



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Télécommunications
Réseaux et télécommunications

Réf. :

Présenté et soutenu par :
ZERARKA Asma

Le : 30 septembre 2020

Etude par simulation numérique d'une cellule solaire double jonction en InGaN

Jury :

M.	GUESBAYA Taher	MCA	Université de Biskra	Président
M.	TOUMI Abida	MCA	Université de Biskra	Examineur
M.	TOBBECHE Souad	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Télécommunications
Option : Réseaux et télécommunications

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

Etude par simulation numérique d'une
cellule solaire double jonction en InGaN

Présenté par :

ZERARKA Asma

Avis favorable de l'encadreur :

TOBBECHE Souad

Signature

Avis favorable du Président du Jury

GUESBAYA Taher

Cachet et signature

Résumé

Les alliages $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ont récemment émergé en tant que matériau prometteurs pour les cellules solaires, en raison de leur bande interdite qui couvre quasiment la totalité de spectre solaire, tout en présentant une forte absorption optique.

La cellule solaire à double jonction présente une efficacité élevée en raison de l'absorption du plus grand nombre de photons incidents en comparaison avec une cellule solaire simple jonction. L'objectif de ce présent mémoire est l'étude et l'optimisation par simulation numérique de la cellule solaire double jonction en $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ sous éclairage AM0 par le logiciel ATLAS-SILVACO. Les résultats obtenus sont ($J_{sc}=17.31\text{mA}/\text{cm}^2$, $V_{oc} = 3.70\text{ V}$, $\text{FF} = 95.40\%$, $\eta = 44.77\%$). Nous avons aussi simulé l'effet de l'épaisseur et du dopage de la sous cellule supérieure $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ en vue d'optimiser la cellule solaire double jonction en $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$. Les résultats des caractéristiques électriques optimisés ($J_{sc}= 19.07\text{ mA}/\text{cm}^2$, $V_{oc} = 3.70\text{ V}$, $\text{FF} = 95.36\%$, $\eta = 49.44\%$) pour l'épaisseur de l'émetteur $17\mu\text{m}$ et la concentration de dopage 10^{18} cm^{-3} pour l'émetteur et $9 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ pour la base de la sous cellule supérieure en $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$.

Mots Clés : Cellule solaire, simulation, double jonction, SILVACO-ATLAS, InGaN.

المخلص

ظهرت سبائك $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ مؤخرًا كمواد واعدة للخلايا الشمسية، بسبب فجوة النطاق التي تغطي الطيف الشمسي بأكمله تقريبًا، مع إظهار امتصاص بصري قوي.

تتميز الخلية الشمسية ذات وصلتين بكفاءة عالية بسبب امتصاص عدد أكبر من الفوتونات الساقطة بالمقارنة مع خلية ذات وصلة واحدة. الهدف من هذه الرسالة هو الدراسة والتحسين عن طريق المحاكاة العددية للخلية الشمسية الترادفية على أساس InGaN تحت إضاءة AM0 بواسطة برنامج ATLAS-SILVACO. هذه النتائج المتحصل عليها ($J_{sc}= 17.31$

mA/cm^2 , $V_{oc} = 3.70\text{ V}$, $\text{FF}= 95.40\%$, $\eta = 44.77\%$) سنقوم أيضًا بمحاكاة تأثير السماكة والمنشطات للخلية الفرعية العلوية $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ على الخصائص الكهربائية من أجل تحسين الخلية الشمسية من InGaN.

نتائج الخصائص الكهربائية المحسنة: ($J_{sc}= 19.07\text{ mA}/\text{cm}^2$, $V_{oc} = 3.70\text{ V}$, $\text{FF} = 95.36\%$, $\eta = 49.44\%$). من أجل سمك $17\mu\text{m}$ و تركيز المنشط 10^{18} cm^{-3} في طبقة الباعث و تركيز المنشط $9 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ في طبقة الاساسية.

الكلمات المفتاحية: خلية شمسية، محاكاة، ذات وصلتين، InGaN، SILVACO-ATLAS.

Sommaire

Sommaire

Dédicace.....	I
Remerciement.....	II
Liste des tableaux.....	IV
Liste des figures.....	VI
Introduction générale.	2
Chapitre I Etude du matériau semi-conducteur InGaN	
1.1 Introduction.....	5
1.2 Semi-conducteur.....	6
1.2.1 Semi-conducteur intrinsèque.....	7
1.2.2 Semi-conducteur extrinsèque.....	7
1.3 Description d'InGaN.....	10
1.4 Propriétés structurales.....	10
1.5 Propriétés électriques et électroniques.....	12
1.5.1 Polarisation spontanée et piézoélectrique.....	12
1.5.2 Gap d'énergie interdite dans les nitrures.....	13
1.5.3 Evolution du gap avec la température.....	14
1.5.4 Caractère intrinsèque de type n dans les nitrures.....	15
1.5.5 Mobilité des porteurs dans les nitrures.....	17
1.5.6 Longueur de diffusion.....	17
1.6 Dopage.....	18
1.7 Propriétés des alliages ternaires $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	19
1.7.1 Le ternaire $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	19
1.7.2 Formules de Vegard et Phillips.....	19
1.7.3 Variation du gap d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de la fraction de mole $x(\text{In})$	19
1.7.4 Les paramètres de maille.....	20
1.7.5 Les masses effectives.....	21
1.7.6 Affinité électronique.....	21
1.7.7 La permittivité.....	22
1.8 Propriétés optiques.....	22
1.9 Conclusion.....	25

Chapitre 2 Etude théorique des cellules solaire

2.1 Introduction.....	27
2.2 Spectre solaire.....	28
2.3 Effet photovoltaïque.....	29
2.4 Génération de porteurs en excès par lumière.....	30
2.5 Mécanisme de recombinaison.....	31
2.5.1 Recombinaisons radiatives.....	31
2.5.2 Recombinaison Shockley-Read-Hall.....	31
2.5.3 Recombinaison Auger.....	32
2.6 Principe de fonctionnement.....	33
2.7 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire.....	34
2.8 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	35
2.9 Paramètres d'une cellule solaire.....	36
2.10 Principales technologies solaires photovoltaïques.....	39
2.11 Cellule solaire à base d'InGaN.....	40
2.11.1 Simple jonction.....	40
2.11.2 Multi-jonctions.....	43
2.12 Conclusion.....	46

Chapitre 3 Simulateur SILVACO

3.1 Introduction.....	48
3.2 Présentation du logiciel TCAD-SILVACO.....	48
3.3 ATLAS.....	48
3.4 Entrées et sorties dans SILVACO ATLAS.....	49
3.5 Ordre des commandes.....	49
3.5.1 Spécification de la structure.....	51
3.5.2 Spécification des modèles physiques.....	55
3.5.3 Sélection de la méthode numérique.....	59
3.5.4 Spécification des solutions.....	60
3.5.5 Analyse des résultats.....	61
3.6 Les équations de base de semi-conducteur en ATLAS-SILVACO.....	61
3.6.1 Equations de continuité de porteuse.....	61
3.6.2 Equations de piégeage d'électrons et de trous.....	61
3.6.3 Equation de poisson.....	62
3.7 Conclusion.....	63

Chapitre 4 Simulation numérique de la cellule solaire et résultats de simulation

4.1 Introduction.....	65
4.2 Modèles et paramètres de simulation.....	65
4.3 Structure de la cellule tandem.....	67
4.4 Résultats et discussion.....	67
4.4.1 Simulation de la cellule supérieure.....	67
4.4.2 Simulation de la cellule inférieure.....	70
4.4.3 Simulation de la cellule solaire à double jonction.....	72
4.4.4 Comparaison entre les trois cellules solaire.....	75
4.4.5 Optimisation de la cellule tandem.....	76
4.4.5.1 L'influence de l'épaisseur.....	76
4.4.5.2 L'influence du dopage.....	77
4.5 Conclusion.....	80
Conclusion générale.....	82
Références.....	X

À mes chers parents,

À mes sœurs,

À mon frère,

À l'âme de mon grand-père,

À mes amis et à tous ceux que j'aime.

J'adresse mes remerciements premièrement à ALLAH tout-puissant pour la santé et la patience, qu'il m'a donnée durant toutes ces longues années d'études.

Mes remerciements à l'encadreur TOBBECHE Souad pour m'avoir guidé de ce travail, pour son aide, ses orientations, ses conseils et ses encouragements. À toutes celles et ceux qui ont contribué au bon déroulement de ce travail, et qui m'ont apporté leurs connaissances, qu'ils trouvent ici mes remerciements les plus vifs.

Je remercie les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger ce modeste travail.

Enfin, tous mes remerciements, mes reconnaissances et mes gratitudes vont à mes très chers parents et à ma précieuse famille pour leur soutien indéfectible, sans oublier mes amis.

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Paramètres structuraux pour le GaN et l'InN.....	12
Tableau 1-2 : Paramètres de Varshni et gap d'énergie à 0 K et 300 k du GaN et de l'InN.....	14
Tableau 2-1 : Comparaison des performances photovoltaïques optimales des cellules solaires PN et PIN à base d'InGaN.....	43
Tableau 2-2 : Rendements théoriques maximaux obtenus par Bremner et al. pour des cellules multi-jonctions comportant entre 1 et 8 sous-cellules sous éclairment AM1.5.....	44
Tableau 4-1 : épaisseurs et dopages des régions de la cellule supérieure.....	68
Tableau 4-2 : Paramètres électriques de la cellule supérieur.....	70
Tableau 4-3 : Epaisseurs et dopages des régions de la cellule inférieur.....	70
Tableau 4-4 : Paramètres électriques de la cellule inférieur.....	72
Tableau 4-5 : les paramètres électriques de la cellule tandem.....	75
Tableau 4-6 : Les paramètres de sortie des trois cellules solaire.	76
Tableau 4-7 : Les résultats optimisés des caractéristiques électriques.....	80

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1-1 : tableau périodique-tableau de Mendeleïev.....	5
Figure 1-2 : bande d'énergie des matériaux.....	6
Figure 1-3 : libération d'un électron par l'atome de phosphore.....	8
Figure 1-4 : a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'état énergétique c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs.....	9
Figure 1-5 : Libération d'un trou par l'atome de bore.....	9
Figure 1-6 : a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'états énergétique. c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs.....	10
Figure 1-7 : Structures Wurtzite et cubique Zinc-blende du GaN.....	11
Figure 1-8 : Champ électrique généré par une polarisation spontanée dans un matériau GaN..	12
Figure 1-9 : Couches d'atomes donnant lieu à deux polarités différentes.....	13
Figure 1-10: Diagramme de la bande du GaN.....	14
Figure 1-11: Diagramme de la bande du InN.....	14
Figure 1-12 : Evolution du gap d'énergie pour InN et GaN en fonction de la température.....	15
Figure 1-13 : Position relative des bandes pour le groupe des III-N. Les lignes pointillées représentent le niveau de Fermi pour la concentration d'électrons libres maximale atteignable dans GaN et InN.....	16
Figure 1-14 : Densité d'électrons et mobilité dans InN en fonction de l'épaisseur de la couche.....	16
Figure 1-15 : Concentration d'électrons en fonction de la température dans $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ avec différentes concentrations d'indium.....	16
Figure I-16 : Mobilité des porteurs libres dans $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ en fonction de la température.....	17

Figure I-17 : Longueur de diffusion des trous dans GaN en fonction de la concentration d'électrons.....	18
Figure 1-18: Variation du gap d' $In_xGa_{1-x}N$, en fonction de la fraction de mole In.....	20
Figure 1-19: Variation du paramètre de maille d' $In_xGa_{1-x}N$ en fonction de la composition x de l'alliage.....	20
Figure 1-20: Variation des masses effectives de l'alliage $In_xGa_{1-x}N$ en fonction de la composition x	21
Figure 1-21: Variation de l'affinité électronique dans $In_xGa_{1-x}N$ avec la composition x	22
Figure 1-22 : Indice de réfraction du GaN	23
Figure 1-23 : Estimation de la variation de l'indice de réfraction dans l'InGaN, le GaAlN et l'InAlN.....	23
Figure 1-24 : Schéma des chemins optiques.....	24
Figure 2-1: Effet photovoltaïque.....	27
Figure 2-2 : spectre solaire à la surface de l'atmosphère terrestre (AM0) et au sol (AM1.5)....	28
Figure 2-3 : Effet PV dans (a) une jonction p-n simple et (b) multi jonctions.....	29
Figure 2-4 : Mécanisme de recombinaison radiative.....	32
Figure 2-5 : Mécanisme de recombinaison Schokley-Read-Hall (SRH).....	32
Figure 2-6: Mécanisme de recombinaison Auger.....	32
Figure 2-7 : principe de fonctionnement de la cellule solaire.....	33
Figure 2-8 : Caractéristiques $I(V)$ à l'obscurité et sous éclairnement d'une cellule photovoltaïque.....	35

Figure 2-9: circuit équivalent d'une cellule solaire.....	36
Figure 2-10 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire.....	37
Figure 2-11 : Rendement quantique externe de la cellule solaire et les différents types de pertes.....	38
Figure 2-12 : Classification des principales technologies de cellules solaires PV.....	40
Figure 2-13 : (a) schéma de la cellule solaire PIN à double hétérojonctions, (b) Caractéristique courant-tension obtenue par Jani <i>et al.</i> montrant un rendement de 6,93 %, avec un V_{co} de 2,4 V, un J_{cc} de 3,7 mA/cm ² et un FF de 0.78.....	41
Figure 2-14 : Rendement théorique maximum en fonction du gap d'énergie.....	41
Figure 2-15 : Structure de la cellule solaire InGaN la structure PIN.....	42
Figure 2-16 : Influence du taux de dopage et de l'épaisseur de la couche P sur le rendement d'une cellule solaire PN InGaN.....	43
Figure 2-17 : Schéma d'un exemple d'une cellule solaire à double-jonction.....	44
Figure 2-18: Schéma synoptique de la cellule solaire multi-jonctions.....	44
Figure 2-19 : Rendement (η), densité de courant de court-circuit (J_{cc}), voltage en circuit-ouvert (V_{co}) et facteur de forme (FF) des cellules solaires de InGaN, cercle : simple jonction (SJ), carré : double jonctions (DJ), triangle : triple jonction (TJ).....	45
Figure 3-1: Entrées et sorties d'Atlas.....	49
Figure 3-2 : Les commandes fondamentales dans un programme ATLAS.....	50
Figure 3-3 : Maillage du dispositif.....	52
Figure 3-4 : Définition des régions et des matériaux par le logiciel ATLAS.....	53
Figure 3-5 : Définition des électrodes par le logiciel ATLAS.....	54
Figure 3-6 : Distribution du dopage dans une structure par le logiciel ATLAS.....	54
Figure 4-1: Schéma d'une cellule solaire double jonction.....	67
Figure 4-2 : Présentation de la structure de la cellule supérieure par tonyplot.....	68
Figure 4-3 : Maillage de la structure simulée de la cellule supérieur.....	69
Figure 4-4 : La Caractéristique électrique J(V) sous éclairement AM0 de la cellule supérieur.....	69
Figure 4-5 : Présentation de la structure de la cellule inférieure par tonyplot.....	71
Figure 4-6 : Maillage de la structure simulée de la cellule inférieur.....	71

Figure 4-7 : La Caractéristique électrique J(V) sous éclairement AM0 de la cellule inférieur.....	72
Figure 4-8 : Présentation de la structure de la cellule tandem par tonypplot.....	73
Figure 4-9 : Maillage de la structure simulée de la cellule tandem.....	74
Figure 4-10 : La Caractéristique électrique J(V) sous éclairement AM0 de la cellule tandem.....	74
Figure 4-11 : Caractéristiques électriques J(V) sous illumination AM0 du trois cellules.....	75
Figure 4-12 : Les paramètres photovoltaïques de la cellule tandem en fonction de l'épaisseur de sous-cellule supérieur couche base obtenus par simulation.....	77
Figure 4-13 : Les paramètres photovoltaïques de la cellule tandem en fonction de dopage des sous-cellule supérieur couche émetteur obtenus par simulation.....	78
Figure 4-14 : Les paramètres photovoltaïques de la cellule tandem en fonction de dopage de sous-cellule supérieur couche base obtenus par simulation.....	79

Introduction générale

Introduction générale

Les satellites de télécommunications sont utilisés pour transmettre des informations d'un point à l'autre de la Terre, notamment les communications téléphoniques, la transmission de données, les communications par satellite et les programmes télévisés. Pour que ces satellites fonctionnent dans l'espace il faut qu'elles soient alimentées et pour cela on utilise les cellules solaires. Dans notre étude on a choisi les cellules solaires à base d'InGaN.

Les alliages $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ont récemment émergé en tant que matériaux prometteurs pour les cellules solaires, en raison de leur bande interdite qui couvre quasiment la totalité de spectre solaire, tout en présentant une forte absorption optique d'environ 10^5 cm^{-1} près de la bande interdite. Plusieurs défis limitent encore les performances de ces matériaux dont

* **Élaborer des couches d'InGaN de qualité**, avec des épaisseurs suffisamment élevées et dans une très large gamme de composition d'indium. Les problèmes à résoudre sont liés à la présence de dislocations, la séparation de phase et la densité importante de défauts structuraux.

* **Maîtriser le dopage P** dont la difficulté est liée à la présence de dopants résiduels, comme pour le B GaN, et au manque de dopants P actifs dans les conditions standards. Le magnésium, le dopant P standard des matériaux III-N, nécessite l'utilisation de procédés complexes d'activation à haute température et a un impact sur la qualité des couches.

* **Réaliser des contacts métalliques de qualité**, étape aussi essentielle que difficile dans le cas de l'InGaN, à l'instar des autres matériaux III-N. Les procédés sont relativement complexes et devront, dans ce cas, être maîtrisés pour l'InGaN dans une large gamme de composition d'indium.

* **Contrôler l'impact des polarisations piézoélectrique et spontanée** dont l'effet est important dans ces matériaux à structure wurtzite et qui, le plus souvent, dégraderont les performances des cellules solaires.

L'objectif de ce présent mémoire est l'étude par simulation numérique de la cellule solaire tandem à base du nitrure d'indium et de gallium (InGaN) sous éclairage AM0 par le logiciel ATLAS-SILVACO. Nous allons aussi simuler l'effet de l'épaisseur et du dopage des sous-cellules supérieure et inférieure sur les paramètres électriques en vue d'optimiser la cellule solaire en InGaN.

Pour ce fait, notre travail est divisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente les matériaux semi-conducteurs III-V ainsi que les principales propriétés des nitrures de Gallium Indium InGaN.
- Le deuxième chapitre présente les caractéristiques d'une cellule solaire et les types de Cellules photovoltaïques à base d'InGaN.
- le troisième chapitre présente le logiciel de simulation ATLAS-SILVACO.
- Le quatrième chapitre présente l'étude, la simulation de la cellule et les résultats obtenus.
- Et enfin une conclusion générale.

Chapitre 1

Etude du matériau semi-conducteur InGaN

1.1 Introduction

Ce premier chapitre présente le matériau de nitrure de gallium indium (InGaN)- composé d'azote (N) et d'éléments de la colonne III du tableau de Mendeleïev ci-dessous, le gallium (Ga), l'indium (In).

Ces matériaux nitrures-III sont activement étudiés parce qu'ils représentent une nouvelle catégorie de matériaux possédant des propriétés uniques : un large gap d'énergie interdite, de fortes liaisons interatomiques ou encore une forte conductivité thermique qui les rendent très intéressants pour l'optoélectronique à haute température et grande puissance. C'est pourquoi, nous allons principalement décrire dans ce chapitre les propriétés structurales, électriques, thermiques et optiques de ce matériau.

	3A	13	4A	14	5A	15	6A	16	
	5	B	6	C	7	N	8	O	
	10.811	Boron	12.0107	Carbon	14.0067	Nitrogen	15.9994	Oxygen	
		13	Al	14	Si	15	P	16	S
		26.9815	Aluminum	28.0855	Silicon	30.9738	Phosphorus	32.065	Sulfur
2B	12								
30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se
65.409	Zinc	69.723	Gallium	72.64	Germanium	74.9216	Arsenic	78.96	Selenium
48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te
112.411	Cadmium	114.818	Indium	118.710	Tin	121.760	Antimony	127.60	Tellurium
80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po
200.59	Mercury	204.383	Thallium	207.2	Lead	208.9804	Bismuth	[209]	Polonium

Figure 1-1 : tableau périodique de Mendeleïev.

1.2 Semi-conducteur

Selon les propriétés électriques, les matériaux sont classés en trois catégories, conducteurs, isolants et semi-conducteurs [1] dont le diagramme de bande d'énergies est représenté par Fig.1.2.

- Conducteurs** : Les métaux tels que le fer (Fe), le cuivre (Cu), l'or (Au), l'argent (Ag) et l'aluminium (Al) sont des conducteurs de courant électrique. La présence d'électrons libres dans la couche périphérique (densité $n \approx 10^{22}$ à 10^{23} é/cm^3) est à l'origine de la conductivité électrique. A température ambiante la résistivité ρ des conducteurs est très faible ($\rho \leq 10^{-5}$ $\Omega\cdot\text{cm}$).
- Isolants** : Les matériaux qui ont une résistivité ρ supérieure à 10^8 $\Omega\cdot\text{cm}$ sont des isolants (matériaux non conducteurs de courant électrique). Parmi ces matériaux ; le verre, le mica, la silice (SiO_2) et le carbone (Diamant)...La conductivité des isolants est donc très faible ($\sigma=1/\rho$).
- Semi-conducteurs** : Cette classe de matériaux se situe entre les métaux (conducteurs) et les isolants (non conducteurs). La résistivité ρ des semi-conducteurs varie de 10^{-3} à 10^4 $\Omega\cdot\text{cm}$. les électrons libres et les trous mobiles sont les porteurs de charges responsables de la conductivité électrique. Un semi-conducteur peut être soit intrinsèque (pur) ou extrinsèque (dopé) par des impuretés.

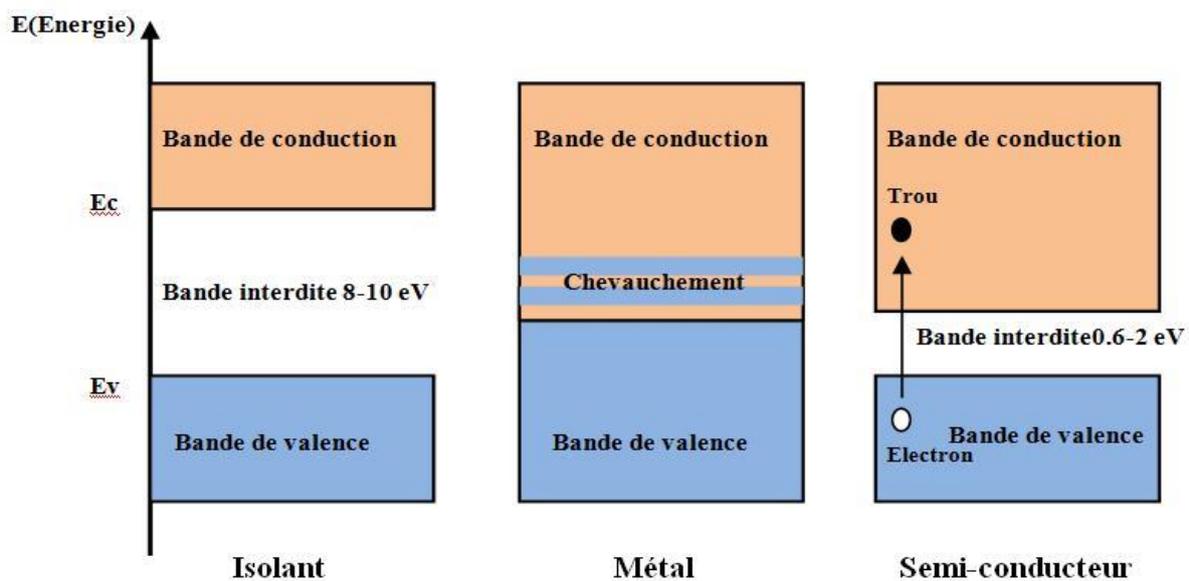


Figure 1-2 : bande d'énergie des matériaux

1.2.1 Semi-conducteur intrinsèque

Des semi-conducteurs absolument purs, c'est-à-dire sans aucune impureté à l'intérieur du réseau cristallin, s'appellent intrinsèques. La caractéristique fondamentale d'un semi-conducteur pur est l'égalité absolue du nombre d'électrons libres et de trous libres à n'importe quelle température. Ces porteurs de charge sont générés thermiquement ou optiquement (absorption d'un photon - procédé fondamental d'une cellule photovoltaïque).

Les concentrations (nombre par le volume unitaire) n des électrons libres et p des trous libres sont égaux et sont appelées la densité intrinsèque des porteurs.

$$n = n_i = p$$

On peut montrer que : $n_i = A T^3 / 2 \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right)$ (1.1)

Avec :

T : La Température en °K

E_g : hauteur de la bande interdite (gap)

k : Constante de Boltzmann (8,6.10⁻⁵ eV K⁻¹)

A : constante du matériau

Comme on peut le voir dans l'expression ci-dessus, n_i est fortement lié à la température. En conséquence, la résistivité d'un semi-conducteur intrinsèque diminue rapidement avec l'augmentation de la température due à l'augmentation forte du nombre de paires électron-trou.

À la température ambiante (300 K), la densité intrinsèque des porteurs du silicium est $n_i=1.45 \times 10^{10}\text{cm}^{-3}$. On peut la considérer comme très petite comparée au nombre d'atomes dans un cristal de silicium (égal à $5 \times 10^{22}\text{cm}^{-3}$) [2].

1.2.2 Semi-conducteur extrinsèque

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques, conférant des propriétés adaptées à l'utilisation de ce matériau. L'introduction de ces dopants perturbe les bandes interdites.

Selon le type de dopage, on distingue deux types de semi-conducteurs :

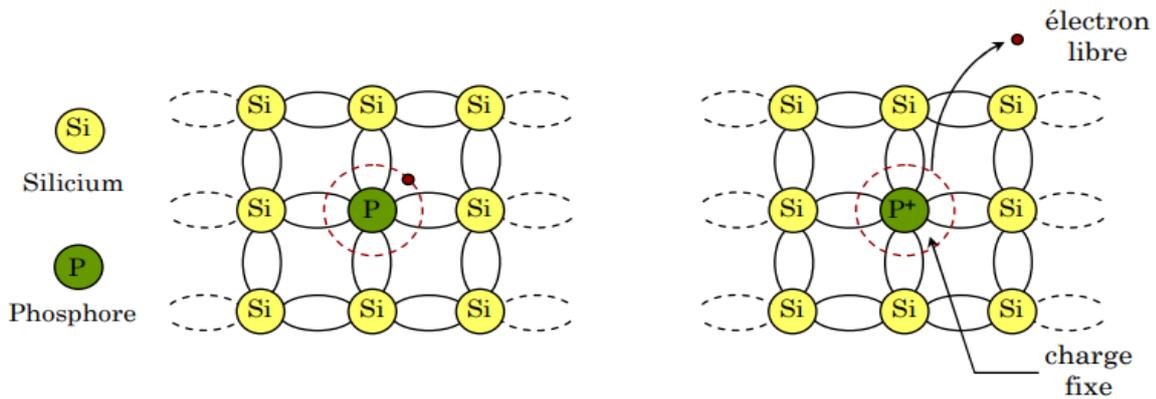


Figure 1-3 : libération d'un électron par l'atome de phosphore

a. Semi-conducteur type n :

Un semi-conducteur type N est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type donneurs (ex : phosphore P) (fig.1-3). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles donnent un électron à la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur.

Les dopants de type n sont des éléments ou des composés avec cinq électrons de valence ou qui donneront un électron après que les quatre autres forment des liaisons covalentes avec les matériaux intrinsèques dans lequel ils ont été placés [3]

Un semi-conducteur dopé N a une densité d'électrons n plus élevée et une densité de trous p plus faible que le même semi-conducteur pris dans sa configuration intrinsèque. On dit alors que les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous, les porteurs minoritaires.

Les concentrations en électrons libres (n) et en trous libres (p) sont liées par la loi d'action de masse :

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (1.2)$$

Le niveau indicateur de Fermi E_{F_n} se déplace donc du milieu de la bande interdite (E_{F_i}) vers la bande de conduction (fig.1-4) de telle manière que :

$$\Delta E_n = KT \cdot \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) \quad (1.3)$$

Avec :

$$\Delta E_n = E_{F_n} - E_{F_i}$$

N_d : Concentration des atomes donneurs.

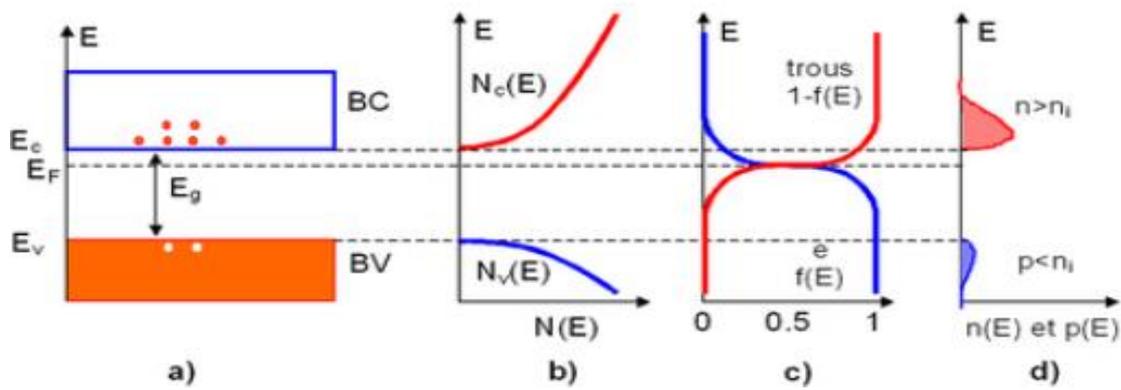


Figure 1-4 : a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'état énergétique c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs

b. Semi-conducteur type p :

Un semi-conducteur type P est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type donneurs (ex : bore B) (fig.1-5). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles acceptent un électron à la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur.

Un semi-conducteur dopé P a une densité d'électrons n plus faible et une densité de trous p plus élevée que le même semi-conducteur pris dans sa configuration intrinsèque. On dit alors que les électrons sont les porteurs minoritaires et les trous, les porteurs majoritaires.

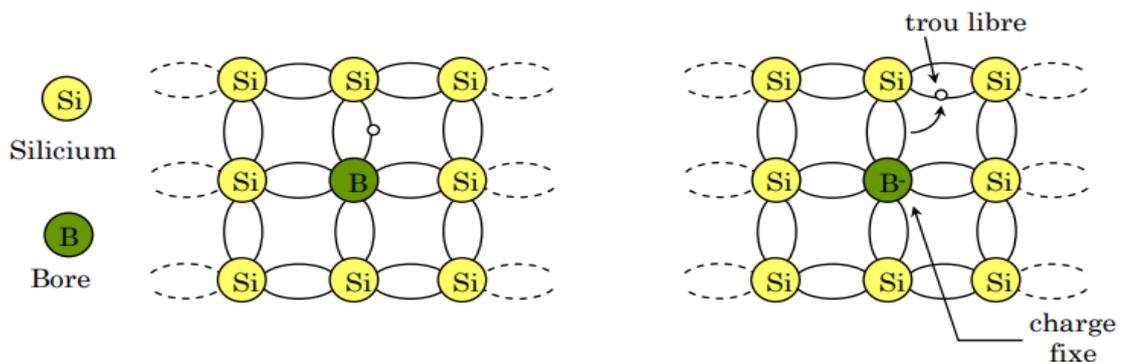


Figure 1-5 : Libération d'un trou par l'atome de bore.

Les concentrations en électrons libres (n) et en trous libres (p) sont liées par la loi d'action de masse :

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (1.4)$$

Le niveau indicateur de Fermi E_{Fp} se déplace du niveau intrinsèque E_{Fi} vers la bande de valence (fig.1-6) de telle manière que :

$$\Delta E_p = KT \cdot \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (1.5)$$

Avec :

$$\Delta E_p = E_{Fp} - E_{Fi}$$

N_p : Concentration des trous libres.

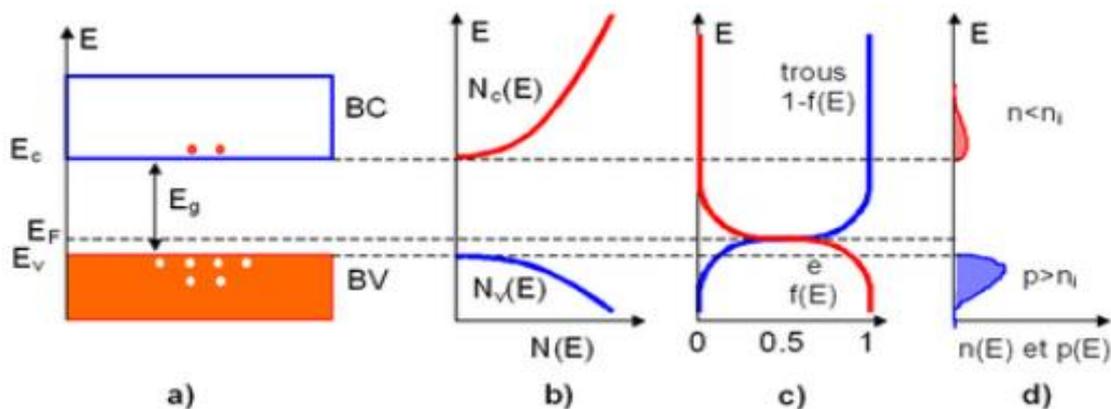


Figure 1-6 : a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'états énergétique. c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs.

1.3 Description du matériau InGaN

Ce matériau est un semi-conducteur faisant partie de la catégorie des nitrures-III, c'est-à-dire, composé d'azote(N) et d'éléments de la colonne III du tableau de Mendeleïev, à savoir le bore, l'aluminium, le gallium, l'indium et le thallium.

Le nitrure de gallium-indium est un alliage entre le nitrure de gallium (GaN) et le nitrure d'indium (InN).

1.4 Propriétés structurales

Les nitrures-III cristallisent principalement dans la structure zinc-blende ou wurtzite. La structure zinc-blende est une structure cubique alors que la structure wurtzite est une structure hexagonale (figure 1-7).

Dans les conditions ambiantes, la structure des nitrures-III est la wurtzite, une 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 . Ce dernier est défini comme étant la longueur de la liaison cation-anion divisée par c . Il est égal à 0,375 pour un cristal wurtzite idéal.

La deuxième structure zinc-blende est constituée de deux sous réseaux cubiques à faces centrées, l'un est constitué d'un élément III et l'autre d'un élément V, les deux sous réseaux étant décalés du quart de la diagonale principale soit $a/4$, « a » étant la longueur du cube. Le tableau (1.1) présente les paramètres de maille des nitrures GaN et l'InN pour les deux structures.

Cette structure ne peut quant à elle être obtenue que dans des conditions de croissance bien particulières, elle est thermodynamiquement instable. Dans les nitrures les liaisons sont de type covalent présentant de propriétés partiellement ioniques, telle que l'une des quatre liaisons reçoit deux électrons de l'élément V [4].

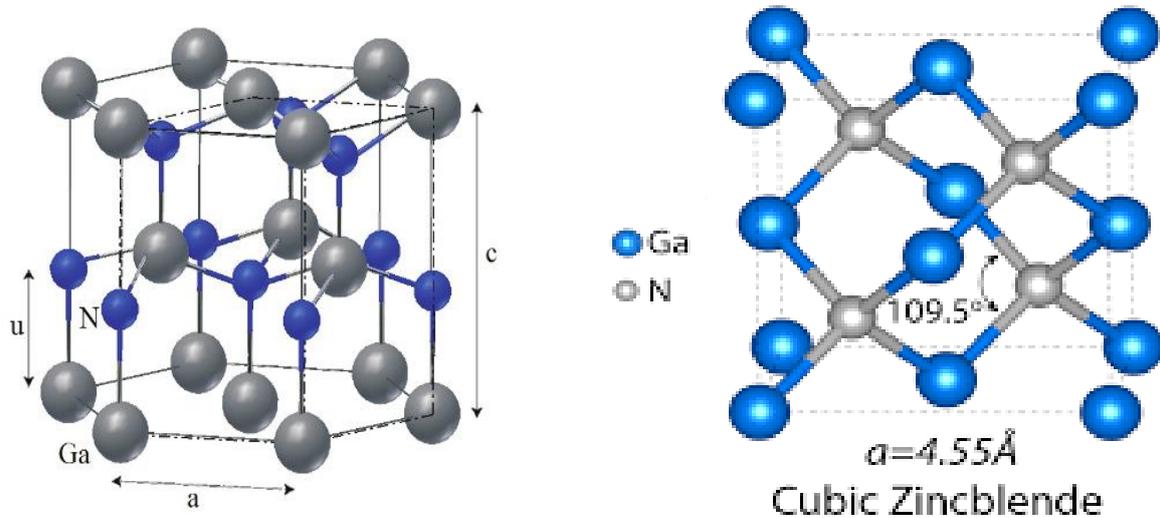


Figure 1-7 : Structures Wurtzite et cubique Zinc-blende du GaN.

Forme	Cubique		Wurtzite		
	a(A ⁰)		a(A ⁰)	c(A ⁰)	U
GaN	4.47		3.189	5.185	0.377
InN	4.96		3.54	5.70	0.378

Tableau 1.1 : Paramètres structuraux pour le GaN et l'InN.

1.5 Propriétés électriques et électroniques

1.5.1 Polarisation spontanée et piézoélectrique

a. Polarisation spontanée

Sans être soumis à aucune contrainte externe, une couche de nitrure de gallium peut cependant présenter une polarisation macroscopique non nulle. Ce champ électrique existe parce que le cristal présente une asymétrie entre les barycentres des charges d'électrons avec celles des trous. On dit que le cristal manque de symétrie d'inversion. On note aussi qu'un lien entre les deux atomes qui n'est pas purement covalent est un facteur qui peut causer la création de ce champ électrique. En d'autres termes, le matériau GaN se définit comme étant un matériau naturellement polarisé grâce aux charges présentes sur chacune de ses faces, qui sont identiques mais de signes opposés comme illustré dans la figure 1-8 [5].

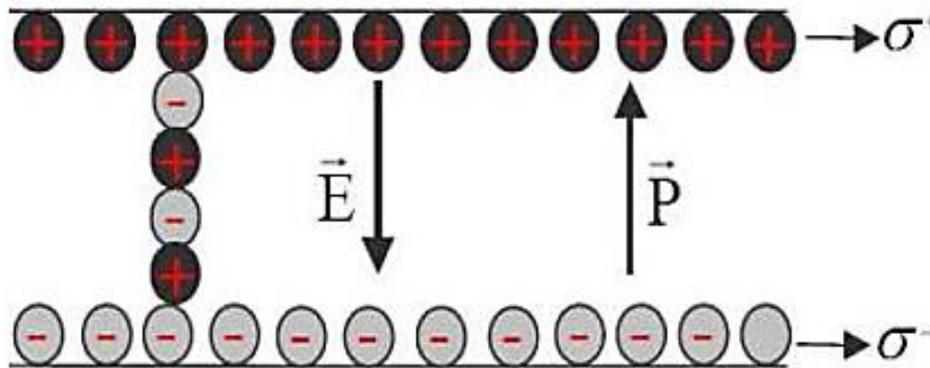


Figure 1-8 : Champ électrique généré par une polarisation spontanée dans un matériau GaN.

b. Polarisation piézoélectrique

L'origine de la polarisation piézoélectrique est la structure cristalline du nitrure de gallium. Les deux structures du GaN, hexagonale et cubique, sont non centro-symétriques. Ce désaccord de maille entre la couche d'AlGa_xIn_{1-x}N ou InGa_xN_{1-x} et la couche de GaN par exemple, induit une sorte de contrainte mécanique, formant une charge de polarisation d'interface, et créant ainsi ce qu'on appelle le champ piézoélectrique. C'est la polarité du cristal qui définit le signe de cette charge.

Pour une polarité Nitrure le champ sera pointé du substrat vers la surface, et l'inverse sera pour une polarité Gallium (figure 1-9).

Grâce à ce champ piézoélectrique, les dispositifs AlGaN/GaN sont conçus pour utilisation en hautes puissances [6].

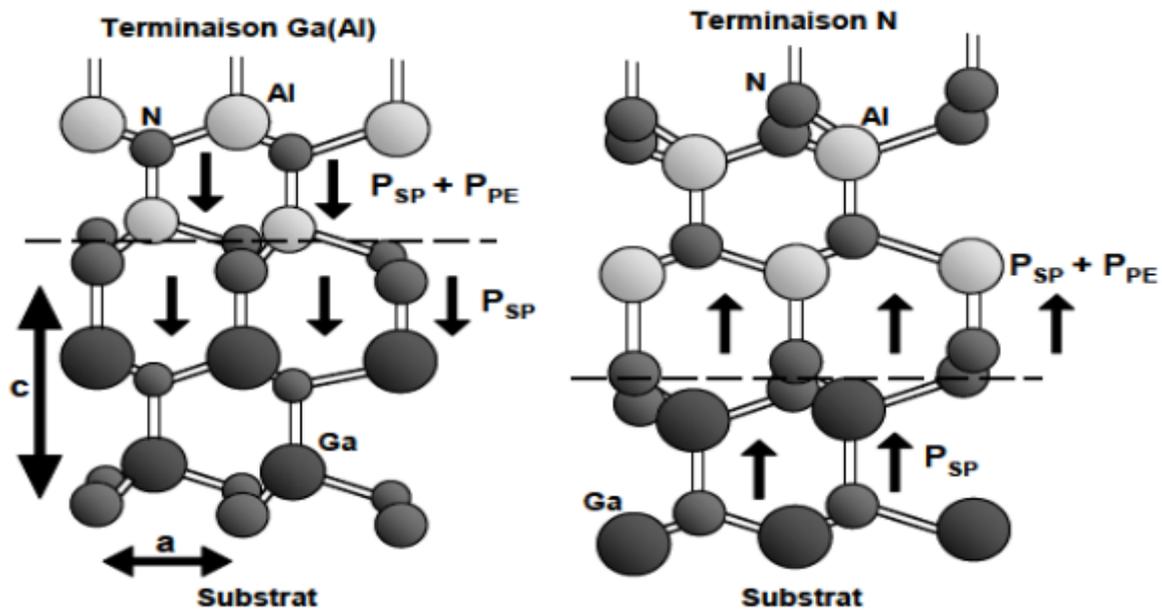


Figure 1-9 : Couches d'atomes donnant lieu à deux polarités différentes.

1.5.2 Gap d'énergie interdite dans les 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 de meilleurs rendements de conversion ou d'émission de lumière, pour le photovoltaïque ou pour les LEDs, par exemple. De plus, leurs alliages permettent de couvrir quasiment tout le spectre solaire, de l'infrarouge (IR) à l'ultraviolet (UV).

Le gap d'énergie interdite est de 3,39 eV (366 nm) pour le GaN et de 0,7 eV (1771 nm) pour l'InN à température ambiante (300 K). Le diagramme de bande du GaN est montré dans la figure I-10 et celui de l'InN est représenté dans la figure 1-11.

Le GaN et l'InN sont des matériaux à gap direct, le minimum de leur bande de conduction est donc aligné au maximum de leur bande de valence dans l'espace des vecteurs d'onde [7].

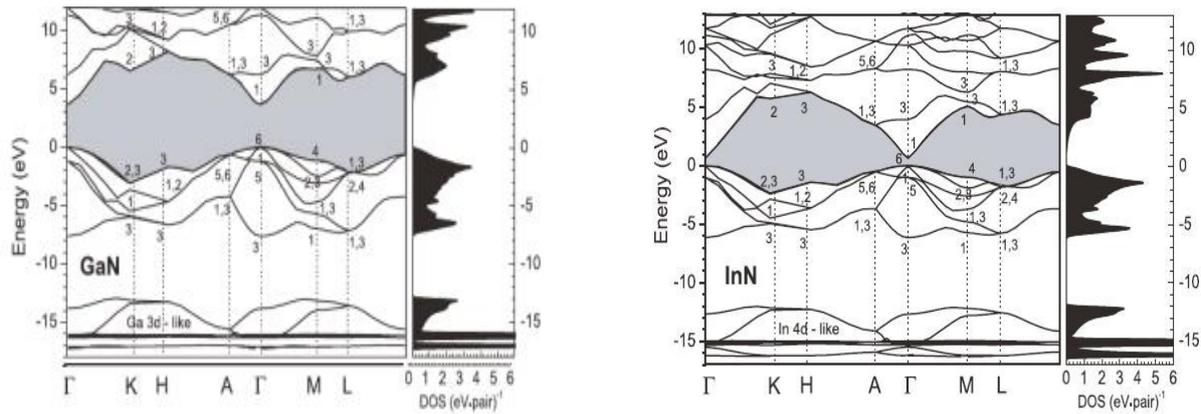


Figure 1-10: Diagramme de la bande du GaN. **Figure 1-11:** Diagramme de la bande de l'InN.

1.5.3 Evolution du gap avec la température

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

$$E_g(T) = E_g(T=0) - \frac{\alpha T^2}{\beta - T} \quad (1.6)$$

$E_g(T)$ le gap du matériau à une température donnée [eV],

$E_g(0)$ le gap du matériau à 0°K [eV],

α est une constante empirique [eV/K⁻¹],

B une constante associée à la température de Debye [K],

T la température en [K].

Ces paramètres pour le GaN et l'InN sont rassemblés dans le tableau 1-2. L'évolution des gaps d'énergie de GaN et de l'InN en fonction de la température est représentée dans la figure 1-12 [8].

	$E_g(0K)[eV]$	α [meV/K]	β [K]	$\Delta E(300-0K)[eV]$
GaN	3.507	0.909	830	$72 \cdot 10^{-3}$
InN	0.69	0.41	454	$49,9 \cdot 10^{-3}$

Tableau 1-2 : Paramètres de Varshni et gap d'énergie à 0 K et 300 K du GaN et de l'InN.

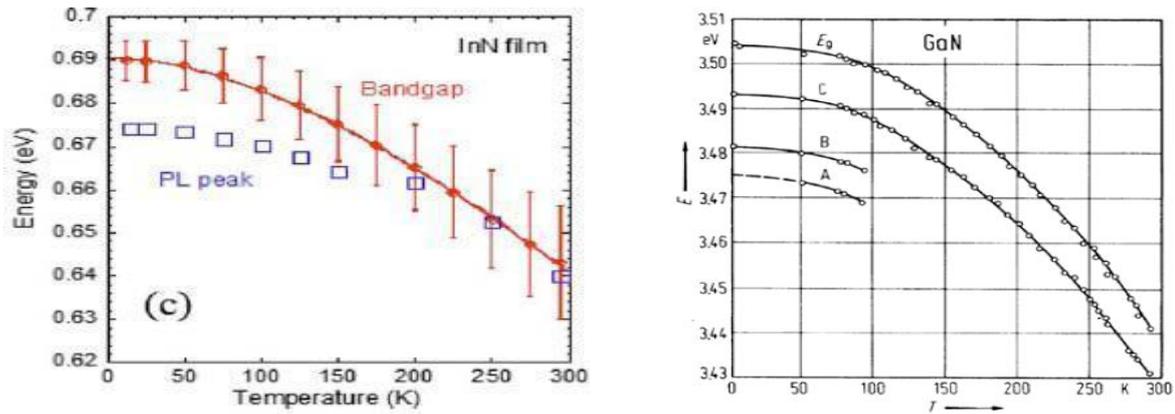


Figure 1-12 : Evolution du gap d'énergie pour InN et GaN en fonction de la température.

1.5.4 Caractère intrinsèque de type n dans les nitrures :

a. Energie de stabilisation du niveau de Fermi

La figure I-13 représente les positions relatives des bandes dans les nitrures-III ainsi que l'énergie de stabilisation du niveau de Fermi EFS. D'après cette figure, on voit qu'EFS est positionné dans la partie haute du gap du GaN et dans la bande de conduction de l'InN. C'est pourquoi, on prévoit que ces matériaux soient relativement faciles à doper avec des donneurs et beaucoup plus difficiles à doper avec des accepteurs [9].

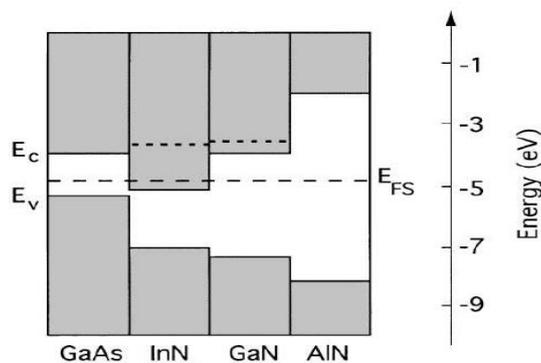


Figure 1-13 : Position relative des bandes pour le groupe des III-N. Les lignes pointillées représentent le niveau de Fermi pour la concentration d'électrons libres maximale atteignable dans GaN et InN.

b. Concentration d'électrons dans les nitrures

Les mesures électriques sur les nitrures (GaN, InN et InGaN) montrent une forte concentration d'électrons, généralement de l'ordre de 10^{18} cm^{-3} , leur donnant un caractère intrinsèquement de type N. Il semble que cette forte densité d'électrons puisse avoir plusieurs origines. Dans un premier temps, les défauts structuraux ont été proposés comme étant à l'origine de la forte concentration d'électrons, avec au premier rang les lacunes d'azote¹².

En effet ; d'après les calculs, ces dernières ont la plus faible énergie de formation dans GaN et InN.

Schaff *et al* ont montré que la concentration d'électrons dans InN est dépendante de l'épaisseur de la couche. En effet, la concentration des électrons suit la densité de défauts dus au désaccord de maille, qui diminue avec l'augmentation de l'épaisseur des couches, voir Figure I-14. C'est pourquoi les défauts, et pas les contaminants, sont la principale source d'électrons dans InN.

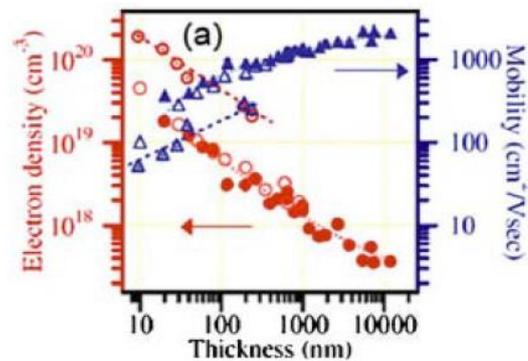


Figure 1-14 : Densité d'électrons et mobilité dans InN en fonction de l'épaisseur de la couche.

La Figure I-15 montre l'évolution de la concentration d'électrons en fonction de la température dans différents alliages d' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$, x étant la concentration de Ga [10].

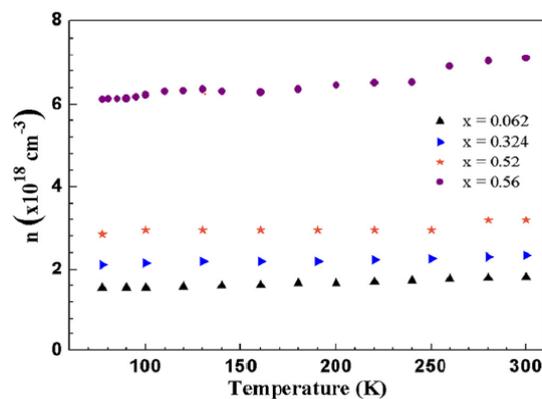


Figure 1-15 : Concentration d'électrons en fonction de la température dans $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ avec différentes concentrations d'indium.

1.5.5 Mobilité des porteurs dans les nitrures

La mobilité des porteurs dans InN est inversement proportionnelle à la densité d'électrons libres présents dans le matériau. Ce phénomène est également présent dans les autres nitrures (GaN, InGaN).

La mobilité des porteurs libres dans l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ est présentée dans la Figure (I-16) avec x la concentration de Ga. On observe que la mobilité diminue avec la concentration de Ga. Ceci est dû à la fois à l'augmentation de la masse effective des électrons avec l'augmentation de la concentration de Ga dans l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$, mais aussi à l'augmentation du phénomène de diffusion des porteurs à cause de l'alliage et des défauts qui augmentent avec la concentration de Ga dans l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$. On remarque également que la mobilité est quasiment indépendante de la température [11].

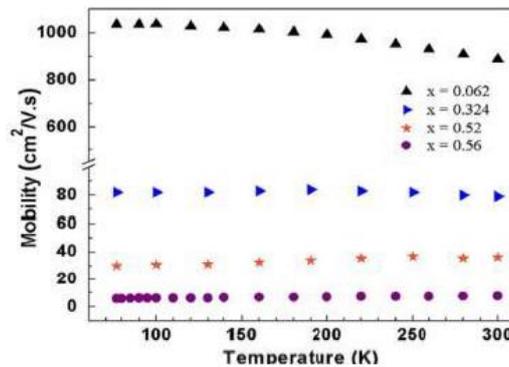


Figure I-16 : Mobilité des porteurs libres dans $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ en fonction de la température.

1.5.6 Longueur de diffusion

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

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (1.7)$$

Avec :

τ Le temps de vie des porteurs s .

D Le coefficient de diffusion des porteurs $\text{cm}^2.s^{-1}$, défini par : $D = \frac{kT}{q} \cdot \mu$

μ La mobilité des porteurs $\text{cm}^2.V^{-1}.s^{-1}$.

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.

La figure 1.17 présente l'évolution de la longueur de diffusion des trous dans le GaN en fonction de la concentration d'électrons. On observe que la longueur de diffusion des trous chute de manière quasiment exponentielle avec l'augmentation de la concentration des électrons à cause de l'augmentation de la probabilité de recombinaison [12].

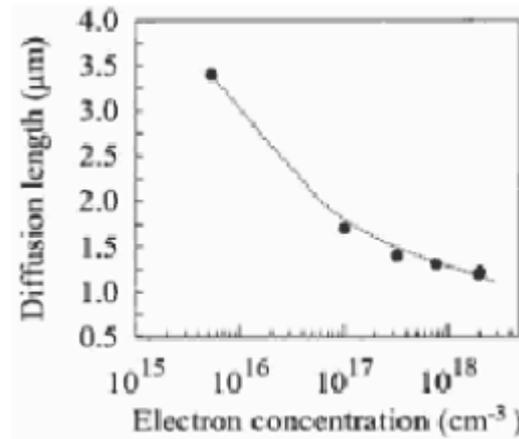


Figure I-17 : Longueur de diffusion des trous dans GaN en fonction de la concentration d'électrons.

1.6 Dopage

Le dopage est une technique qui permet d'augmenter la quantité de trous ou d'électrons d'un matériau en substituant une très faible quantité de ses atomes par des atomes d'une autre nature.

a. Dopage type N

Le dopage de type N dans les nitrures est couramment réalisé avec le silicium. La solubilité du silicium dans le GaN par exemple, est de l'ordre de 10^{20}cm^{-3} , il est donc adapté au dopage des nitrures, et le dopage N du GaN est actuellement bien maîtrisé.

b. Dopage type P

Le dopage de type P reste toujours un défi majeur pour le développement des nitrures. En effet, du fait du caractère intrinsèque de type N des nitrures (InN, GaN et InGaN), il faut dans un premier temps compenser les électrons en excès présents dans le matériau, avant d'arriver à créer un excès de trous.

Le dopage P est généralement obtenu en incorporant du magnésium(Mg) comme accepteur avec un procédé complexe d'activation à haute température [13].

1.7 Propriétés des alliages ternaires $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

1.7.1 Le ternaire $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

L'alliage ternaire $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ est composé de deux binaires GaN et InN. Ce matériau possède un gap direct qui varie entre 0,72 eV et 3,42 eV. Il balaye le spectre visible entier du proche infrarouge à l'ultraviolet. Il a une haute capacité thermique et sa sensibilité à des rayonnements ionisants est faible.

1.7.2 Formules de Vegard et Phillips

Certaines propriétés (Y) comme le paramètre de maille, la polarisation et les constantes piézoélectriques peuvent être déduites par interpolation linéaire suivant la loi de Vegard :

$$Y(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}) = (1-x)Y(\text{In}) + x.Y(\text{GaN}) \quad (1.8)$$

Avec une erreur inférieure à 2% pour n'importe quelle valeur de x ($0 \leq x \leq 1$).

1.7.3 Variation du gap d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, en fonction de la fraction de mole x (In)

L'énergie de bande interdite est définie par :

$$E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = x.E_g(\text{InN}) + (1-x).E_g(\text{GaN}) - x.(1-x).b \quad (1.9)$$

Où b est le paramètre de courbure (bowing paramètre).

En remplaçant $E_g(\text{InN})$ et $E_g(\text{GaN})$ par leurs valeurs à 300K, et en prenant $b = 1$, nous trouvons les équations qui donnent le gap d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de x [14].

$$E_{g1}(x) = x^2 - 2.41x + 3.3 \text{ eV} \quad (\text{cubique}) \quad (1.10)$$

$$E_{g2}(x) = x^2 - 2.43x + 3.34 \text{ eV} \quad (\text{hexagonal}) \quad (1.11)$$

L'énergie du gap diminue quand la composition d'indium augmente (figure 1-18).

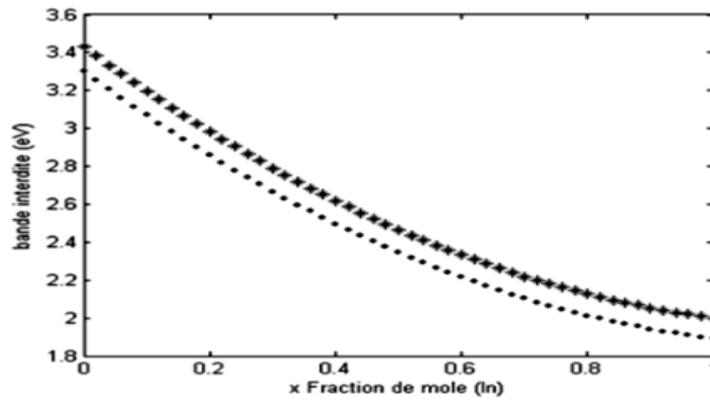


Figure 1-18: Variation du gap d' $In_xGa_{1-x}N$, en fonction de la fraction de mole In.

1.7.4 Les paramètres de maille

Les paramètres de maille a et c sont donnés par la Loi de Vegard [15]:

$$a(In_xGa_{1-x}N) = a(GaN) \cdot (1-x) + a(InN) \cdot x \quad (1.12)$$

$$a(In_xGa_{1-x}N) = 3.189 \cdot (1-x) + 3.54 \cdot x \quad (1.13)$$

$$c(In_xGa_{1-x}N) = c(GaN) \cdot (1-x) + c(InN) \cdot x \quad (1.14)$$

$$c(In_xGa_{1-x}N) = 5.184 \cdot (1-x) + 5.703 \cdot x \quad (1.15)$$

Les variations linéaires des paramètres de maille a et c en fonction de la composition x sont représentées dans la figure 1-19.

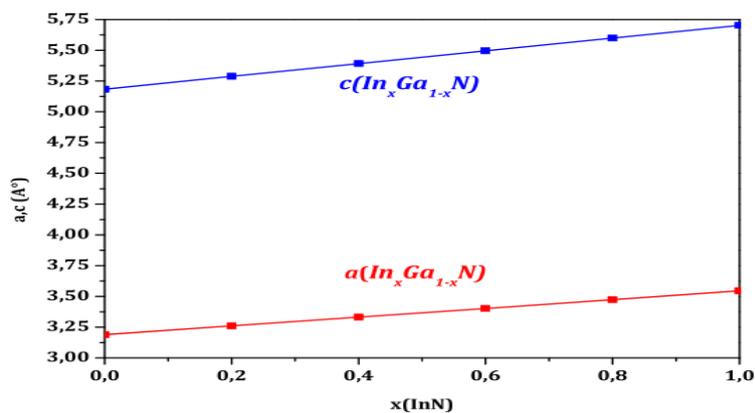


Figure 1-19 : Variation du paramètre de maille d' $In_xGa_{1-x}N$ en fonction de la composition x de l'alliage.

Cette variation est linéaire et croissante avec la composition x en Indium. A $x=0$, le paramètre de maille prend la valeur du GaN ($a=3.189 \text{ \AA}$, $c=5.184 \text{ \AA}$) et il augmente pour atteindre les paramètres de maille de l'InN ($a=3.545 \text{ \AA}$, $c=5.703 \text{ \AA}$) à $x=1$.

1.7.5 Les masses effectives

Les masses effectives des électrons et des trous sont données par les équations suivantes [16] :

$$m^*(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = x.m^*(\text{InN}) + (1-x) . m^*(\text{GaN}) \quad (1.16)$$

$$m^*_e(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = 0.11x + 0.20 (1-x) \quad (1.17)$$

$$m^*_h(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = 0.17x + 1.0 (1-x) \quad (1.18)$$

Les allures de ces équations sont représentées dans la figure 1-20.

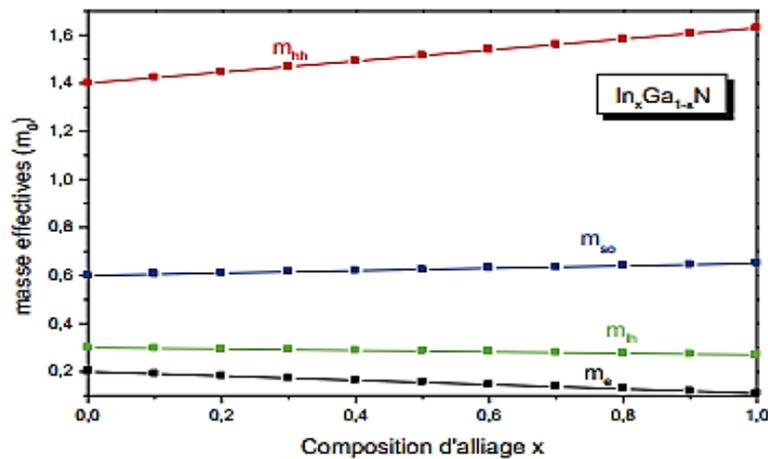


Figure 1-20 : Variation des masses effectives de l'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de la composition x .

1.7.6 Affinité électronique

L'affinité électronique dans InGaN est donnée par l'équation suivante [17] et représentée dans la figure 1-21.

$$e\chi(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = 3.8(1-x) + 4.7x \quad (1.19)$$

D'après cette figure, on remarque que l'affinité dans InGaN augmente avec la composition x de l'indium.

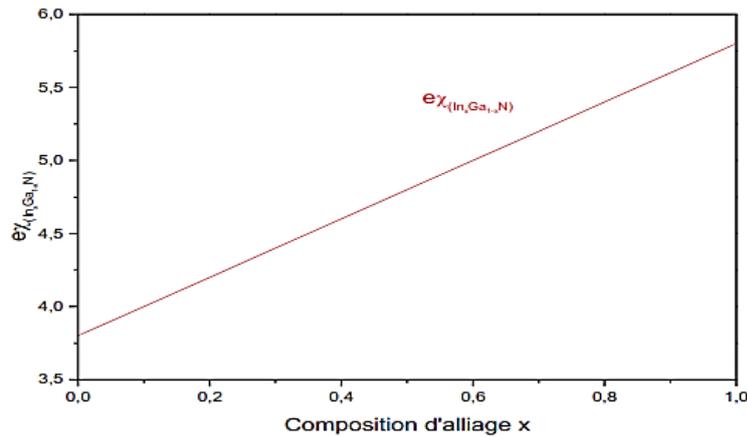


Figure 1-21: Variation de l'affinité électronique dans $In_xGa_{1-x}N$ avec la composition x

1.7.7 La permittivité

La permittivité électronique dans InGaN est donnée par l'équation suivante [18] :

$$\varepsilon(In_xGa_{1-x}N) = 15.3x + 8.9(1-x) \quad (1.20)$$

1.8 Propriétés optiques

Les propriétés optiques d'un matériau recouvrent principalement son indice de réfraction et son coefficient d'absorption. Ces propriétés sont primordiales pour les composants optoélectroniques puisqu'elles régissent le déplacement de la lumière dans le composant. Par exemple, dans un composant composé de différents matériaux, la lumière a tendance à se propager dans les matériaux ayant le plus fort indice de réfraction. On peut alors confiner la lumière dans une couche particulière, comme dans les lasers. Cette propriété est aussi très intéressante pour les applications de cellules solaires afin d'augmenter les efficacités d'absorption de la lumière.

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 , par :

$$n = c/v \quad (1.21)$$

La vitesse de la lumière dans un matériau n'est pas constante, elle change avec la longueur d'onde. La Figure (1-22) présente l'indice de réfraction du GaN en fonction de la longueur d'onde entre 0,35 et 10 μm . La valeur de l'indice de réfraction est extraite de la partie constante, loin de la zone d'absorption. Dans le cas du GaN, elle est égale à environ 2,3. Pour l'InN, elle vaut environ 2,9 dans l'infrarouge.

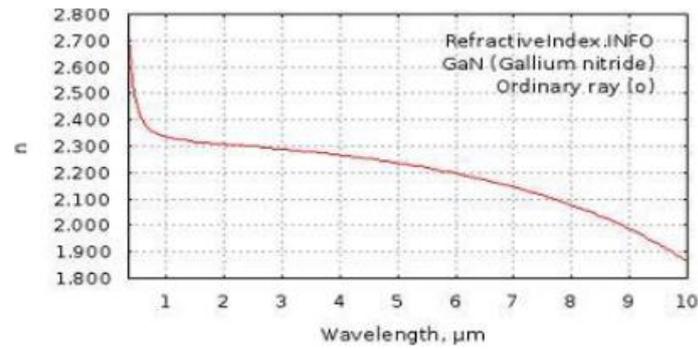


Figure 1-22 : Indice de réfraction du GaN.

Les chercheurs estimèrent la variation de l'indice de réfraction d'alliages de nitrures-III, voir la Figure (1-23). Ils relièrent la formule de l'indice de réfraction, n , à l'énergie d'un photon absorbé par un matériau, E_g , définie par :

$$E_g = hc/\lambda \quad (1.22)$$

Puisque le gap d'énergie interdite possède un paramètre de courbure, ils proposèrent que l'indice de réfraction ait également un paramètre de courbure.

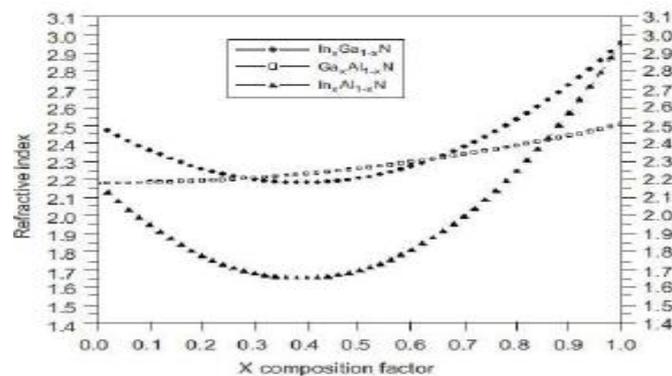


Figure 1-23 : Estimation de la variation de l'indice de réfraction dans l'InGaN, le GaAlN et l'InAlN.

L'indice de réfraction intervient également dans la détermination des coefficients de réflexion et de transmission (fig.1-24) à travers la relation de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \quad (1.23)$$

Avec n_1 et n_2 les indices de réfractifs de deux milieux

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

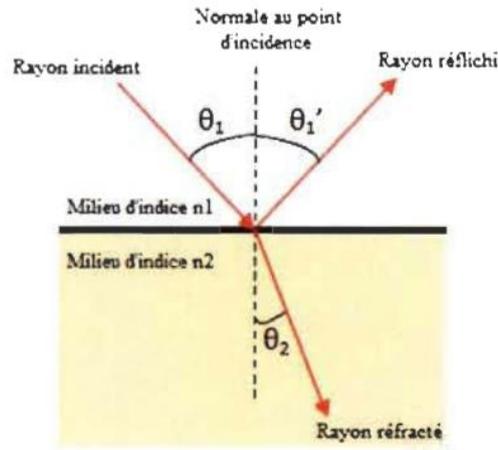


Figure 1-24 : Schéma des chemins optiques.

Le coefficient de réflexion, R , (transmission, T) est défini comme le rapport de l'intensité réfléchie, I_r , (transmise, I_t) sur l'intensité incidente, I_i :

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad ; \quad T = \frac{I_t}{I_i}$$

On a alors :

$$R = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad \text{et} \quad T = \frac{2 n_1}{n_1 + n_2} \quad (1.24)$$

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 :

$$\epsilon_r = \chi \epsilon_0 \quad (1.25)$$

Avec :

χ : la susceptibilité du matériau

ϵ_0 : la permittivité du vide [$8,85 \times 10^{-12}$ F.m⁻¹]

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

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (1.26)$$

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

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad \text{et} \quad T = \frac{2\sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

En considérant le dioptré air/GaN, on obtient un coefficient de réflexion de 39 % et un coefficient de transmission de 61 %.

Si un photon a une énergie inférieure au gap d'énergie du matériau, E_g , il ne sera pas absorbé. Le matériau est transparent pour cette énergie. En revanche, si un photon à une énergie supérieure ou égale à E_g , il sera alors absorbé et formera une paire électron-trou. Lorsque le phénomène d'absorption a lieu dans un matériau alors l'indice de réfraction a une composante complexe et est défini par :

$$\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda) \quad (1.27)$$

Avec k le coefficient d'atténuation, ou d'extinction [s.d]

On parle alors d'une permittivité relative complexe

$$\varepsilon_r(\lambda) = (n(\lambda) - ik(\lambda))^2 \quad (1.28)$$

Le coefficient d'absorption, α , est défini par :

$$(\alpha) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda} \quad (1.29)$$

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. On choisira donc des matériaux avec de forts coefficients d'absorption pour la fabrication de cellules solaires. [19]

1.9 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons vu les caractéristiques et les propriétés de l'InGaN tant sur le plan structurel, qu'électronique et optique pour bien comprendre le comportement de ce semi-conducteur.

Chapitre 2

Etude théorique des cellules solaires

2.1 Introduction

L'effet photoélectrique a été découvert par Alexander Edmund Bacrell en 1839. Il a été obtenu en absorbant des photons dans le matériau semi-conducteur qui a ensuite généré le potentiel électrique.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe du rayonnement solaire en électricité. Les modules solaires photovoltaïques sont utilisés pour réaliser ce changement d'énergie en produisant un courant continu, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou charger une batterie.

Il est donc clair que le matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photoélectrique

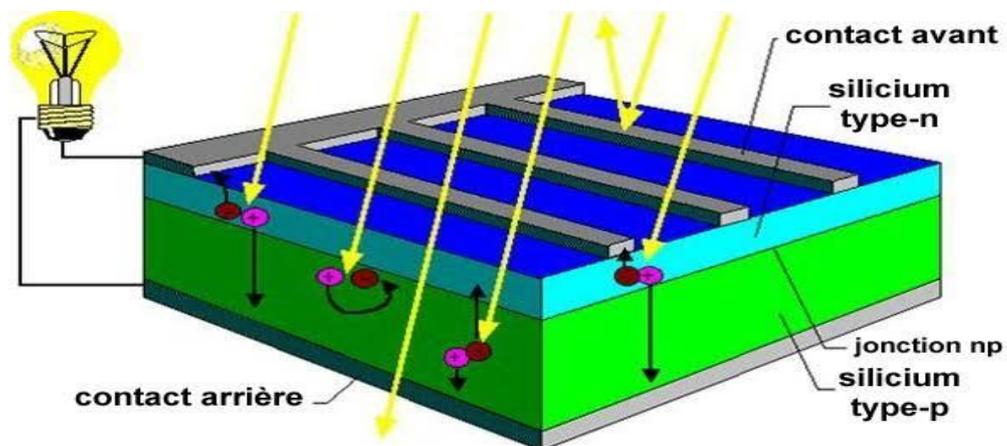


Figure 2-1 : Effet photovoltaïque.

2.2 Spectre solaire

Le rayonnement émis par le soleil correspond à celui du corps noir à la température de 5900°K. L'intensité du rayonnement au-dessus de l'atmosphère est de 1.35 kW/m², avec un spectre centré au voisinage de $\lambda=0.48 \mu\text{m}$.

A la surface du sol la densité de puissance n'est plus que de 0.9 kW/m², en raison de l'absorption essentiellement par l'ozone, l'eau et le gaz carbonique. En outre, le spectre n'est plus continu mais présente des bandes d'absorption [20].

Pour mesurer l'effet de l'atmosphère on utilise l'air masse, défini par :

$$AM = \frac{1}{\cos(\alpha)} \quad (2.1)$$

Où α représente l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale.

- AM 1.5 étant celui atteignant le sol par temps clair (surface d'un mètre carré faisant un angle de 48° avec l'équateur).
- AM1 correspond au soleil à la verticale ($\alpha=0$),
- AM4 à l'horizon ($\alpha=75^\circ$).
- AM0 est utilisé pour préciser les conditions au-dessus de l'atmosphère. Le spectre solaire est représenté sur la figure 2-2.

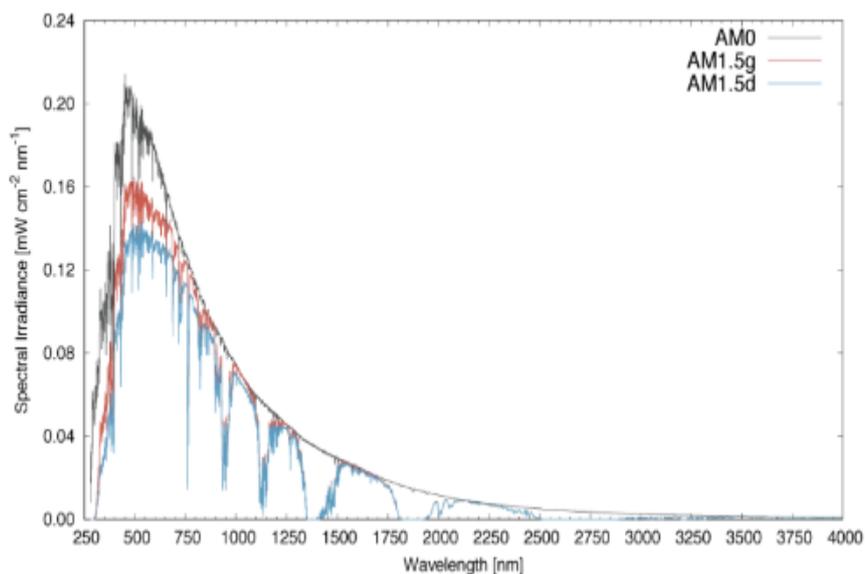


Figure 2-2 : spectre solaire à la surface de l'atmosphère terrestre (AM0) et au sol (AM1.5).

2.3 Effet photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est obtenue en exposant à la lumière un capteur appelé cellule solaire ou photopile. Il s'agit d'un phénomène physique dit "effet photovoltaïque". Le principe repose sur l'interaction lumière-matière dans les semi-conducteurs. En effet, lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite sont absorbés créant ainsi des paires électron-trou par le passage des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. Si ces paires électron-trou ne sont pas séparées, leur recombinaison se fait très rapidement en libérant un phonon. [13]

La séparation d'une paire électron-trou est faite grâce à une jonction p-n qui crée un champ électrique séparant les porteurs libres. La Figure 2-3(a) montre une image expliquant l'effet PV dans les semi-conducteurs. Les photons ayant une énergie très supérieure au E_g donnent lieu à un excès d'énergie pour les électrons.

Cette énergie excessive sera perdue sous forme de chaleur, ce qu'on appelle la thermalisation. C'est-à-dire que l'énergie du photon absorbé n'a pas été totalement convertie en énergie électrique. Pour cette raison, un concept d'empiler plusieurs jonctions p-n avec différents E_g (multi jonctions) peut surmonter cette problématique et convertir le maximum d'énergie optique en énergie électrique, comme montre dans la Figure 2-3(b).

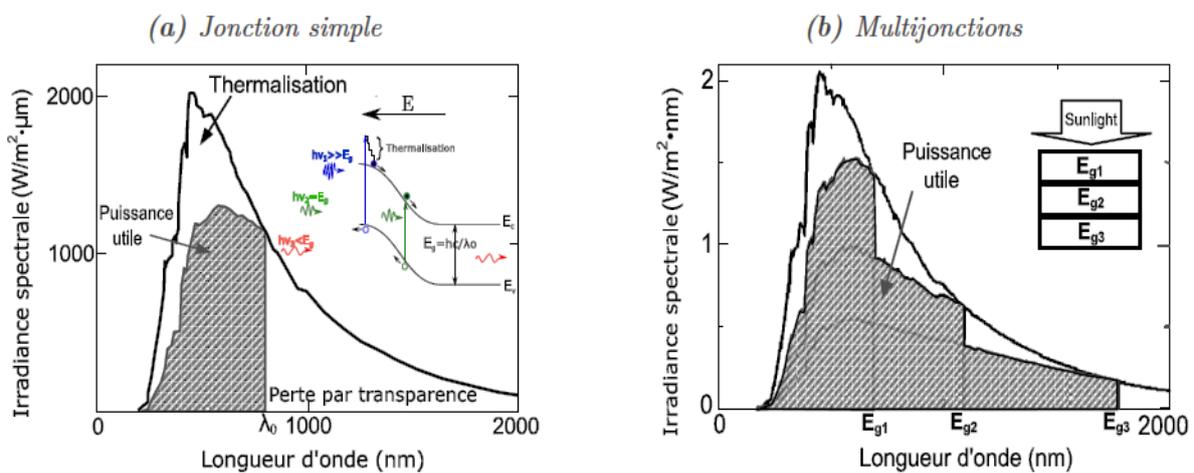


Figure 2-3 : Effet PV dans (a) une jonction p-n simple et (b) multi jonctions [21].

Le rôle principal d'une cellule photovoltaïque est de réduire ces recombinaisons et donc de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau. Ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel, donnant lieu à un photocourant. L'une des solutions

couramment utilisées, pour extraire sélectivement les électrons et les trous est de créer un champ électrique permanent dans le matériau au moyen d'une jonction entre une couche de semi-conducteur dopée P et une autre couche dopée N (jonction PN) [13].

2.4 Génération de porteurs en excès par la lumière

Les théories ondulatoires (équations de Maxwell) ou corpusculaires de la lumière nous permettent d'aborder les échanges entre la matière et le rayonnement lumineux.

Conformément à la théorie corpusculaire, les quanta d'énergie associés au rayonnement lumineux s'appellent photons. Dans le cadre de la mécanique quantique, l'énergie du photon correspondant à une radiation donnée est reliée à sa longueur d'onde par la relation :

$$E_p = h \nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \quad (2.2)$$

Où ν : fréquence de la radiation, λ : longueur d'onde de la radiation en μm , c : vitesse de la lumière, E_p : énergie du photon en eV, et h : constante de Planck.

Une radiation lumineuse rencontrant un semi-conducteur est absorbée suivant la loi de Lambert-Bouguer :

$$I(x) = I_0 (1 - R) \exp(-\alpha x) = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (2.3)$$

Où I : le flux de photons ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), x : profondeur d'absorption du faisceau dans le matériau à partir de la surface du semi-conducteur, R : coefficient de réflexion, représente la part de l'énergie lumineuse incidente I , réfléchie à la surface du matériau, α : coefficient d'absorption, traduit la probabilité d'absorption d'un photon par unité de longueur.

Quand les photons incidents ont une énergie suffisante pour provoquer le transfert des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, des paires électron-trou peuvent se créer. Ce phénomène appelé mode d'absorption intrinsèque ou fondamentale prédomine dans les cellules solaires [22].

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

$$G(x) = \alpha \cdot (1 - R) I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (2.4)$$

2.5 Mécanisme de recombinaison

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 interbandes, et par le phénomène de recombinaison Auger de manière non-radiative.

Le taux de recombinaison total peut alors s'écrire

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{defaut}}} + \frac{1}{\tau_{\text{radiatif}}} + \frac{1}{\tau_{\text{auger}}} = \sigma v N_{\text{defaut}} + B_{\text{radiatif}} n + B_{\text{auger}} n^2 \quad (2.5)$$

Avec :

σ la section efficace de capture [cm^2]

v la vitesse moyenne des porteurs libres [cm.s^{-1}]

N_{defaut} la densité des défauts

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

B_{radiatif} et B_{auger} des constantes dépendent du matériau [$\text{cm}^3.\text{s}^{-1}$ et $\text{cm}^6.\text{s}^{-1}$, respectivement]

2.5.1 Recombinaisons radiatives

La recombinaison radiative ou bande à bande, correspond à la transition d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence. Elle s'accompagne de l'émission d'un photon d'énergie proche de celle du gap du matériau (processus inverse de la photogénération) (Figure 2-4).

Ce type de recombinaison est un processus fréquent dans les semi-conducteurs à gap direct tels que les nitrures. A noter qu'il est à la base de la photoluminescence et des LEDs.

Il est décrit par la relation suivante avec β coefficient de recombinaison radiative :

$$U_{\text{rad}} = \beta. (n.p - n_i^2) \quad (2.6)$$

2.5.2 Recombinaisons Shockley-Read-Hall (SRH)

Le mécanisme de recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH) est schématisé sur la figure 2-5. Ce mécanisme fait intervenir un défaut localisé dans la bande interdite du matériau qui peut être un centre recombinant pour les porteurs libres.

Les défauts de ce type sont prépondérants dans les matériaux nitrures et ce mécanisme jouera donc un rôle important dans le fonctionnement des cellules solaires basées sur ces matériaux.

On écrit le taux de recombinaison U_{SRH} .

$$R_{\text{SRH}} = \frac{P_n - n^2}{\tau_p \left[n + n_{ie} \exp\left(\frac{E}{KT}\right) + \tau_n \left(p + n_{ie} \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) \right) \right]} \quad (2.7)$$

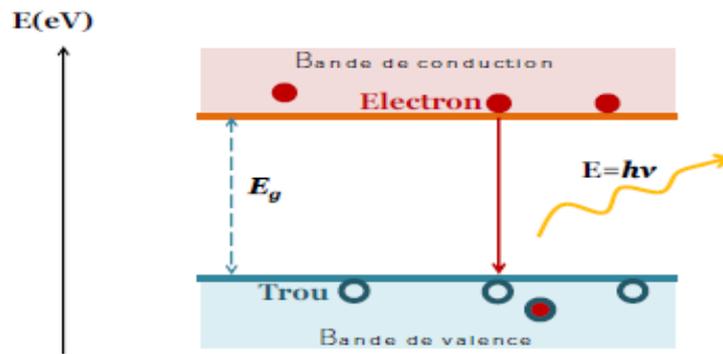


Figure 2-4 : Mécanisme de recombinaison radiative.

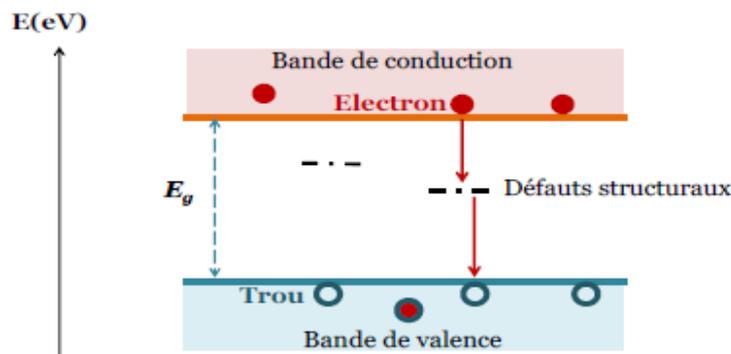


Figure 2-5 : Mécanisme de recombinaison Schokley-Read-Hall (SRH).

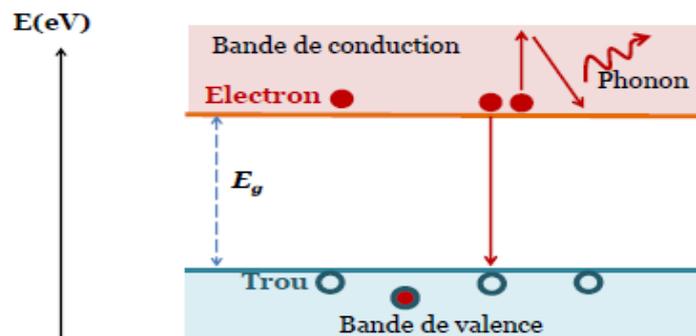


Figure 2-6 : Mécanisme de recombinaison Auger.

2.5.3 Recombinaisons Auger

Le mécanisme de recombinaison Auger est représenté sur la figure 2-6. Il s'agit aussi d'une recombinaison bande à bande, mais contrairement à la recombinaison radiative, l'énergie libérée est transmise à un troisième porteur qui se retrouve excité dans un niveau supérieur de la bande de conduction. Le troisième porteur peut ensuite se thermaliser en émettant un ou plusieurs phonons. A noter que ce phénomène existe aussi avec les trous dans la bande de valence.

Ce type de recombinaison est peu probable dans les matériaux à grand gap tel que le GaN et donc peu probable dans InGaN riche en gallium.

$$U_{\text{Auger}} = C_p \cdot p \cdot (n - n_i^2) + C_n \cdot n \cdot (p - n_i^2) \quad (2.8)$$

C_p et C_n les coefficients Auger pour les électrons et les trous.

2.6 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

La cellule solaire est un composant électronique capable à fournir l'énergie, si elle est éclairée convenablement. Si l'énergie des photons qui atteignent la cellule solaire est supérieure à l'énergie de la bande interdite du matériau, une paire électron-trou est générée. Le champ électrique crée entre les deux bornes de la jonction PN permet à la paire électron-trou de se séparer.

Le principe de fonctionnement de la cellule solaire est illustré dans la figure 2.7. Les photons incidents créent des porteurs libres dans chacune des régions 1,2 et 3 dont le comportement diffère suivant le lieu de leur création. Les photo-porteurs minoritaires diffusent dans les zones électriquement neutres P et N. ceux qui atteignent la région de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photo-porteurs contribuent donc au courant de diffusion, en créant un photo-courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace (ZCE), les paires électron-trou, créées par les photons, sont dissociées par le champ électrique ; l'électron est propulsé vers la région de type N et le trou vers la région de type P. ces porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération [23].

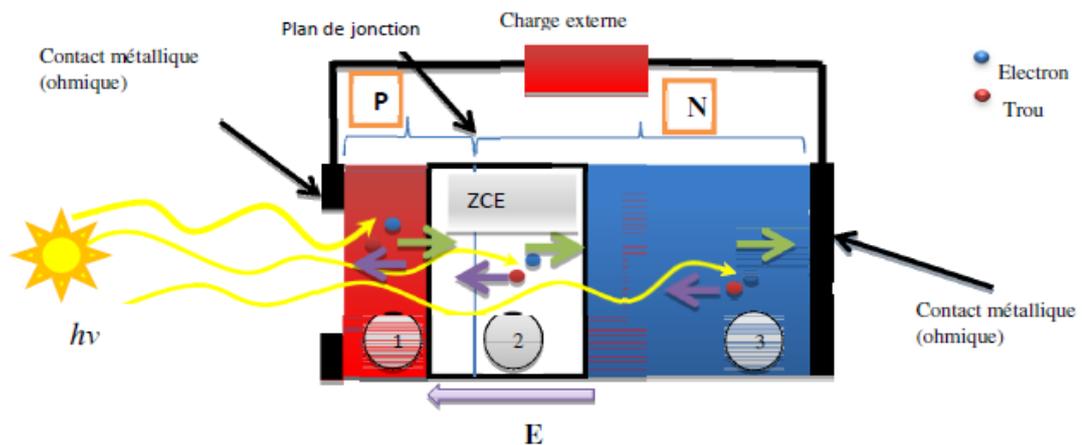


Figure 2-7 : Principe de fonctionnement de la cellule solaire.

2.7 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire

Une cellule solaire reliée à une résistance électrique et soumise à l'éclairement solaire débite un courant qui va se répartir entre la résistance et sa structure interne de diode. Sa caractéristique $I(V)$ correspond à la soustraction de la photo courant et du courant de la diode à l'obscurité par :

$$I(V) = I(V) - I_{ph} = I_s \exp(q.V/K.T - 1) - I_{ph} \quad (2.9)$$

Avec :

I_{ph} La densité de courant photogénéré

I_{obs} La densité de courant d'obscurité

I_s Le courant de saturation de la diode

q La charge élémentaire

K La constante de Boltzmann

T La température.

La caractéristique d'une cellule à l'obscurité est identique à celle d'une diode. Nous avons représenté sur la figure 2-8 les deux caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire à l'obscurité en pointillés, et sous illumination en trait plein. On remarque que la courbe sous illumination est simplement décalée par rapport à la première d'une valeur I_{cc} , qui traduit la génération constante du courant par la lumière. Cette valeur est appelée courant de court-circuit, puisque c'est le courant que génère la cellule sous lumière à tension nulle. La valeur V_{co} , à l'inverse, est la tension de circuit ouvert. Il représente en fait l'égalité du courant de génération par la lumière et du courant à l'obscurité [24].

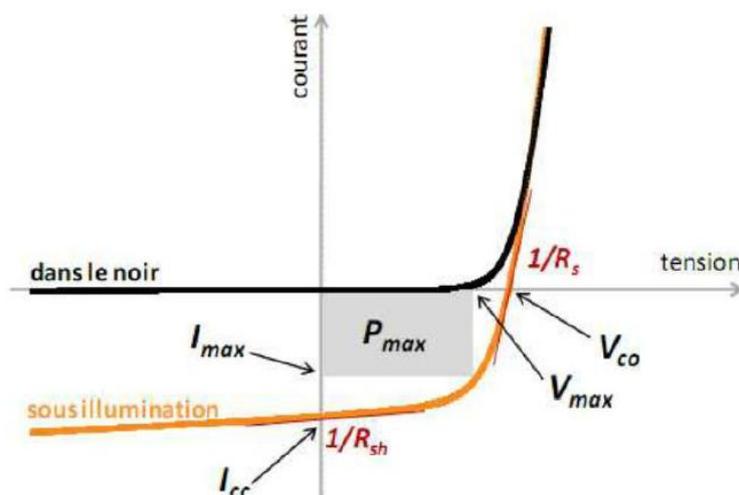


Figure 2-8 : Caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque.

2.8 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Une cellule solaire réelle peut être schématisée par la figure 2.9. Elle propose un modèle électrique de la cellule photovoltaïque. On y retrouve le générateur de courant I_{ph} , correspondant au courant photogénéré opposé au courant d'obscurité $I_{obs}=I_d$ de la diode polarisée en direct, ainsi que des résistances R_s , R_{sh} et la résistance de charge R_L .

R_s , la résistance série est due à la résistivité des différentes couches de la cellule : émetteur, base et contacts métalliques (en particulier leur interface avec le semi-conducteur). Cette résistance doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en diminuant la résistivité du matériau utilisé.

R_{sh} , la résistance shunt (parallèle) traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette résistance devra être la plus élevée possible.

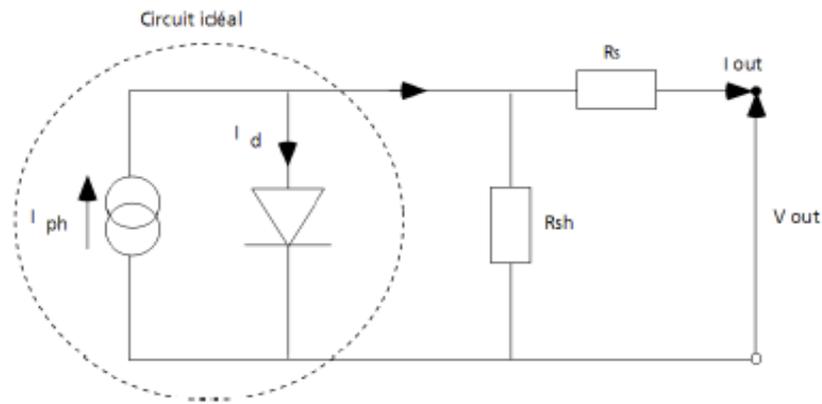


Figure 2-9 : circuit équivalent d'une cellule solaire.

2.9 Paramètres d'une cellule solaire

Courant de court-circuit, I_{cc}

Le courant de court-circuit est le courant débité par la cellule sous éclairement en court-circuitant la sortie. C'est à dire que : $I_{cc} = I(V = 0)$.

Pour une cellule solaire idéale le courant de court-circuit est égal au courant de photo-génération I_{ph} .

Tension de circuit ouvert, V_{co}

La tension de circuit ouvert est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert. C'est à dire : $V_{co} = V(I = 0)$.

Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{co} = qU_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (2.10)$$

Facteur de forme, FF

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (P_{max}) pour un point de fonctionnement $P_{max}(I_{max}, V_{max})$ de la courbe courant-tension (Figure 2-10). Le facteur de forme est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (2.11)$$

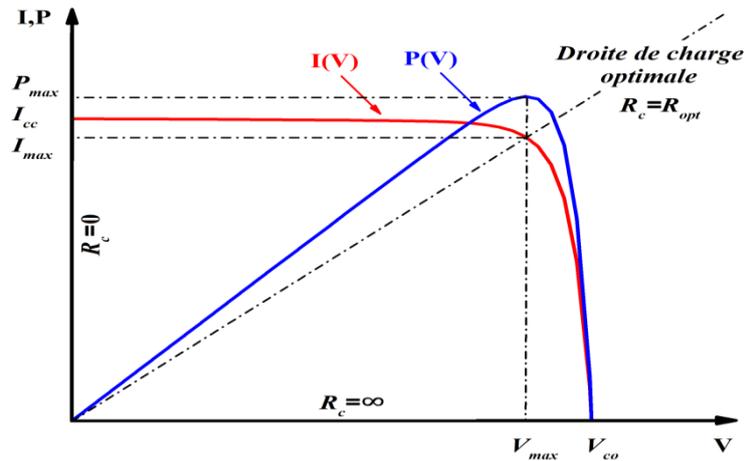


Figure 2-10 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire.

Rendement de conversion, η

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

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = FF \cdot \frac{V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (2.12)$$

Où P_{in} est la puissance incidente de la lumière est égale à la puissance solaire $P_{solaire}$ ($P_{solaire} = 100 \text{ mW/cm}^2$).

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

A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique. En circuit ouvert ($R_c = \infty$, $I = 0$, $V = V_{co}$) ou en court-circuit ($R_c = 0$, $I = I_{cc}$, $V = 0$), aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c pour laquelle la puissance fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale notée P_{max} .

Réponse spectral

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 :

$$RS = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} (A/W) \quad (2.13)$$

Le rendement quantique externe **EQE** (fig.2.11) 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 :

$$EQE(\lambda) = RS(\lambda) \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot q} \quad (2.14)$$

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 :

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1-R(\lambda)} \quad (2.15)$$

Où $R(\lambda)$ représente le coefficient de réflexion pour la longueur d'onde λ [25].

Le rendement quantique dépend de plusieurs propriétés du matériau ; coefficient d'absorption, profondeur de jonction X_j , l'épaisseur de la zone de charge de déplétion, la durée de vie des porteurs et leur mobilité et la recombinaison en surface [26].

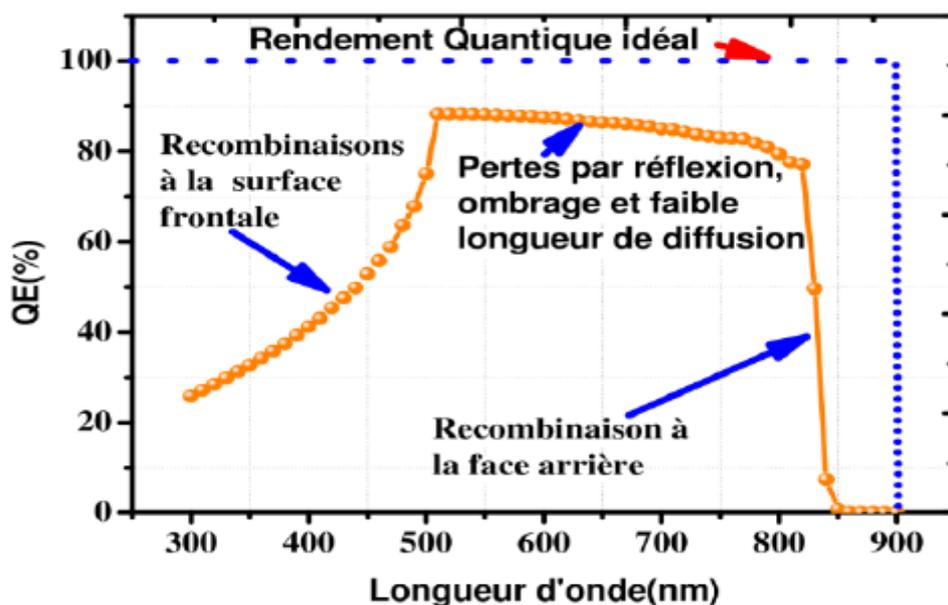


Figure 2-11 : Rendement quantique externe de la cellule solaire et les différents types de pertes.

2.10 Principales technologies solaires photovoltaïques

On peut distinguer trois grandes familles de cellules solaires (Fig.2.12) :

- **les cellules au silicium cristallin**, pour lesquelles l'élément actif est le silicium dopé dans la masse. Bien que plus ancienne, cette technologie représente encore 90 % des parts de marché du fait de sa robustesse et de ses performances (rendement modules allant de 12 à 20 % pour une durée de vie de 30 ans environ) ainsi que des investissements importants qui lui ont été destinés, que ce soit pour la transformation du silicium, l'élaboration des cellules ou l'assemblage des modules.
- **les cellules à base de couches minces** qui ont en commun le procédé de dépôt du matériau semi-conducteur à faible épaisseur sur des substrats variés et donnant un aspect uni, produisant des modules de rendement légèrement inférieur (de 7 à 13 %). La part de marché pour l'ensemble de ces technologies est d'environ 10 % et reste relativement stable : ces filières ont perdu l'avantage de leur moindre coût de production avec les investissements massifs consentis dans le silicium au début des années 2000.
- **les cellules à base de photovoltaïque organique**, segment sur lequel la recherche s'intensifie dans la perspective de produire des cellules à très bas coût pour des applications nouvelles. Leur principe de fonctionnement est basé sur les cellules à colorant de Michaël Grätzel avec des variations sur le type de matériaux utilisés. Avec des rendements de l'ordre de 3 à 5 %, leur point faible reste aujourd'hui encore leur durée de vie limitée.

Enfin, la famille des hybrides présentée sur l'illustration ci-dessous rassemble les cellules mettant en présence des technologies de natures différentes pour atteindre des rendements optimisés [27].

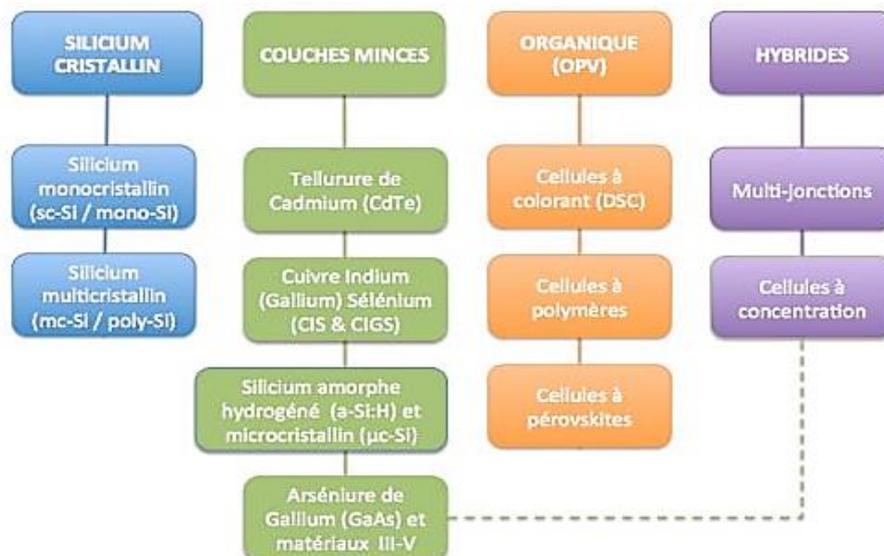


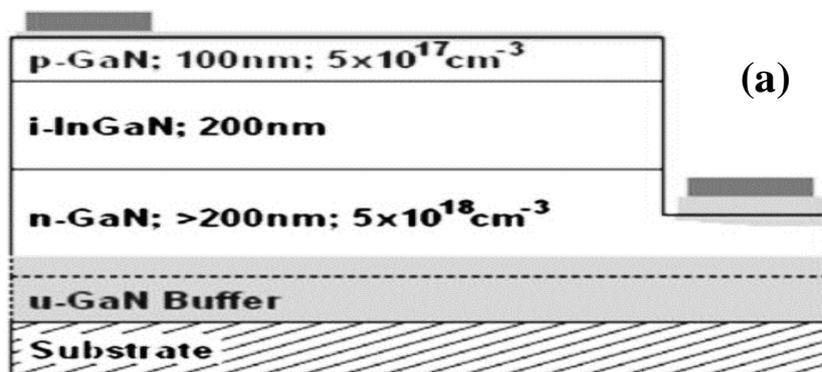
Figure 2-12 : Classification des principales technologies de cellules solaires PV.

2.11 Cellule solaire à base d'InGaN

2.11.1 Simple jonction

Le matériau InGaN fut proposé pour la première fois pour des applications photovoltaïques en 2003. En mettant en avant son gap d'énergie modulable et sa résistance aux radiations de haute énergie. Depuis la fabrication de cellules photovoltaïques à base d'InGaN réalisée avec une homojonction PN ou PIN sur GaN des structures en double hétérojonction P-GaN/I-InGaN/N-GaN, plus faciles à fabriquer, furent également largement étudiées [28].

En 2007, Jani et al ont élaboré une cellule PIN en double hétérojonction dont les caractéristiques sont une tension en circuit ouvert (V_{co}) de 2,4V, une densité de courant de court-circuit (I_{cc}) de 3,7 mA/cm² et un facteur de remplissage (FF) de 0,78 (figure 2-13).



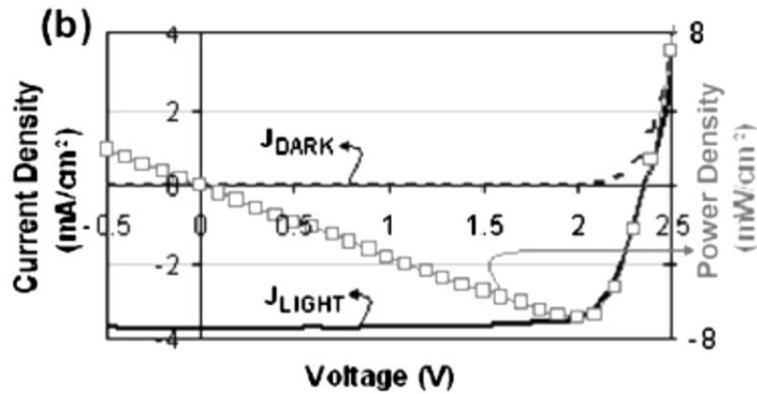


Figure 2-13 : (a) schéma de la cellule solaire PIN à double hétérojonctions, (b) Caractéristique courant-tension obtenue par Jani *et al.* montrant un rendement de 6,93 %, avec un V_{co} de 2,4 V, un J_{cc} de 3,7 mA/cm² et un FF de 0.78 [19].

Les cellules photovoltaïques présentant les plus hauts rendements, en simple et multi-jonctions, 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.

Il reste cependant encore de nombreux problèmes technologiques à résoudre. 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.

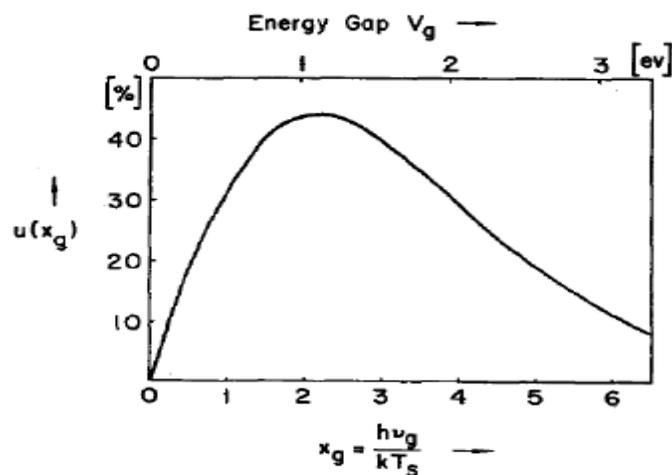


Figure 2-14 : Rendement théorique maximum en fonction du gap d'énergie [29].

La Figure 2-14 présente le rendement théorique maximum en fonction du gap d'énergie. On observe qu'un rendement de 44 % pourrait être atteint avec un matériau possédant un gap de 1,1eV.

Les composés III-nitrides sont des matériaux à hautes performances photovoltaïques, avec une V_{co} plus de 2,4 V et une efficacité quantique interne plus de 60%. Avec des récentes révisions pour le gap de InN à ~0,65 eV, le gap de InGaN maintenant couvre la gamme du spectre entre l'infrarouge et l'ultraviolet.

Pour les structures PN et PIN (figure 2-15) étudiées par simulation numérique, le rendement optimal est obtenu pour le taux de dopage le plus élevé de l'ordre de 10^{19} cm^{-3} , et pour l'épaisseur la plus faible, 0.01 μm . La couche P intervient très peu dans l'absorption du spectre solaire et son rôle est dans la formation de la zone de charges d'espace et de la distribution du champ électrique [30].

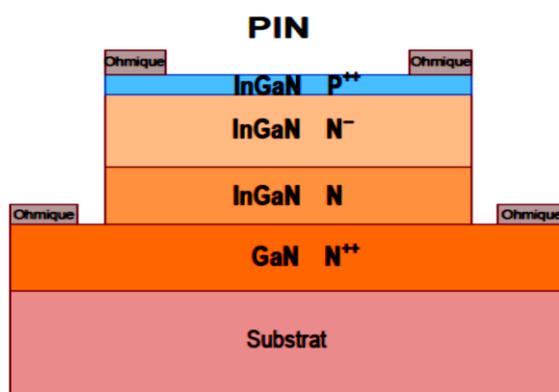


Figure 2-15 : Structure de la cellule solaire InGaN la structure PIN.

La figure 2-16 montre la variation du rendement d'une cellule solaire PN en InGaN en fonction du taux de dopage et de l'épaisseur de la couche P pour une épaisseur donnée de la couche P.

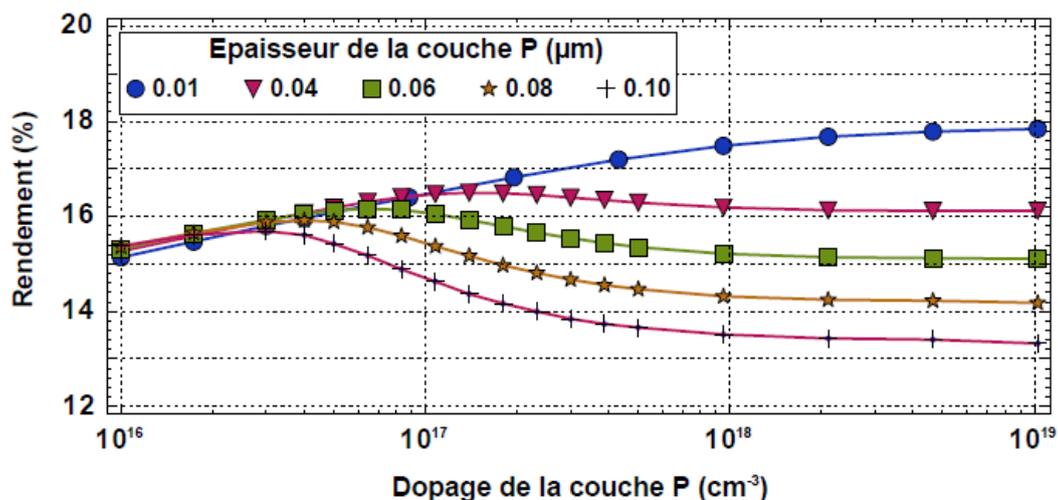


Figure 2-16 : Influence du taux de dopage et de l'épaisseur de la couche P sur le rendement d'une cellule solaire PN en InGaN.

Pour la structure PIN, le rendement optimal est obtenu pour une couche intrinsèque avec un taux de dopage de $5.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. La structure PIN a bien évidemment un rendement plus élevée que la structure PN, 19.0 % contre 17.8 % avec x : la composition d'indium (voir tableau 2-1).

	x	η (%)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA=cm ²)	FF (%)
PN	0,56	17,8	0,855	26,75	77,85
PIN	0,59	19	0,875	27,36	79,39

Tableau 2-1 : Comparaison des performances photovoltaïques optimales des cellules solaires PN et PIN à base d'InGaN.

2.11.2 Multi-jonction

Les cellules multi-jonctions sont appelées cellule de troisième génération. Ce sont plusieurs couches de matériaux déposées l'une sur l'autre. Les matériaux utilisés sont les semi-conducteurs III-V. Elles se composent de plusieurs jonctions $p-n$. On améliore le rendement par rapport aux cellules simples ce qui permet d'atteindre des rendements de plus de 40 %. Elles sont utilisées pour des applications spatiales et ont une sensibilité élevée sur une large plage de longueur d'onde. La structure des cellules multi-jonctions est composée par l'empilement de

plusieurs sous-cellules l'une sur l'autre avec des gaps décroissant reliées par jonction tunnel. Ce sont des cellules qui utilisent des semi-conducteurs comme le GaAs et le GaN (figures 2-17 2-18) [31].

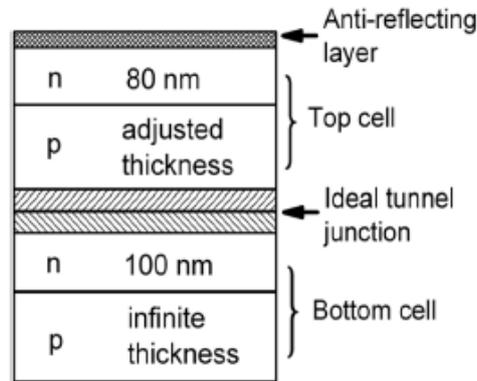


Figure 2-17 : Schéma d'un exemple d'une cellule solaire à double-jonction.

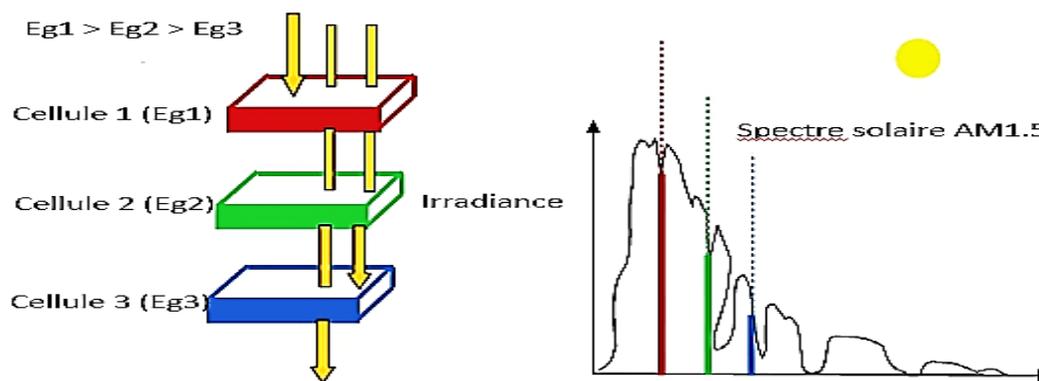


Figure 2-18: Schéma synoptique de la cellule solaire multi-jonctions.

En utilisant par exemple trois matériaux en InGaN de gap décroissants, il a été possible d'atteindre un rendement de 41.76% dans une cellule solaire multi-jonctions en InGaN sous une illumination AM1.5. Les résultats de simulation du rendement (η), de la densité de courant de court-circuit (J_{cc}), la tension en circuit-ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) des cellules solaires InGaN (SJ, DJ, TJ) sont montrés dans les caractéristiques J-V de la figure 2-19 [32].

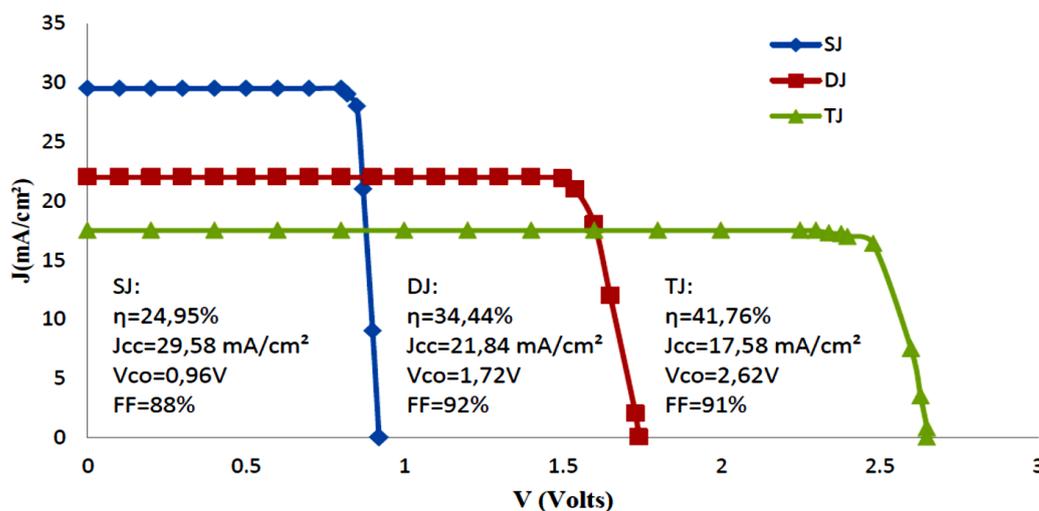


Figure 2-19 : Rendement (η), densité de courant de court-circuit (J_{cc}), voltage en circuit-ouvert (V_{co}) et facteur de forme (FF) des cellules solaires de InGaN, cercle : simple jonction (SJ), carré : double jonctions (DJ), triangle : triple jonction (TJ).

Les recherches actuelles sur les cellules solaires multi-jonctions III–V poursuivent essentiellement deux buts : l’augmentation du rendement de conversion et la baisse des coûts de fabrication des cellules.

La technologie III-V est à base de couches minces et permet d’utiliser moins de matériau pour la réalisation de la cellule. Une étude de simulation réalisée par Bremner et al. a montré que sous éclairement AM1.5, une cellule triple jonction pourrait avoir un rendement maximal de 51,58%. Le tableau 2-2 regroupe les valeurs théoriques des rendements maximaux qu’ils ont obtenus pour des cellules multi-jonctions comportant entre 1 et 8 sous-cellules sous éclairement AM1.5 [13].

E_{G1}	E_{G2}	E_{G3}	E_{G4}	E_{G5}	E_{G6}	E_{G7}	E_{G8}	η (%)
1.34								33.68
0.94	1.6							45.71
0.94	1.37	1.90						51.58
0.71	1.11	1.49	2.00					55.31
0.70	1.01	1.33	1.67	2.14				57.61
0.69	0.96	1.20	1.47	1.79	2.24			59.41
0.69	0.93	1.14	1.37	1.60	1.90	2.33		60.78
0.51	0.75	0.98	1.18	1.40	1.63	1.92	2.35	61.42

Tableau 2-2 : Rendements théoriques maximaux obtenus par Bremner et al. pour des cellules multi-jonctions comportant entre 1 et 8 sous-cellules sous éclairage AM1.5.

2.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelque notion préliminaire nécessaire pour la compréhension du comportement de la photovoltaïque, tout en expliquant le fonctionnement de la cellule solaire et ses différentes caractéristiques.

Nous avons décrit la cellule solaire, ses différents paramètres électriques (rendement, facteur de forme), nous avons aussi présenté son circuit équivalent. De même, nous avons présenté les cellules simple jonction et multijonction en InGaN.

Chapitre 3

Simulateur Silvaco

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons découvrir le logiciel SILVACO avec ses différents outils de simulation interactifs permettant la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs semi-conducteurs.

3.2 Présentation du logiciel TCAD-SILVACO

SILVACO (Silicon Valley Corporation) est un environnement de logiciels qui permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs à semi-conducteur. Cet outil sert à la modélisation des dispositifs à semi-conducteur avant leur fabrication. Il est très utile dans le développement de beaucoup de projets de recherches. Le TCAD-SILVACO inclut de nouveaux modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, de nouvelles techniques de maillage, l'optimisation des solutions linéaires, etc., tout en permettant d'obtenir des résultats de simulation très proches de celles de la pratique. L'avantage majeur de ce type de simulateurs est qu'il donne la possibilité de visualiser des phénomènes physiques difficilement accessibles et donc observables. Les modules de TCAD-SILVACO peuvent être utilisés pour :

- La simulation des étapes de fabrication technologique tels que, ATHENA, SSupreme3, SSupreme4, etc.
- La simulation électrique des dispositifs tels que, les Diodes, les MOSFET, les transistors bipolaires..., réalisée par le module ATLAS.
- Virtual Wafer Fab pour automatiser la simulation de fabrication des Wafers

3.3 Atlas

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel.

En plus du comportement électrique "externe", il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel. Ceci est réalisé en résolvant numériquement l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et des trous (à deux dimensions) en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par l'utilisateur ou par le programme.

Ce simulateur est composé de deux parties :

- une partie traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...),

- une partie formée des modèles physiques des composants semi-conducteurs les plus courants : modèles de recombinaison (Shockley Read Hall), d'ionisation par impact (Pearson et Monte Carlo), ainsi que les modèles de mobilité, et les statistiques de Fermi-Dirac et Boltzmann.

3.4 Entrées et sorties dans SILVACO ATLAS

La figure 3-1 montre les types d'informations entrant et sortant d'Atlas. La plupart des simulations Atlas utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier fichier d'entrée est un fichier texte contenant des commandes à exécuter par Atlas. Le deuxième fichier d'entrée est un fichier de structure qui définit la structure qui sera simulée.

Atlas produit trois types de fichiers de sortie. Le premier type de fichier de sortie est la sortie d'exécution, qui vous donne la progression et les messages d'erreur et d'avertissement au fur et à mesure de la simulation. Le deuxième type de fichier de sortie est le fichier journal, qui stocke toutes les tensions et courants aux bornes de l'analyse de l'appareil. Le troisième type de fichier de sortie est le fichier de solution, qui stocke les données 2D et 3D relatives aux valeurs des variables de solution dans l'appareil à un point de biais donné.

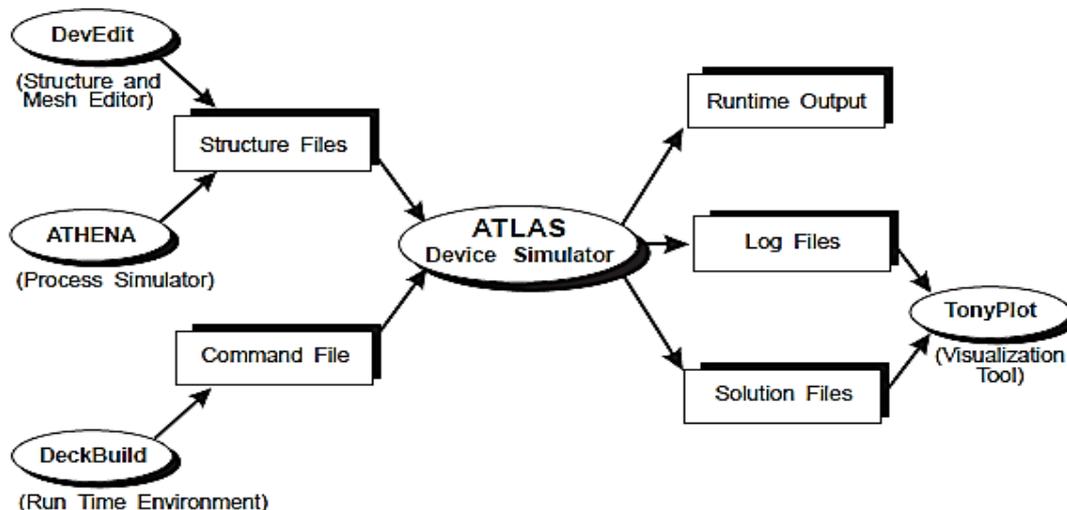


Figure 3-1 : Entrées et sorties d'Atlas.

3.5 Ordre des commandes :

L'ordre est très important dans ATLAS, il y a 5 groupes d'instruction qui doivent apparaître dans l'ordre correct comme le montre la figure suivante.

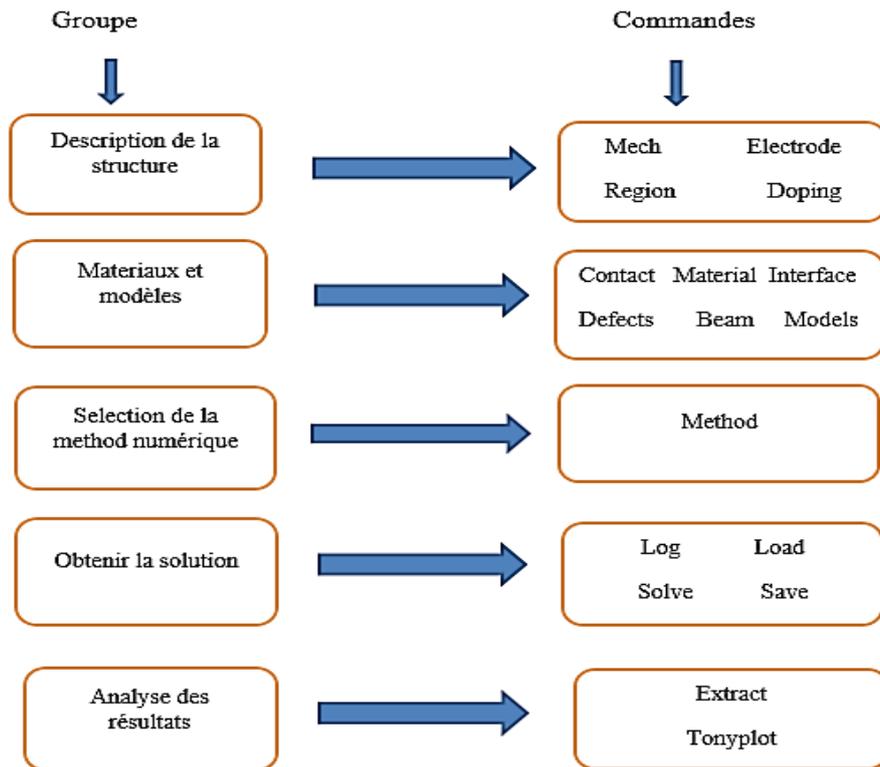


Figure 3-2 : Les commandes fondamentales dans un programme ATLAS.

***MESH** définit un maillage à la structure simulée ou permet de faire appel à un maillage défini précédemment.

* **REGION** définit chaque région de la structure. Cette commande permet non seulement de définir spatialement une région donnée mais aussi d'indiquer le matériau se trouvant dans cette région donnée.

* **ELECTRODE** permet de définir la position d'une électrode et éventuellement le matériau qui la forme.

* **DOPING** permet de définir un type, une concentration et un profil de dopage pour une région donnée de la structure.

* **CONTACT** spécifie le type de contact. Par défaut le contact est ohmique. Un contact Schottky peut être défini aussi en spécifiant le travail de sortie du métal et en introduisant des modèles de recombinaison de surface adéquates.

* **MATERIAL** permet de définir des paramètres propres associés à chaque matériau tels que la bande interdite, la permittivité, la mobilité des porteurs. Dans ATLAS, les paramètres par défauts de plusieurs matériaux sont déjà implémentés.

- * **INTERFACE** permet de définir les paramètres associés à l'interface de deux régions. Ces paramètres sont appliqués à l'interface
- * **DEFECTS** active le modèle de défauts dans la bande interdite.
- * **BEAM** indique un signal d'entrée optique sous forme d'un faisceau de lumière monochromatique ou polychromatique. Le faisceau ainsi défini est activé avec la commande SOLVE. BEAM est utilisé pour calculer des courants sous lumière ou des réponses spectrales.
- * **MODELS** spécifie les modèles physiques utilisés et la température globale de la structure.
- * **METHOD** permet de choisir les méthodes numériques à employer pour résoudre les équations et aussi de choisir les paramètres liés à ces algorithmes.
- * **LOG** permet d'enregistrer toutes les caractéristiques électriques calculées par ATLAS dans un fichier de type « .log ». Suivant le régime (continu, alternatif ou transitoire), toutes les données générées par la commande SOLVE sont enregistrées dans ce fichier.
- * **LOAD** charge des solutions antérieures qui vont ainsi servir comme valeur initiale pour trouver la solution d'autres points de polarisation.
- * **SOLVE** permet d'ordonner à ATLAS de trouver une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.
- * **SAVE** enregistre la structure et les grandeurs internes du dispositif pour tout point dans un fichier de sortie de type « .str ». Les informations sauvées correspondent à un état donné de la structure.
- * **EXTRACT** permet d'extraire des valeurs numériques à partir des fichiers « .log »
- * **TONYPLOT** permet de faire appel à l'outil de visualisation du même nom. Cet outil permet de représenter les fichiers « .str » et « .log ».

3.5.1 Spécification de la structure

Il s'agit de définir la structure la plus réaliste. La construction de la structure consiste en quatre étapes : définition du maillage, définition des régions, définition des électrodes et définition des dopages :

- **MESH** (définition du maillage) : Le maillage divise la structure simulée en petites cellules pour pouvoir résoudre les équations fondamentales numériquement. L'élément de maille utilisé est le triangle. Pour assurer une bonne précision lors de la simulation, il faut avoir le maillage le plus fin possible. Par contre si le maillage est très fin, le temps de calcul est très élevé, car il y a plus d'éléments à calculer. Le format général pour définir la maille est :

X. MESH LOCATION = <VALEUR> SPACING = <VALEUR>

Y. MESH LOCATION = <VALEUR> SPACING = <VALEUR>

La figure 3-3 montre un exemple de maillage d'une structure.

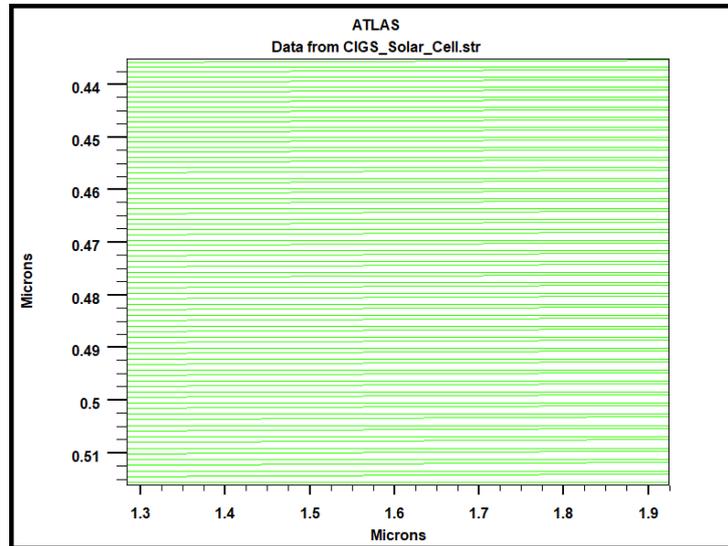


Figure 3-3 : Maillage du dispositif.

- **REGION** (définition des régions) : Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions dont le format de définition des régions avec dimensions en micromètre est le suivant :

REGION nombre = <integer><material_type>< position des paramètres >

La figure 3-4 montre la façon de définition des matériaux pour chaque région. Notons que le code de couleur indique le matériau. Les régions ont des lignes horizontales pour marquer leurs limites.

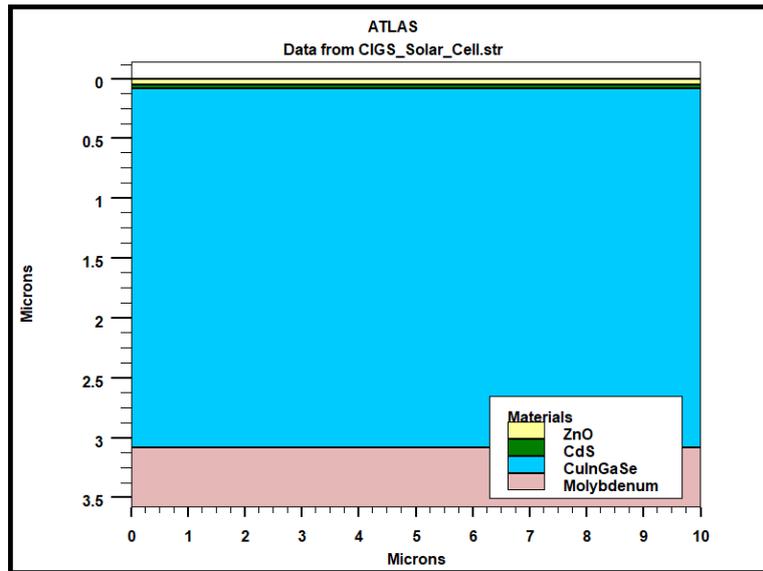


Figure 3-4 : Définition des régions et des matériaux par le logiciel ATLAS.

- **ELECTRODE** : Atlas a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies. Le format de définition d'électrodes est comme suite :

ELECTRODE name = < nom de l'électrode >> position des paramètres >

Les positions des électrodes sont localisées par les instructions suivantes :

X.MIN : Spécifie le point de départ de l'électrode.

RIGHT : la position de l'électrode se situe à la droite de la structure (inverse : LEFT).

TOP : la position de l'électrode est en haut de la structure (inverse : BOTTOM).

La figure 3-5 montre la position de l'anode et la cathode dans la structure.

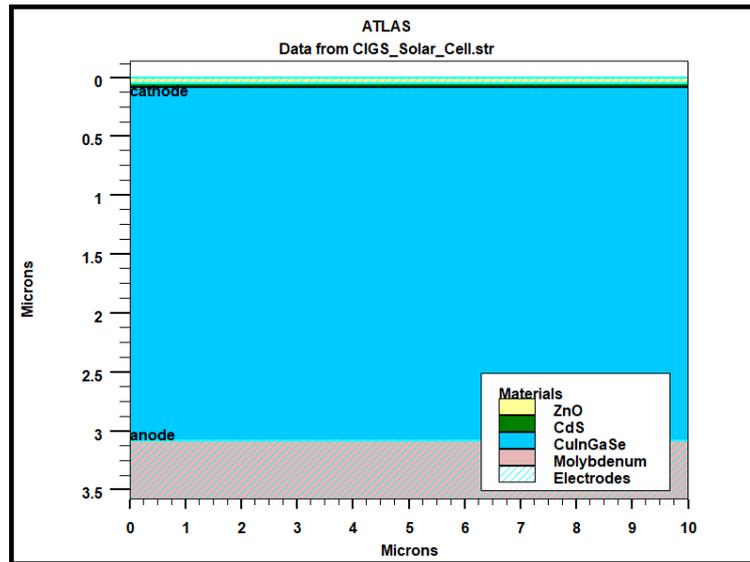


Figure 3-5 : Définition des électrodes par le logiciel ATLAS.

- **DOPING** (définition des dopages) : Le dernier aspect de la construction de la structure est le dopage. Le dopage peut être de type n ou p, aussi la distribution peut être uniforme, gaussien, etc...(fig.3.6)

Le format de la déclaration de dopage dans ATLAS est comme suite :

DOPING< type de distribution >< type de dopant >< position des paramètres >

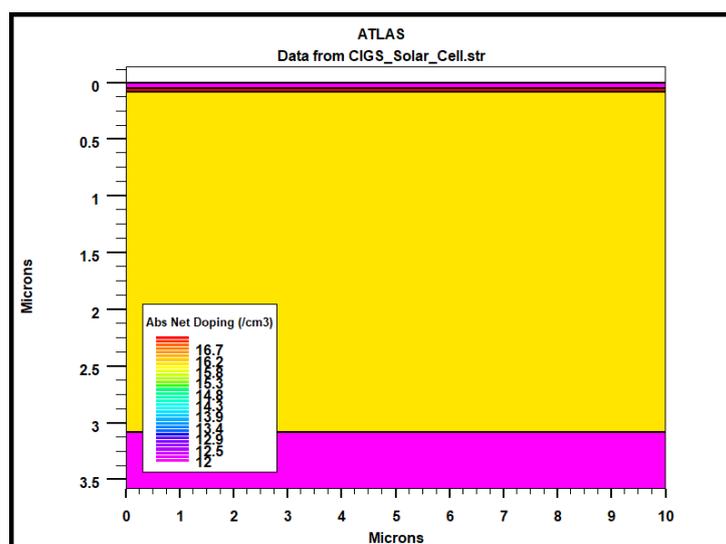


Figure 3-6 : Distribution du dopage dans une structure par le logiciel ATLAS.

3.5.2 Spécification des modèles physiques

Après la construction de la structure, il est nécessaire de préciser les modèles physiques et de définir les matériaux. La spécification de modèles et matériaux comporte les étapes :

- **MATERIAL** : Le format de la déclaration du matériau est le suivant :

MATERIAL < localisation >< définition du matériau >

Exemple:

```
MATERIAL MATERIAL=CdS EG300=2.42 PERMITTIVITY=10 \
AFFINITY=4.5 MUN=100 MUP=25 NC300=2.2e18 NV300=1.8e19.
```

Plusieurs autres paramètres peuvent être définis par la déclaration MATERIAL, comme exemples de ces paramètres : l'énergie du gap (EG300), la permittivité (PERMITTIVITY), l'affinité (AFFINITY), la mobilité d'électrons (MUN), la mobilité de trous (MUP), la densité d'états en Ec (NC300) et la densité d'états en Ev (NV300).

- **MODELS** : Ils indiquent les inclusions de différents mécanismes physiques (recombinaison, mobilité, etc...). Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation.

La syntaxe de la déclaration du modèle est la suivante :

MODEL< paramètres générales >< paramètres du modèle >

Exemple : SRH CONMOB FLDMOB.

SRH est le modèle de Shockley-Read-Hall. CONMOB est le modèle de la mobilité dépendante de la concentration du dopage. FLDMOB est le modèle de la mobilité dépendante du champ électrique.

- **CONTACT** : Il existe aussi les modèles qui concernent le type de contact soit contact ohmique par défaut ou contact redresseur (contact de Schottky), ce contact est reconnu par un travail de sortie (work function) comme :

Contact name= < integer > work=< integer >

Voici un exemple des contacts déclaration :

Contact name =anode workfun= 4.74

- **INTERFACE** : Les limites des semiconducteurs ou des isolants sont déterminées par la déclaration « interface ». La syntaxe est la suivante :

INTERFACE <paramètres> <interface_dimensions >

L'exemple suivant montre l'utilisation de la déclaration d'interface :

Interface x.min=0 x.max=2000 y.min=0 y.max=0 s.n=1e3 s.p=1e3

Les valeurs max et min déterminent les limites, s.n et s.p sont les vitesses de recombinaison superficielle des électrons et des trous aux interfaces.

- **LUMIERE** : la lumière est modélisée dans ATLAS par la déclaration :

BEAM <parameters>

En voici un exemple :

```
beam num=1 x.origin =1000 y.origin=-30 angle=90.0 power. file=AM0dis.spec reflects=1
front.refl back.refl
```

Cette déclaration définit le nombre des faisceaux lumineux qui est 1, l'origine du rayon pour des sources optiques 2D ; le **x.origin** et le **y.origin** sont les coordonnées x et y de l'origine du faisceau lumineux en microns. L'**angle** d'incidence de 90 degrés indique que le rayon est perpendiculaire à la surface éclairée de la cellule solaire. **power.file** spécifie la source spectrale de la lumière en indiquant le nom d'un fichier d'extension **.spec** qui contient les valeurs des intensités du spectre utilisé en fonction de leurs longueurs d'onde.

Le paramètre **reflects=1** donne le nombre de réflexions du faisceau lumineux. La déclaration **front.refl** et **back.refl** permet au rayon lumineux de se réfléchir en face avant et arrière de la cellule.

3.5.3 Sélection de la méthode numérique

Après la précision du modèle de matériaux, la sélection de la méthode numérique doit être indiquée. Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équation, trois types de techniques sont utilisées dans « Silvaco-Atlas » :

- Méthode de Gummel
- Méthode de Newton
- Méthode des blocks

Pour la méthode de GUMMEL, elle est utilisée pour la résolution des équations à une seule inconnue et des variables fixées constantes, la résolution se fait d'une manière itérative jusqu'à la solution est achevée. La deuxième méthode de NEWTON est la méthode la plus répandue dans le programme Atlas, elle est utilisée pour résoudre des systèmes d'équations à plusieurs inconnues. La troisième méthode est une combinaison des deux méthodes, elle est utile pour les systèmes d'équation mixtes.

3.5.4 Spécification des solutions

Après avoir sélectionné la méthode numérique il est nécessaire de déterminer les solutions. La spécification de solution est donnée par les déclarations : LOG, SOLVE, LOAD, et SAVE :

- **Log** : L'instruction Log est utilisée pour enregistrer toutes les caractéristiques terminales dans un fichier de données. L'exemple suivant montre un exemple d'utilisation de l'instruction LOG.

Log outfile = myoutputfile.log

L'exemple montre l'enregistrement de données dans le fichier (myoutputfile.log).

- **Solve** (Résoudre) : L'instruction SOLVE suit l'instruction LOG. Elle effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Cette déclaration a le format de base suivant :

SOLVE <bias_points>

Par exemple :

solve vanode=0 vstep=0.01 vfinal=2 name=anode

- **Load et Save** : La commande **LOAD (chargement)** introduit, à partir d'un fichier existant, pour chaque point de polarisation les solutions précédentes en tant que proposition initiale.

L'instruction **SAVE (sauvegarde)** permet l'enregistrement de toutes les informations obtenues pour un nœud dans un fichier de sortie. Les instructions pour load et save sont comme suit :

LOAD INFILE=<filename>

SAVE OUTFILE =<filename>

3.5.5 Analyse des résultats

Une fois la solution a été trouvée pour un problème de dispositif à semiconducteurs, les informations peuvent être affichées graphiquement :

- **EXTRACT** : les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou structure.
- **TONYPLOT** : démarre le programme « TonyPlot » permettant une représentation graphique des données.

3.6 Equations de base des Semi-conducteurs en ATLAS-SILVACO

3.6.1 Équations de continuité de porteurs

Les changements dans le temps des densités d'électrons et de trous mobiles sont modélisés à l'aide d'un ensemble couplé d'équations de continuité de courant :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{q} \Delta \cdot \vec{J}_n + G_{net} - R_{n,disp} \quad (3.1)$$

$$\frac{dp}{dt} = - \frac{1}{q} \Delta \cdot \vec{J}_p + G_{net} - R_{p,disp} \quad (3.2)$$

Où:

- J_n est la densité de courant électronique.
- J_p est la densité de courant du trou.
- G_{net} est le taux de production net dû à l'irradiation.
- $R_{n, disp}$ est le taux de recombinaison / génération dû aux pièges à électrons.
- $R_{p, disp}$ est le taux de recombinaison / génération dû aux pièges à trous.

3.6.2 Equation de poisson

Pour tenir compte des effets électrostatiques de la charge mobile et de la charge piégée, l'équation de Poisson dans un semi-conducteur s'écrit comme suit :

$$\Delta V = -\frac{q}{\varepsilon} [p - n + N_D^+ - N_A^-] \quad (3.5)$$

Où :

- V : le potentiel
 - n : la concentration d'électrons.
 - p : la concentration des trous.
 - ε : la permittivité.
 - q : la charge d'électrons.
- N_D^+ , N_A^- : les concentrations des atomes donneurs et accepteurs respectivement.

3.7 Conclusion :

Ce chapitre a présenté quelques informations de base en programmation par Silvaco-Atlas, alors plusieurs aspects spécifiques à la méthodologie de programmation ont été présentés comprenant structure de programme, Spécification des paramètres des matériaux et modèles physiques et sélection de la méthode numérique.

Chapitre 4

Simulation numérique de la cellule solaire et résultats de simulation

4.1 Introduction

Dans ce chapitre pratique nous allons utiliser SILVACO ATLAS pour simuler les caractéristiques électriques de la cellule tandem (deux jonctions) en InGaN. Notre cellule tandem se compose de deux sous-cellules en $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ reliées par une jonction tunnel. Nous commençons ce chapitre par étudier chacune des sous-cellules et la cellule tandem, ensuite nous allons étudier l'influence de l'épaisseur et du dopage sur les paramètres électriques pour optimiser les performances de notre cellule solaire tandem.

4.2 Modèles et paramètres de simulation [32]

Energie de gap :

$$E_g^{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = x.E_g^{\text{InN}} + (1-x).E_g^{\text{GaN}} - 1.43.(1-x).x \quad (4.1)$$

Avec $x=0.3$, $E_g^{\text{InN}}=0.7$ eV, $E_g^{\text{GaN}}=3.42$ eV, le gap d'énergie du matériau $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ est de l'ordre de 2.3 eV.

Affinité électronique :

$$\chi(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = 4.1 + 0.7(3.42 - E_g^{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}) \quad (4.2)$$

Pour $x=0.3$, l'affinité électronique est de l'ordre de 4.884 eV.

Permittivité :

$$\varepsilon(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = 15.3x + 8.9(1-x) \quad (4.3)$$

Pour $x=0.3$, la permittivité est de l'ordre de :

$$\varepsilon(\text{GaN}) = 4.31eV.$$

$$\varepsilon(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = 5.18eV.$$

Mobilité :

Pour notre étude, on a utilisé le modèle de Caughey-Thomas, la mobilité dépendante de la concentration des porteurs définie par l'expression :

$$\mu = \mu_{\min}^{\beta} + \frac{\mu_{\max}^{\alpha} - \mu_{\min}^{\beta}}{1 + \left(\frac{N_{tot}}{N_{ref}}\right)^{\gamma}} \quad (4.4)$$

Où N_{tot} la concentration du dopage. μ_{\min} , μ_{\max} , N_{ref} et γ des paramètres spécifiques du matériau. Les valeurs de ces paramètres sont celles par défaut dans Atlas-Silvaco. La mobilité des trous est de $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

Coefficient d'absorption :

$$\alpha(\lambda) = 2.2 \times 10^5 \sqrt{\frac{1.24}{\lambda} - E_g} \quad (4.5)$$

L'indice de réfraction n_r est calculé par le modèle Adachi :

$$n_r(\omega) = \sqrt{A \left(\frac{h\omega}{E_g}\right)^{-2} \left\{ 2 - \sqrt{1 + \frac{h\omega}{E_g}} - \sqrt{1 - \frac{h\omega}{E_g}} \right\} + B} \quad (4.6)$$

Où ω est la fréquence optique, A et B sont des paramètres dépendants de la composition x définis par:

$$A(x) = 9.827(1+x) - 53.57x \quad (4.7)$$

$$B(x) = 2.736(1+x) - 9.19x \quad (4.8)$$

Recombinaison :

Nous avons considéré le modèle Shockley-Read-Hall (**SRH**) pour le calcul du taux de recombinaison avec la durée de vie des électrons et des trous est de 6.5 ns. Le modèle Auger avec les paramètres Auger pour les électrons et les trous de l'ordre de $10^{-34} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ et le modèle de recombinaison radiative avec le paramètre optique de $3 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sont aussi considérés dans la simulation.

4.3 Structure de la cellule tandem

La cellule solaire à double jonction basée sur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ simulée numériquement est structurée comme illustrée sur la figure 4-1. Deux jonctions n – p individuelles sont interconnectées en série par une jonction tunnel.

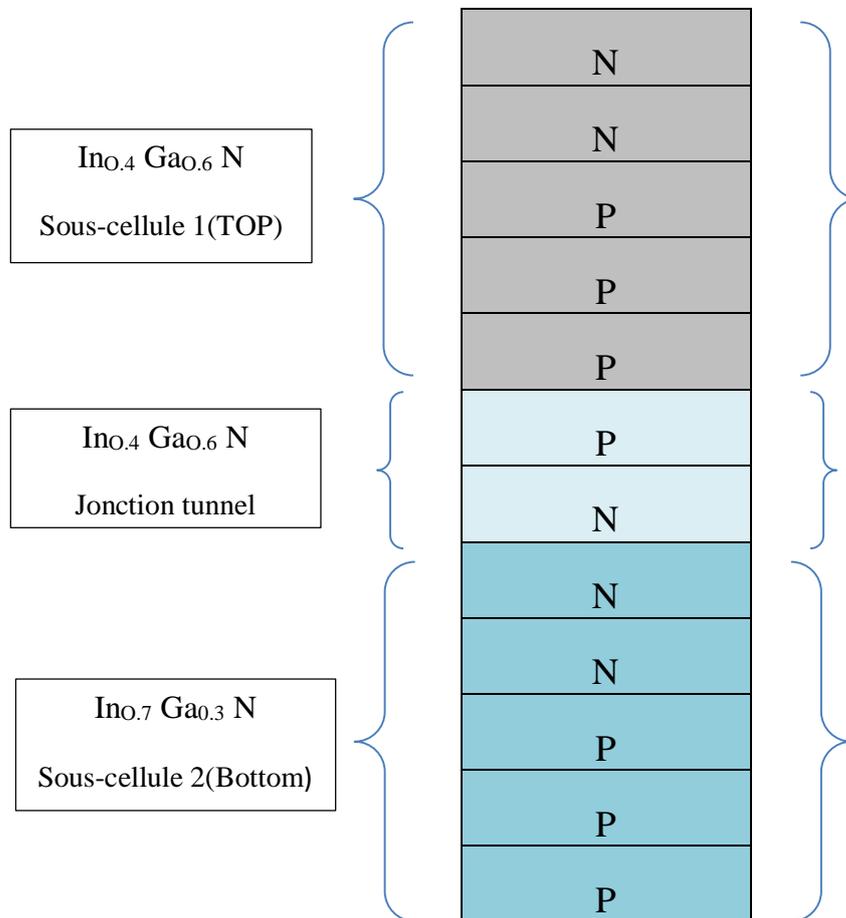


Figure 4-1 : Schéma d'une cellule solaire double jonction en InGaN.

4.4 Résultats et discussion [33] [34] [35]

4.4.1 Simulation de la cellule supérieure

Cette cellule est une jonction (n/p) en $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$. Les épaisseurs et les dopages choisis sont regroupés dans le Tableau 4-1.

Région	Épaisseurs (μm)	Dopage (cm^{-3})	Type de dopage
Window	0.05	2×10^{18}	N
Emetteur	0.15	5×10^{18}	N
Base	0.5	5×10^{15}	P
BSF	0.15	2×10^{18}	P
Buffer	0.15	1×10^{18}	p

Tableau 4-1 : épaisseurs et dopages des régions de la cellule supérieure.

La structure de cellule modélisée par ATLAS est présentée sur la Figure 4-2 et le maillage de la structure est illustré par la suite dans la Figure 4-3.

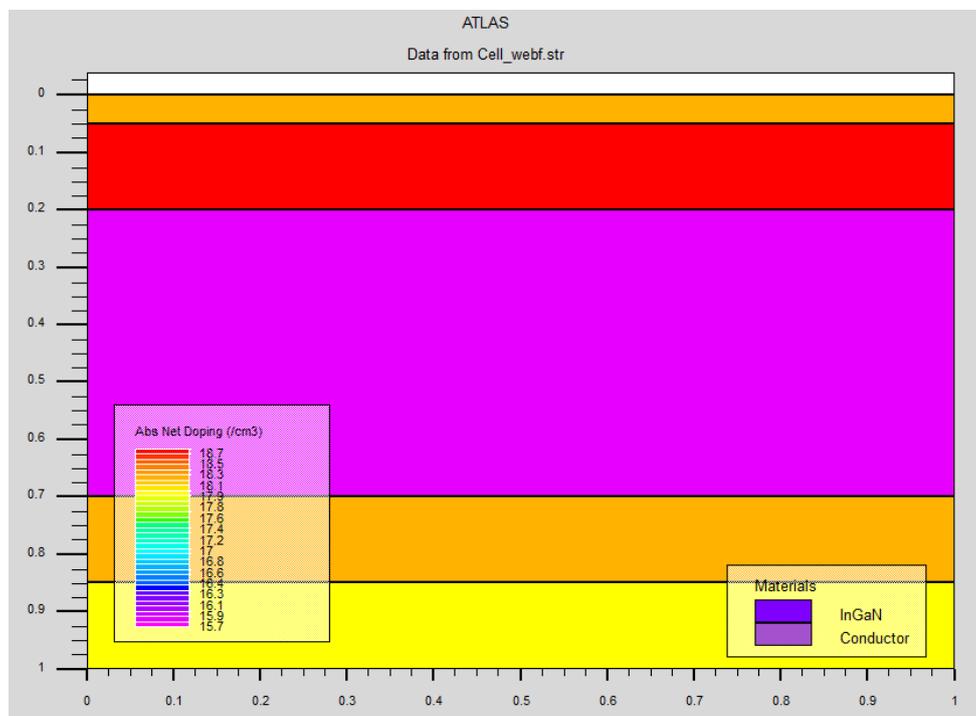


Figure 4-2 : Présentation de la structure de la cellule supérieure par tonyplot.

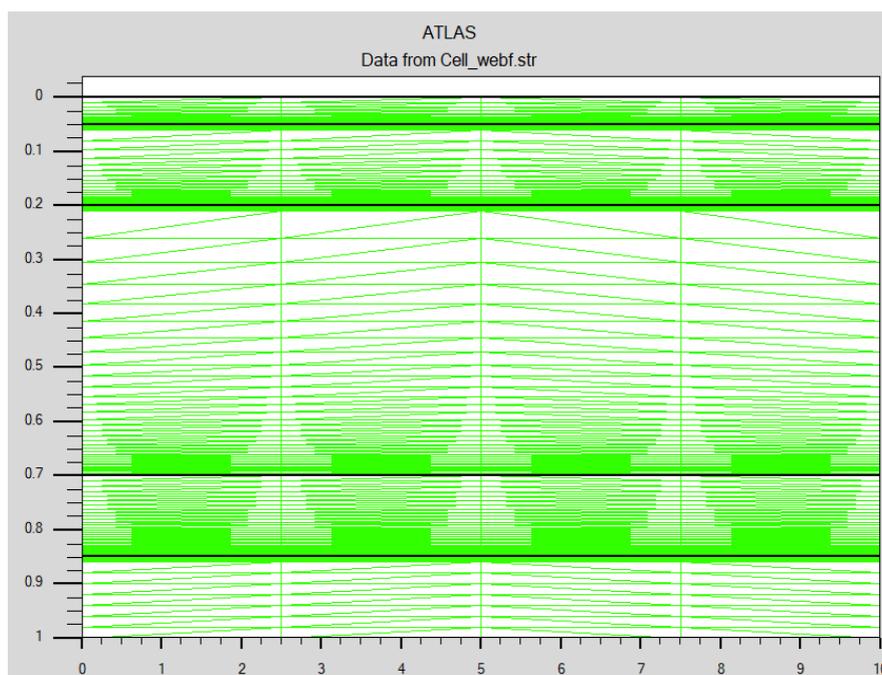


Figure 4-3 : Maillage de la structure simulée de la cellule supérieure.

On présente dans la Figure 4-4 la caractéristique J-V. sous éclairement AM0 de la cellule supérieure à base de $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ obtenue par ATLAS. A partir de cette caractéristique on a calculé les paramètres de sortie de la cellule solaire. Les paramètres de sortie calculés sont illustres dans le tableau 4-2.

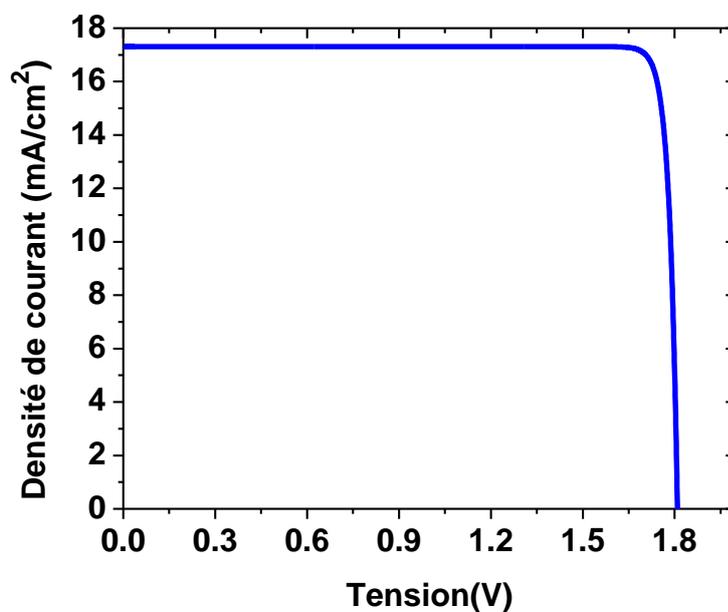


Figure 4-4 : La Caractéristique électrique J(V) sous éclairement AM0 de la cellule supérieure.

Paramètres	$J_{sc}(\frac{mA}{cm^2})$	$V_{oc}(V)$	$P_m(\frac{mW}{cm^2})$	$V_m(v)$	$I_m(\frac{mA}{cm^2})$	FF(%)	η (%)
Valeurs	17.31	1.75	2.98	1.74	1.71	92.66	21.84

Tableau 4-2 : Paramètres électriques de la cellule supérieure.

4.4.2 Simulation de la cellule inférieure

Cette cellule est une jonction (n/p) en $In_{0.7}Ga_{0.3}N$. Les épaisseurs et les dopages choisis sont regroupés dans le Tableau 4-3.

Région	Epaisseurs (μm)	Dopage (cm^{-3})	Type de dopage
Window	0.01	2×10^{18}	N
Emetteur	0.07	1.9×10^{19}	N
Base	0.8	1.6×10^{16}	P
BSF	0.01	2×10^{18}	P
Buffer	0.1	1×10^{17}	p

Tableau 4-3 : Epaisseurs et dopages des régions de la cellule inférieure.

La structure de cellule modélisée par ATLAS est présentée sur la Figure 4-5 et le maillage de structure est illustré par la suite dans la Figure 4-6.

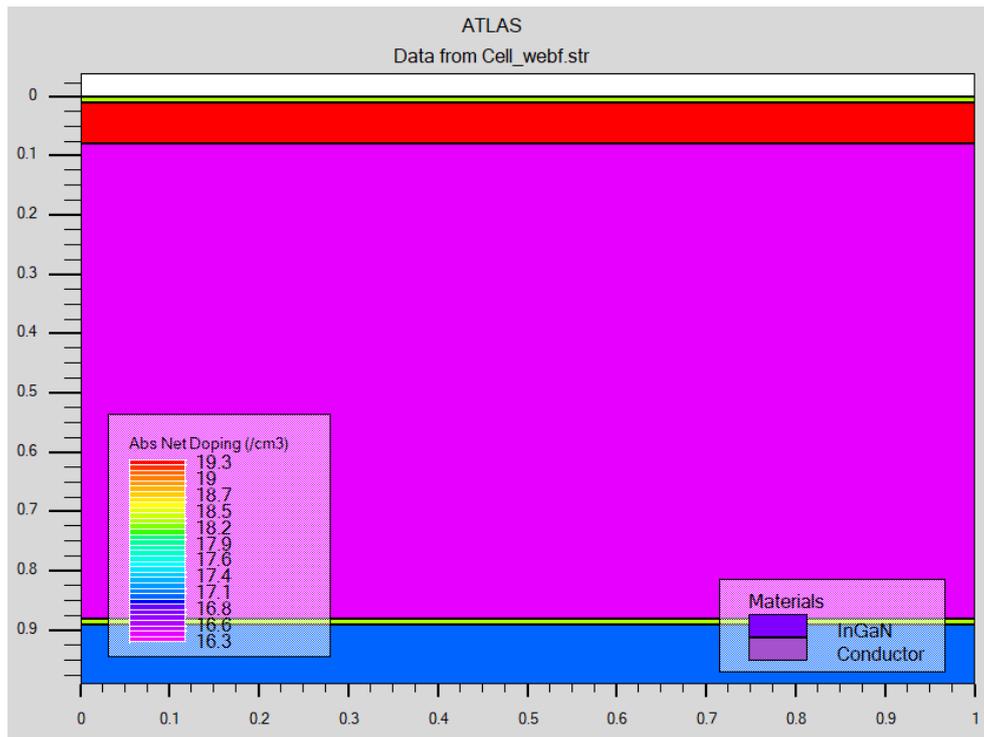


Figure 4-5 : Présentation de la structure de la cellule inférieure par tonnplot.

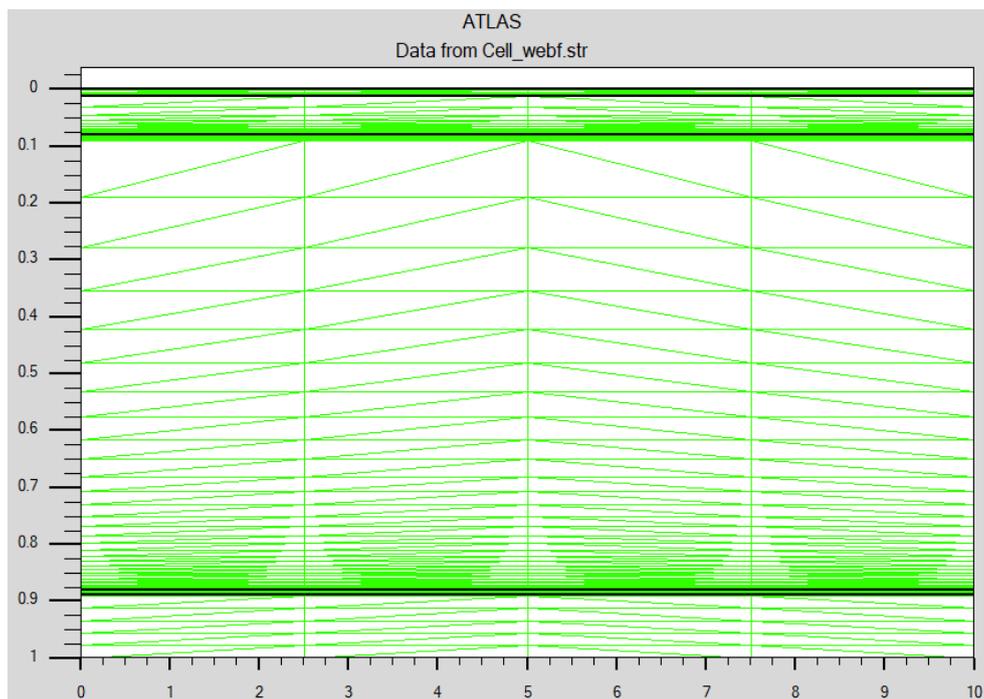


Figure 4-6 : Maillage de la structure simulée de la cellule inférieure.

On présente dans la Figure 4-7 la caractéristique J-V sous éclairement AM0 de la cellule à base de $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ obtenue par ATLAS. A partir de cette caractéristique on a calculé les paramètres

de sortie de la cellule solaire inférieure. Les paramètres de sortie calculés sont illustrés dans Tableau 4-4.

Paramètres	$J_{sc}(\frac{mA}{cm^2})$	$V_{oc}(V)$	$P_m(\frac{mW}{cm^2})$	$V_m(V)$	$I_m(\frac{mA}{cm^2})$	FF(%)	η (%)
Valeurs	25.95	1.86	4.21	1.74	2.42	87.17	30.88

Tableau 4-4 : Paramètres électriques de la cellule inférieure.

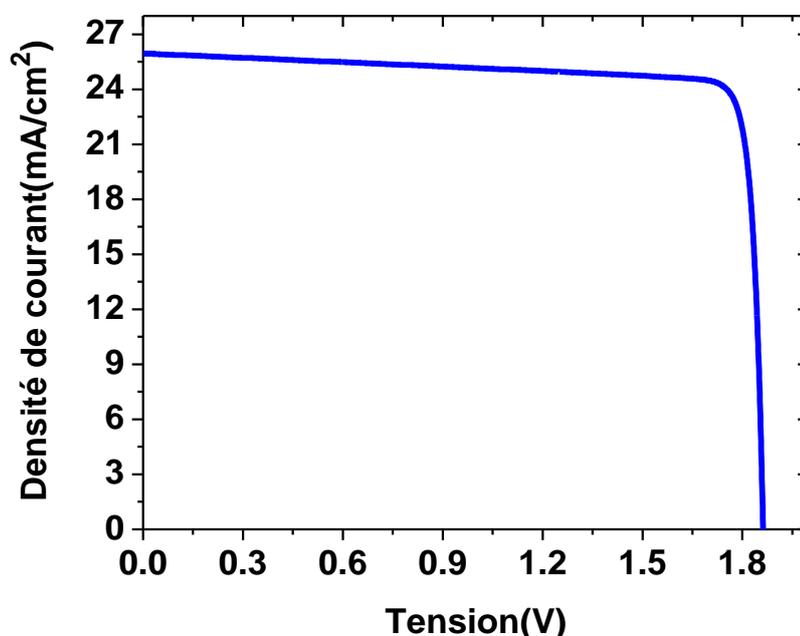


Figure 4-7 : La Caractéristique électrique $J(V)$ sous éclairage AM0 de la cellule inférieure.

4.4.3 Simulation de la cellule solaire à double jonction

La structure de base de la cellule solaire à double jonctions en InGaN est représentée sur la figure 4.8. Cette conception consiste en deux cellules solaires : une cellule solaire supérieure $In_{0.4}Ga_{0.6}N$ à large bande interdite ($E_g=1.7$ eV) et une cellule inférieure $In_{0.7}Ga_{0.3}N$ à faible bande interdite ($E_g=1.16$ eV) dont le but d'absorber une large gamme du spectre. Les deux cellules sont similaires dans leurs structures PN (régions de type P et de type N). Elles sont

connectées optiquement et électriquement par une jonction tunnel qui représente une électrode commune. La cellule est soumise à un éclairage par le spectre solaire AM0.

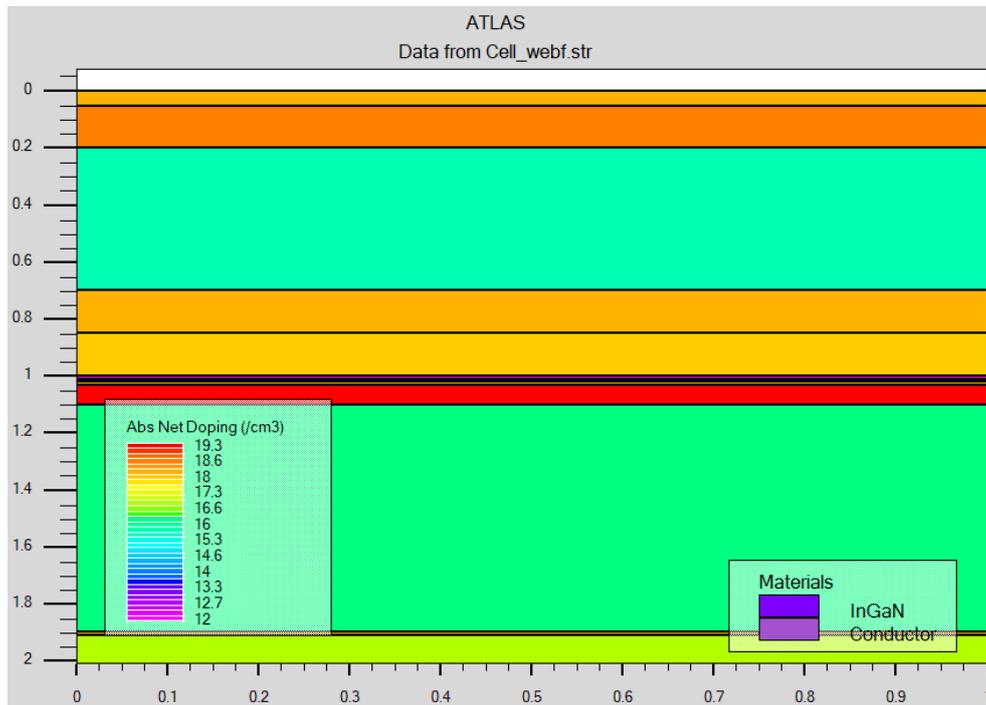


Figure 4-8 : Présentation de la structure de la cellule tandem par tonypplot.

La figure ci-dessous donne le maillage de la cellule tandem où il est intense au niveau des jonctions.

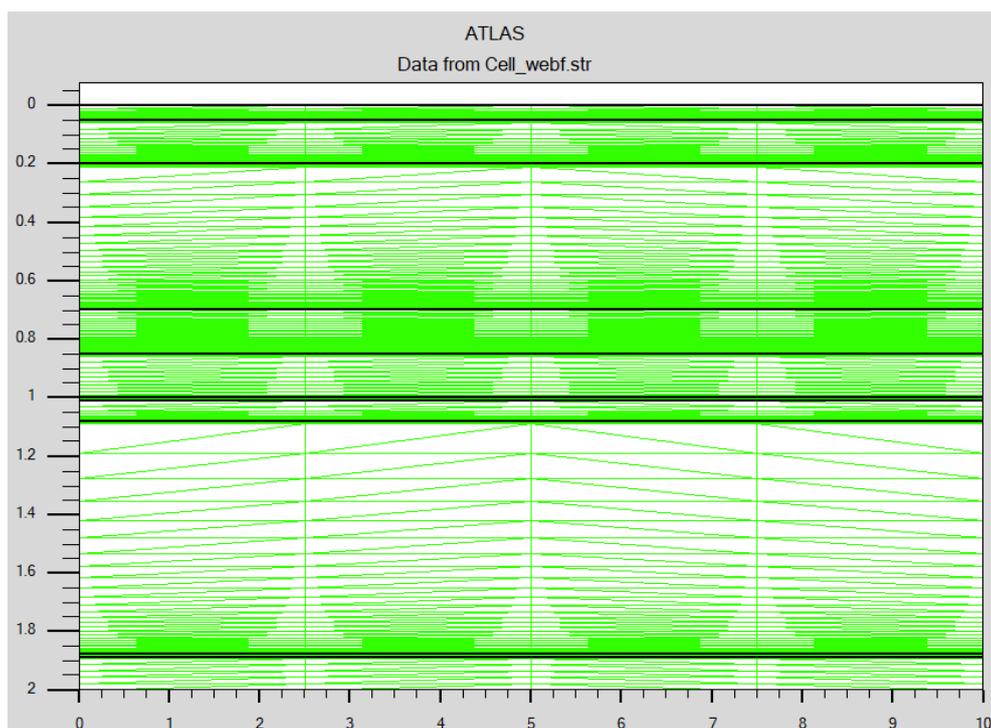


Figure 4-9 : Maillage de la structure simulée de la cellule tandem.

La caractéristique électrique $J(V)$ de la cellule tandem sous illumination (AM0) est présentée sur la Figure 4-10. D'après cette courbe, les paramètres de sortie de la cellule solaire à double jonction ($\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$) sont groupés dans le Tableau 4-5. Cette cellule possède un rendement plus élevée qu'est égal à 44.77 % sous éclairément AM0.

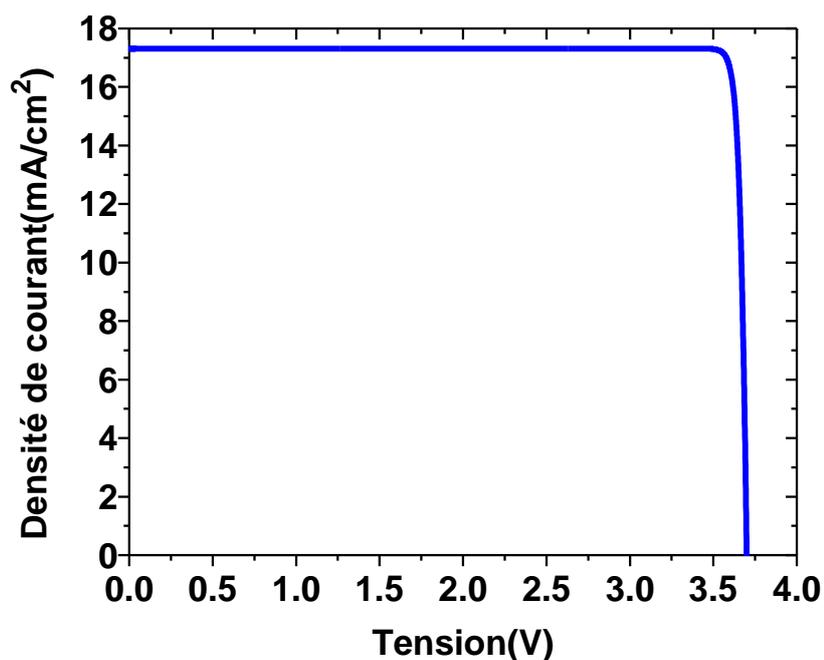


Figure 4-10 : La Caractéristique électrique $J(V)$ sous éclairément AM0 de la cellule tandem.

Paramètres	$J_{sc}(\frac{mA}{cm^2})$	$V_{oc}(V)$	$P_m(\frac{mW}{cm^2})$	$V_m(V)$	$I_m(\frac{mA}{cm^2})$	FF(%)	η (%)
Valeurs	17.31	3.70	6.11	3.56	1.71	95.40	44.77

Tableau 4-5 : les paramètres électriques de la cellule tandem.

4.4.4 Comparaison entre les trois cellules solaires

Nous commençons par comparer les caractéristiques $J(V)$ sous un éclairage AM0 des trois cellules présentées dans la figure 4.11. La cellule supérieure, et en raison de son gap énergétique de 1,98 eV, a le faible courant. En revanche, la cellule inférieure avec un gap d'énergie de 1,21 eV a un courant plus élevé. Le courant de la cellule à double jonction ($In_{0.4}Ga_{0.6}N/In_{0.7}Ga_{0.3}N$) est le même que celui de la cellule supérieure. En revanche, la V_{oc} de la cellule solaire à double jonction ($In_{0.4}Ga_{0.6}N/In_{0.7}Ga_{0.3}N$) est égale à la somme des V_{oc} de la cellule supérieure et de la cellule inférieure. Ainsi, pour la cellule double jonction ($In_{0.4}Ga_{0.6}N/In_{0.7}Ga_{0.3}N$), le faible courant est imposé par la cellule à plus grand intervalle d'énergie, tandis que la tension est la somme des tensions de la cellule supérieure et de la cellule inférieure. Ces résultats de simulation confirment bien que la cellule double jonction est formée par deux cellules élémentaires montées en série.

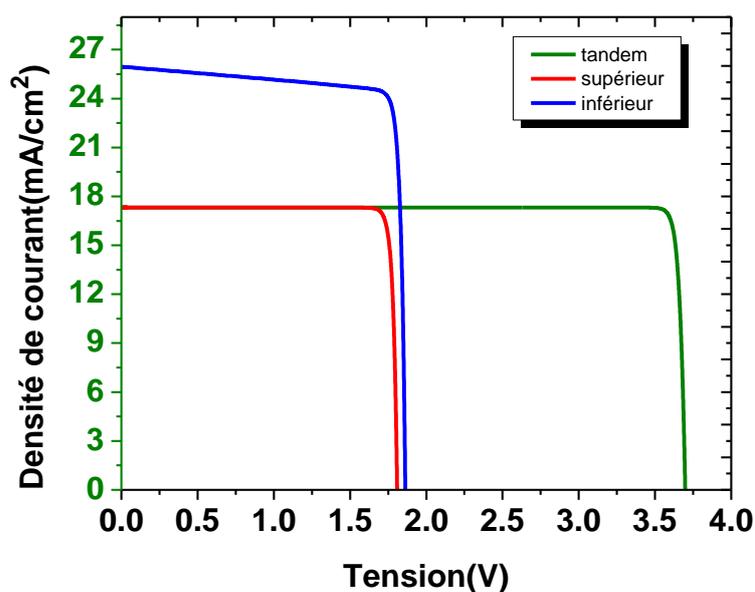


Figure 4-11 : Caractéristiques électriques $J(V)$ sous illumination AM0 des trois cellules.

Paramètres	$J_{sc}(\frac{mA}{cm^2})$	$V_{oc}(V)$	$P_m(\frac{mW}{cm^2})$	$V_m(V)$	$I_m(\frac{mA}{cm^2})$	FF(%)	η (%)
Supérieure	17.31	1.75	2.98	1.74	1.71	92.66	21.84
Inférieure	25.95	1.86	4.21	1.74	2.42	87.17	30.88
Double	17.31	3.70	6.11	3.56	1.71	95.40	44.77

Tableau 4-6 : Les paramètres de sortie des trois cellules solaires.

Une comparaison entre les paramètres de sortie des trois cellules supérieure, inférieure et Tandem est faite dans le Tableau 4-6. Il est bien évident que la cellule double jonction présente un meilleur rendement de 44.77% par rapport à celui de la cellule supérieure (21.84%) et celui de la cellule inférieure (30.88%).

4.4.5 Optimisation de la cellule tandem

On va étudier l'influence de l'épaisseur et le dopage de la cellule supérieure pour optimiser les paramètres électriques et bien sûr augmenter le rendement de la cellule double jonction.

4.4.5.1 Influence de l'épaisseur

Figure 4-12 représente la variation des paramètres photovoltaïques : J_{sc} (mA/cm^2), V_{oc} (V), FF(%), η (%) de la cellule solaire en fonction de l'épaisseur de couche de la base de la sous-cellule supérieure. Le courant en court-circuit I_{sc} augmente lentement de 18.92 mA/cm^2 pour l'épaisseur= 5.5 μm à 18.99 mA/cm^2 pour l'épaisseur=17 μm . Pour la tension en circuit ouvert V_{oc} on remarque lorsque l'épaisseur augmente la tension est constante $V_{oc} = 3.7$ V.

Le facteur de forme diminue de (95.34%) pour l'épaisseur=5.5 μm jusqu'à (95.12%) pour l'épaisseur=20 μm . Le rendement η augmente de (48.94%) pour l'épaisseur=5.5 μm jusqu'à (49.07 %) pour l'épaisseur=14 μm après il diminue. L'épaisseur optimale de la base est de 14 μm .

L'élargissement de la couche base de la cellule supérieure conduit à l'élargissement de la région de la génération des photoporteurs et le nombre de photoporteurs générés par la lumière augmente. Par conséquent le courant de court-circuit augmente et le rendement augmente aussi.

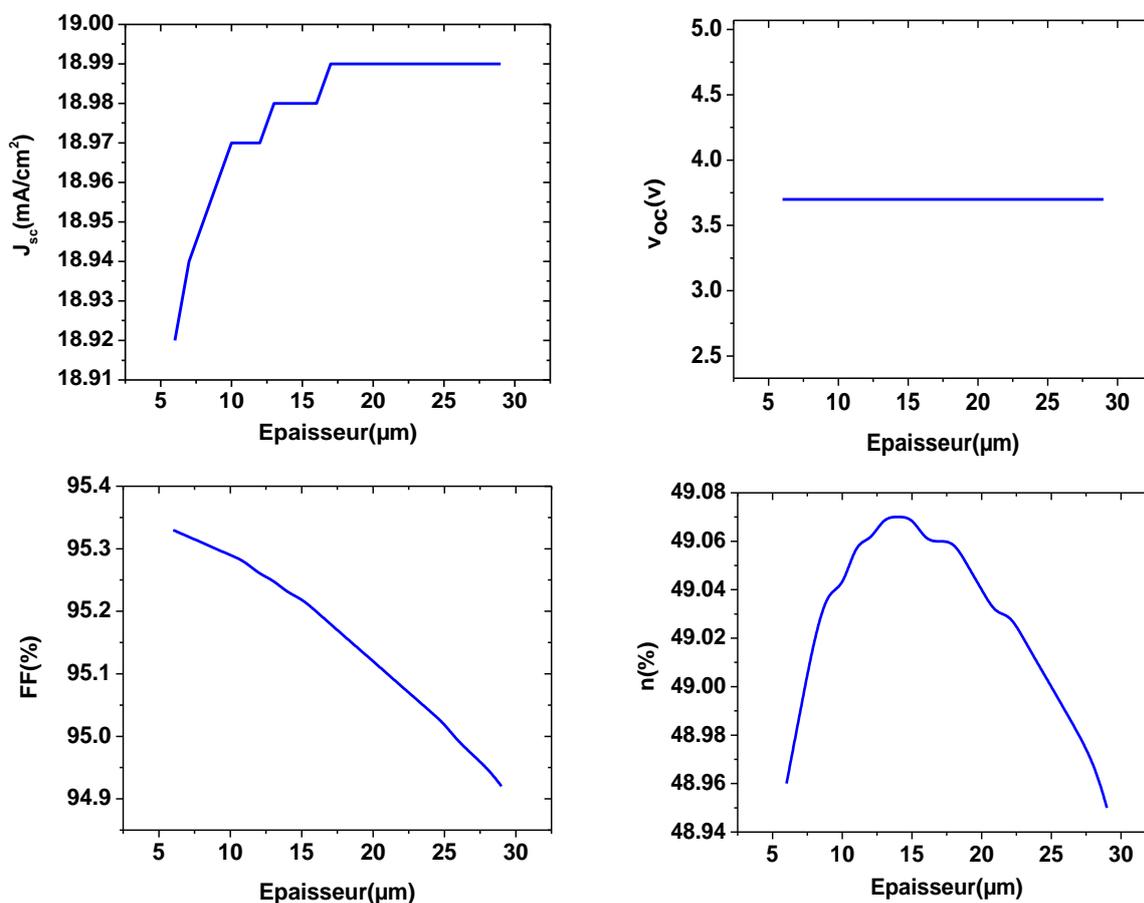


Figure 4-12 : Les paramètres photovoltaïques de la cellule tandem en fonction de l'épaisseur de la base de la sous-cellule supérieure.

4.4.5.2 Influence du dopage

On a fixé l'épaisseur de la couche de la base à 14 μm, et on a étudié l'influence du dopage de la couche émetteur et de la couche base de la sous-cellule supérieure sur les paramètres de la cellule double jonction.

Dopage de la couche émetteur supérieure

Figure 4-13 représente la variation des paramètres photovoltaïques : J_{sc} (mA/cm^2), V_{oc} (V), FF(%), η (%) de la cellule solaire double jonction en fonction du dopage de la couche émetteur de la sous-cellule supérieure.

Le courant en court-circuit I_{sc} diminue lentement de $19.07 \text{ mA}/\text{cm}^2$ pour dopage = 10^{18} cm^{-3} à $18.95 \text{ mA}/\text{cm}^2$ pour dopage = $9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Pour la tension en circuit ouvert V_{oc} on remarque que lorsque on a varié le dopage la tension est constante $V_{oc} = 3.7 \text{ V}$.

Le facteur de forme diminue de (95.03%) pour dopage = 10^{18} cm^{-3} jusqu'à (95.23%) pour dopage = $9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Le rendement η diminue de (49.19%) pour dopage = 10^{18} cm^{-3} jusqu'à (48.97 %) pour dopage = $9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ à cause du décroissement du courant. Avec l'augmentation du dopage de l'émetteur, la zone de charge d'espace diminue et par suite le nombre de photoporteurs générés diminuent. Par conséquent le courant diminue et donc le rendement diminue aussi. Le dopage optimal de l'émetteur est de 10^{18} cm^{-3} .

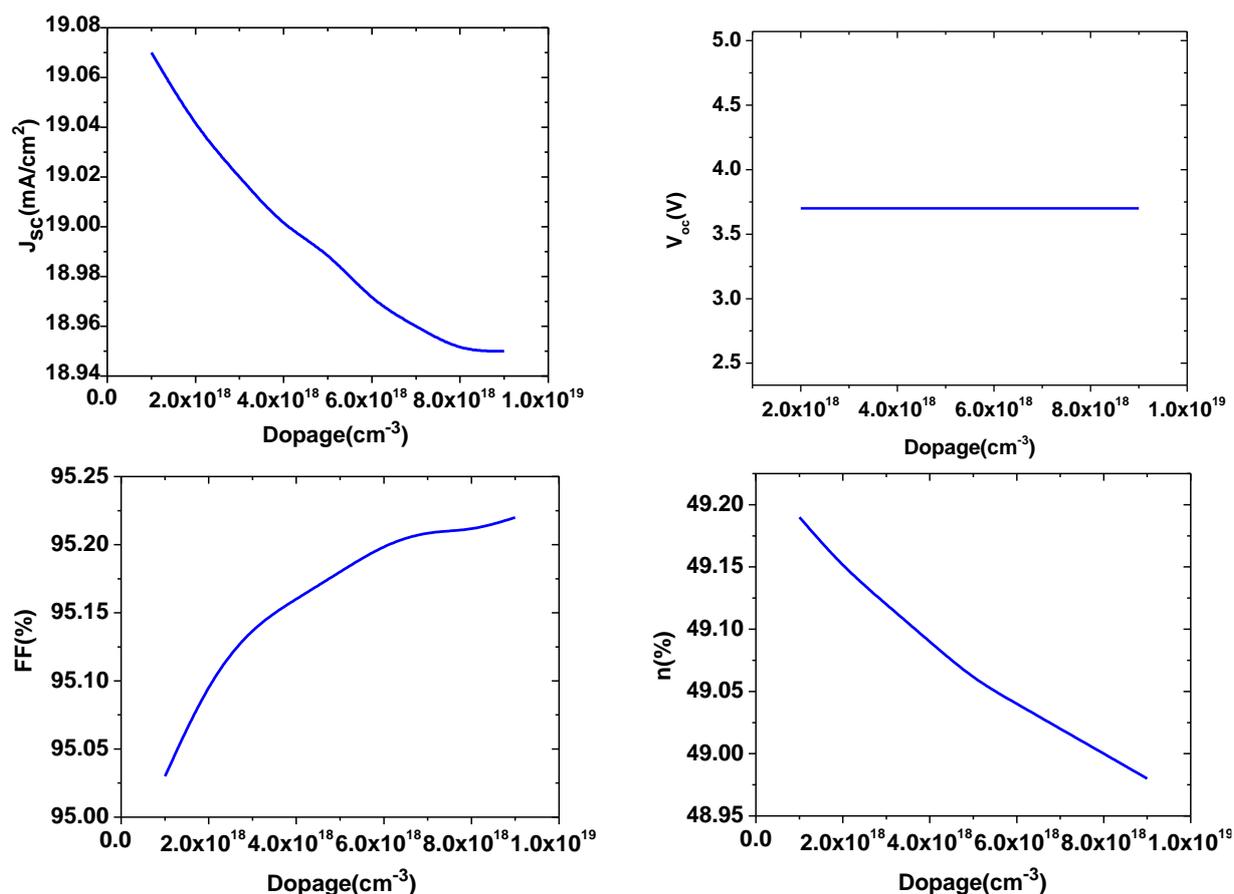


Figure 4-13 : Les paramètres photovoltaïques de la cellule tandem en fonction de dopage de sous-cellule supérieur couche émetteur obtenus par simulation.

Dopage de la base de la cellule supérieure

On a fixé le dopage de l'émetteur à 10^{18} cm^{-3} et on a étudié l'influence du dopage de la couche émetteur de la sous-cellule supérieure sur les paramètres de la cellule double jonction.

Figure 4-14 représente la variation des paramètres photovoltaïques : J_{sc} (mA/cm^2), V_{oc} (V), FF(%), η (%) de la cellule solaire en fonction du dopage de couche base de la sous-cellule supérieure.

Le courant en court-circuit I_{sc} et la tension en circuit ouvert V_{oc} sont constants avec ces valeurs respectivement $J_{sc} = 19.02 \text{ mA}/\text{cm}^2$ et $V_{oc} = 3.7 \text{ V}$.

Le facteur de forme augmente de (95.03%) pour $\text{dopage} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ jusqu'à (95.35%) pour $\text{dopage} = 9.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ après il se stabilise. Le rendement η augmente de (49.25%) pour le $\text{dopage} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ jusqu'à (49.44 %) pour le $\text{dopage} = 9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ à cause du facteur de forme croissant. L'effet du dopage est démontré dans l'augmentation du rendement. Le dopage optimal de la base est de $9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

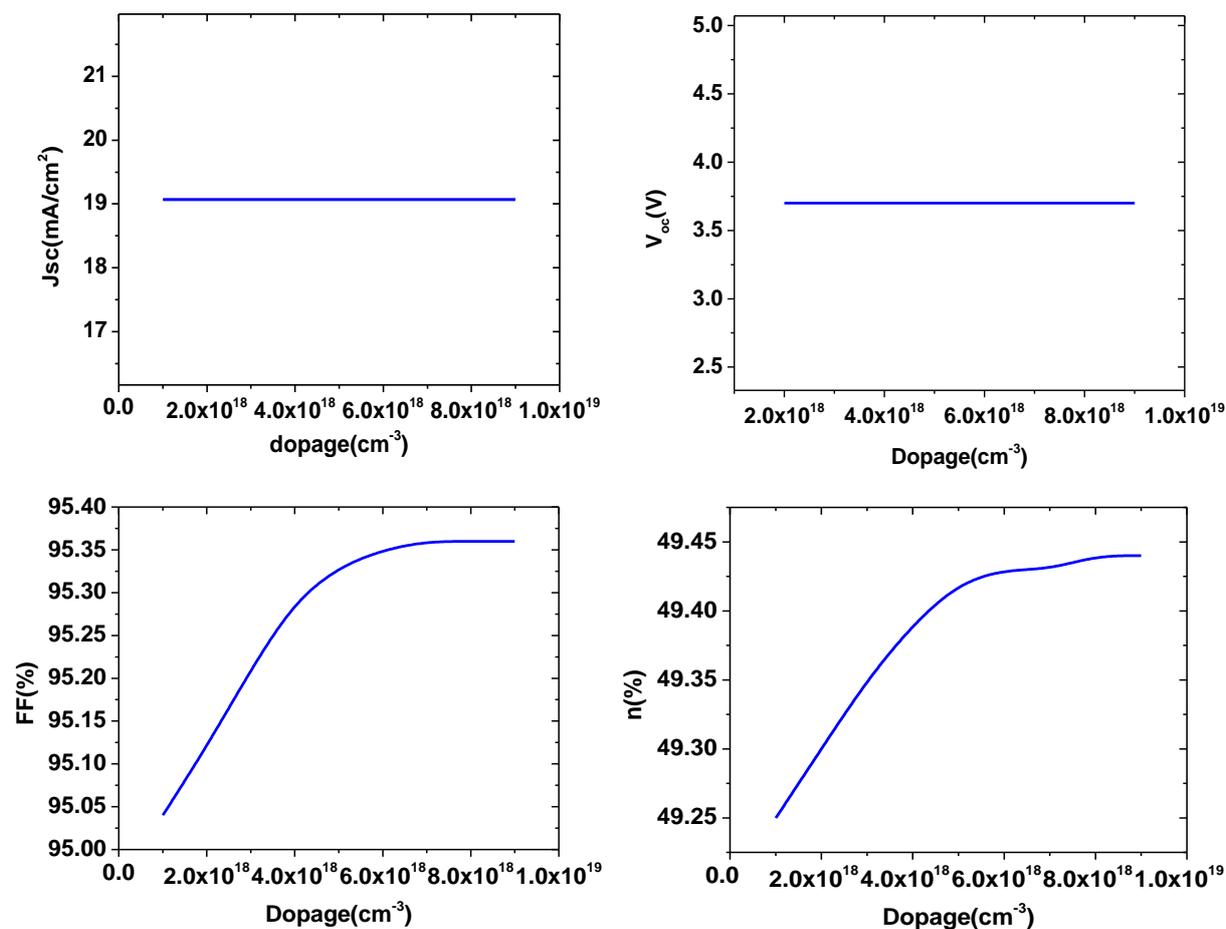


Figure 4-14 : Les paramètres photovoltaïques de la cellule tandem en fonction de dopage de sous-cellule supérieur couche base obtenus par simulation.

4.5 Conclusion

On a étudié les caractéristiques électriques $J(V)$ sous éclairement AM0 de chacune des deux sous-cellules et de la cellule tandem par simulation numérique.

Après nous avons simulé la cellule tandem et étudié l'effet de l'épaisseur et du dopage de la cellule supérieure sur ses caractéristiques électriques.

Après ces études de simulation, on a optimisé les caractéristiques électriques de notre cellule tandem pour l'épaisseur de l'émetteur $14 \mu\text{m}$ et une concentration de dopage 10^{18} cm^{-3} pour l'émetteur et $9 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pour la base de la cellule supérieure. Les résultats sont dans le tableau suivant :

Paramètres	$J_{sc}(\frac{mA}{cm^2})$	$V_{oc}(v)$	$P_m(\frac{mW}{cm^2})$	$V_m(v)$	$I_m(\frac{mA}{cm^2})$	FF(%)	η (%)
Valeurs	19.07	3.70	6.74	3.56	1.89	95.36	49.44

Tableau 4-7 : Les résultats optimisés des caractéristiques électriques.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail comprend l'étude et la simulation d'une cellule solaire double jonction en $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ pour application dans l'alimentation des satellites dans l'espace à l'aide du logiciel Silvaco-Atlas.

Dans le but que la cellule solaire absorbe le maximum du rayonnement solaire et de produire le maximum d'énergie électrique, nous avons choisi une cellule solaire double jonction formée par deux cellules solaires en $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ et $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ montées en série.

L'étude de ce projet de mémoire s'articule sur quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons étudié les matériaux semi-conducteurs III-V ainsi que les principales propriétés des nitrures de Gallium Indium InGaN : structurale, électriques, optiques... Dans le deuxième chapitre, nous avons rappelé quelque notion préliminaire nécessaire pour la compréhension du comportement de la photovoltaïque, tout en expliquant le fonctionnement de la cellule solaire et ses différentes caractéristiques. Dans le troisième chapitre, nous avons présenté quelques informations de base en programmation par Silvaco-Atlas qui est conçu pour la simulation des composants électroniques et semi-conducteurs. Dans le quatrième chapitre nous avons présenté la simulation de la cellule double jonction en $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ et les résultats obtenus.

Nous avons commencé par présenter la structure de notre cellule à double jonction avec ses paramètres des matériaux utilisés. En premier lieu, on a simulé la cellule supérieure et présenté ses caractéristiques électriques ($J_{sc} = 17.31 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 1.75 \text{ V}$, $FF = 92.66 \%$, $\eta = 21.84 \%$). En deuxième lieu, on a simulé la cellule inférieure et présenté ses caractéristiques électriques ($J_{sc} = 25.95 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 1.86 \text{ V}$, $FF = 87.17 \%$, $\eta = 30.88 \%$). En fin, on a monté la cellule supérieure sur la cellule inférieure pour former la cellule double jonction et présenté ses caractéristiques électriques ($J_{sc} = 17.31 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 3.70 \text{ V}$, $FF = 95.40 \%$, $\eta = 44.77 \%$). On a bien trouvé une augmentation du rendement de la cellule double jonction de 44.77% par rapport aux cellules élémentaires supérieure et inférieure de 21.84% et 30.88% respectivement. Pour optimiser la cellule solaire double jonction, nous avons choisi d'optimiser l'épaisseur et le dopage de la cellule supérieure pour optimiser ses paramètres électriques et bien sûr augmenter son rendement. D'après cette optimisation on a trouvé l'épaisseur de l'émetteur $17\mu\text{m}$ et la concentration de dopage 10^{18} cm^{-3} pour l'émetteur et $9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pour la base donnant comme résultats des caractéristiques électriques optimisés de la cellule double jonction ($J_{sc} = 19.07 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 3.70 \text{ V}$, $FF = 95.36 \%$, $\eta = 49.44 \%$).

Références

Références

- [1] Dr.AH.SOUICI cour Physique des semi-conducteurs 2013-2014.....6
- [2] Zimmer, Thomas. "5. Semi-conducteurs et jonction pn."7
- [3] http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/co/Contenu_04.html8
- [4] ZOUAD, MAHIEDDINE « Etude et simulation d'une cellule solaire à multi-jonctions à base de InGaN» 2014.....11
- [5] Hind, Bousbia. 2006. « Analyse et développement de la caractérisation en puissance, rendement et linéarité de transistors de puissance en mode impulsionnel ». Thèse de doctorat en génie électrique, Université de Limoges, 190 p.....12
- [6] J.J. Harris, K.J. Lee, J.B. Webb, H. Tang, I. Harisson, AL. 2000. « The implications of spontaneous polarization effects for carrier transport measurements in GaN », Semiconductor Science and Technology, Vol. 15, pp. 413-417.....13
- [7] L. C. de Carvalho , A. Schleife, and F. Bechstedt , "Influence of exchange and correlation on structural and electronic properties of AlN, GaN, and InN polytypes," Physical Review B, vol. 84, p. 195105, 2011.....13
- [8] Dahlab, S. (n.d.). Etude et calcule le gain optique d'une structure à puits quantique à base d'InGaN / GaN.....14
- [9] Sheng S. Li, "SemiconductorPhysicalElectronics" University of Florida, USA, ISBN 10: 0-387-28893-7, 2006.....15
- [10] Wu, J. When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives. Journal of Applied Physics. 2009, Vol. 106, 011101.....16
- [11] Eldjemai, M. B., Lakhdar, M. D., Nouredine, M. A., Achour, M. S., & Khaled, M. B. (2018). Diplôme de Doctorat Thème : Contribution à l'étude des propriétés physiques et électriques des composés semi-conducteurs III-V. Application à l'effet photovoltaïque.....17
- [12] Signaux, O. (n.d.). Magister en Electronique Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco.....18

- [13] Adaine, Abdoulwahab. Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN. Diss. 2018.....18,29,45
- [14] Hamdoune AEK, "Elaboration du nitrure de gallium ; Etude de ses propriétés et Applications". Obtenu à l'université de Tlemcen, 21 Juin 2006.....19
- [15] L. Vergard. Die konstitution der mischkristalle und die raumfüllung der atome. *Zeitschrift für Physik*, 17-26.....20
- [16] ATLAS User's Manual, Device Simulation Software, Version 5.20.2.R, SILVACO International, Santa Clara, CA, 2015.....21,48
- [17] X. Zhang, X. Wang, H. Xiao et al., "Simulation of In_{0.65}Ga_{0.35}N single-junction solar cell," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 40, no. 23, pp. 7335–7338, 2007.....21
- [18] ATLAS User's Manual, Device Simulation Software, Version 5.20.2.R, SILVACO International, Santa Clara, CA, 2015.....22
- [19] Gorge, Vanessa. Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V. Diss. Paris 11, 2012.....25
- [20] SERDOUK, MOHAMMED RIDHA. Etude par simulation numérique des propriétés électriques d'une cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné (a-Si: H). Diss. Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.....28
- [21] El-Huni, Walid. Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas coût et très haut rendement à base de nitrures des éléments III-V. Diss. 2016.....29
- [22] Amar, Hicham. Propriétés électriques de cellule solaire à base de diSélénure de Cuivre Indium Gallium CuIn (1-x) Ga_xSe₂ (CIGS). Diss. Université Mohamed Khider Biskra, 2014.....30
- [23] Mahfoud, Abdrrezek. Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement. Diss. 2018.....33
- [24] Yacine MAROUF. Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco. Diss. Université Mohamed Khider-Biskra, 2013.....34
- [25] BEZZIOU FATMA, "Etude par simulation numérique d'une cellule solaire à homojonction (GaAs) et à hétérojonction (Ga_{0.3}Al_{0.7}As/GaAs) par le logiciel TCAD-SILVACO », Thème De Master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.....38

-
- [26] Benaïcha Mouna. Contribution à l'étude des propriétés physiques et électriques des composés semi-conducteurs III-V. Application à l'effet photovoltaïque. thème de doctorat, université El-hadj Lakhdar BATNA 1, 2018.....38
- [27] <https://www.photovoltaique.info/fr/>39
- [28] Mahieddine, Mohamed, and Mohamed Sami Zouad. "Etude et simulation d'une cellule solaire à multi-jonctions à base de InGaN." (2014).....40
- [29] Shockley, W. and Queisser, H.J. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. Journal of Applied Physics. 1961, Vol. 32, 510.....41
- [30] Hamady, Sidi Ould Saad. Simulation numérique et caractérisation de matériaux semi-conducteurs III-N pour détecteurs ultraviolet et cellules solaires. Diss. 2017.....42
- [31] A. Goetzberger V.U. Hoffmann, Photovoltaic Solar Energy Generation, Springer, 2, 11/229, 2005.....44
- [32] Kim, Salah. "Effet de la fraction molaire sur la cellule solaire en InGaN." ,2018.44,65
- [33] Ben Aicha, et al. "Simulation numérique d'une cellule solaire tandem à couche mince." (2019).....67
- [34] BOUROUBA Loubna, and BOUSSEKAR Dalal. "Simulation numérique des caractéristique électrique d'une solaire à double jonction en ALGaAs/SI."67
- [35] MOUSSAOUI, Nafissa, et al. "l'étude par simulation de l'influence du dopage sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires à base de silicium amorphe." (2016).....67