioration des performances des cellules solaires à base de InGa_N », Mémoire de master, Université Abou - Bekr Belkaid De Tlemcen (2015).
- [24] A.Bouguerra.Fediane, K.Hammache, « Contribution à l'étude des propriétés optoélectroniques de l'alliage semi-conducteur ternaire Al_xGa_{1-a}Sb », Mémoire De Master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj (2021).
- [25] M. Laichi, B. Boukhlef, « Amélioration des structures à boîtes quantiques à base d'InAsSb/GaAs pour les cellules solaires », Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida (2016).
- [26] https://nanopdf.com/download/conducteurs-semi_pdf#
- [27] V.GORGE, « Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrides des éléments III-V », Thèse de doctorat, Université paris-sud 11 (2012).
- [28] D. Makhtour, S.Gharbi, « Etude et simulation d'une structure à base de InGa_N

Référence

pour le photovoltaïque », Mémoire de Projet de Fin d'Études, Université Saad Dahlab De Blida.

[29] <https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B9780081023068000034-f03-01-9780081023068.jpg2013>.

[30] <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQHFFBi-Yo5DdfRsZjMlxZv401fT1MxZ1L88fwxIwWDEeN4ZB2v7L05PEOOg28uoWafEcU&usqp=CAU>

[31] G.GHERAB, A.HAMOUD, « Etude et Optimisation d'une Photodiode Pour La Télécommunication », Mémoire de master, Université Saad Dahlab Blida-1(2021).

[32] A.MEHARZI, H. LATERCHE, « Etude par TCAD-Silvaco d'une structure n-on-p dans le cadre du projet ATLAS du CERN », Mémoire de master, Université Saad Dahlab de Blida (2015).

[33] D.Caughey and R. Thomas: « Carrier mobilités in silicon empirically related to doping and field» IEEE Proceedings, vol. 55, no. 12, pp. 2193-2193, 1967.

[34] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f0/Refraction_fr.png

[35] A.ELLABIB, « Analyse mathématique d'équations de semi-conducteurs avec mobilités non constantes et identification des frontières libres dans les jonctions PN », Thèse de doctorat, Université de Nantes (2020).

[36] F.Drici, A.Allague, «Modélisation des dispositifs semi-conducteurs et applications en micro-électronique », Mémoire de master, Université Larbi Tebessi-Tebessa (2020).

[37] S. HAMDI, « Simulation numérique une cellule solaire à base de GaInP en présence des défauts créés par irradiation à électron de 1MeV », Mémoire de master, Université Saad Dahlab, Blida-1 (2021).

[38] <https://www.researchgate.net/profile/MaksymPlakhotnyuk/publication/326589565/figure/fig13/AS:669642209112070@1536666552298/Recombination-mechanisms-in-semiconductors-The-direct-radiative-and-Auger-band-to-band.png>

[39] F.KHALED, « Effet de l'électrode transparente sur les propriétés des cellules solaires en hétérojonction à base de silicium », Thèse de doctorat, Université de Batna-2 (2017).

[40] Y.Amine, T.Amrane, «Modélisation et optimisation d'une cellule solaire n-c-AIGaAs/P-C-GaAs»,Memoire de Master,Université Saad Dahleb Blida-1 (2021).

Résumé

L'alliage de Nitrure de Gallium et d'Indium (InGaN) est devenu au cours des dernières années un semi-conducteur important pour la fabrication des cellules solaires.

Notre étude s'est basée sur la simulation de deux cellules solaires à base des nitrures des éléments III-N, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (n)/InN (p) et GaN(n)/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (p).

L'objectif de cette étude est d'analyser et d'optimiser les propriétés de l'alliage de nitrure de gallium et d'indium (InGaN) pour son utilisation dans la fabrication de cellules solaires à haut rendement.

Dans notre cas les résultats montrent que la meilleure fraction molaire de In pour le cas de la cellule $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (n)/InN (p) est de $x=0,8$ et de $x=0,66$ pour le cas de la cellule GaN(n)/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (p) ce qui correspond à un rendement $\eta=35,48\%$ et $\eta=37,43\%$ respectivement.

Abstract

The Gallium Nitride and Indium (InGaN) alloy has become an important semiconductor for the fabrication of solar cells in recent years. Our study is based on the simulation of two solar cells using III-N element nitrides: $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (n)/InN (p) and GaN (n)/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (p).

The objective of this study is to analyze and optimize the properties of the Gallium Nitride and Indium (InGaN) alloy for its use in the production of high-efficiency solar cells.

In our case, the results show that the best molar fraction of In for the $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (n)/InN (p) cell is $x=0.8$ and $x=0.66$ for the GaN (n)/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (p) cell, corresponding to an efficiency of $\eta = 35.48\%$ and $\eta = 37.43\%$, respectively.