

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère De L'enseignement Supérieur
Et De La Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar-El-Oued

Faculté Des Sciences exact

Département : Sciences de la matière

Filière : Physique

N° d'ordre :

N° de série :

MEMOIRE

Présentée Pour l'obtention du Diplôme de Master en Physique Appliquée :

Rayonnement et Energie

Par: Fatma LOUMI

Intitulé

**Effet d'irradiation par des électrons dans une
cellule solaire en GaAs comparaison entre
cellule p^+ /n et n^+ /p**

Soutenu le : 08 / 09 / 2016

Devant le jury composé de :

Président:	Leila BOURAS	MAA	Université d'El-Oued
Examineur:	Mohamed Ali HADJ AMMAR	MAB	Université d'El-Oued
Rapporteur:	Widad LAIADI	MCB	Université d'El-Oued

Année Universitaire: 2015/2016

Dédicaces

Je dédie a modeste travail à :

Mes très chers parents

Mes très chères sœurs

Mes très chères frères

Tous mes amies

Fatma Loumi

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au département de physique, faculté de sciences exactes , université Echahid Hamma Lakhdar.El oued .

Il m'est agréable d'exprimer ma profonde reconnaissance à madame Widad Laiadi , maître de conférence à l'université de Echahid Hamma Lakhdar.El oued pour ses encouragements, de son expérience dans l'orientation et la direction de ce travail.

Madame Leila Bouras, maître de conférence à faculté de technologie de l'université de Echahid Hamma Lakhdar.El oued , qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire, je lui exprime mon respect et mes sincères remerciements

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à monsieur Mohamed Ali Hadj Ammar, maître de conférence à faculté de technologie de l'université de Echahid Hamma Lakhdar.El oued, d'avoir accepté d'être examinateur.

Fatma Loumi

Table de matière

Remerciements	II
Table de matière	III
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VII
Nomenclature	VIII
Introduction générale	11

Chapitre I : Cellules solaires en Arsenic de galium

I.1	Introduction	15
I.2	Rayonnement solaire	15
I.3	Le spectre solaire	16
I.4	Méthode de croissance des couches GaAs	17
I.5	Conversion photovoltaïque dans une jonction p-n en GaAs.....	20
I.6	les cellules solaires à base de GaAs.....	22
I.7	les paramètres de sortie d'une cellule solaire	23
I.8	Interaction des particules massives avec cellule solaire	27
I.9	Les Défauts par l'irradiation des électrons	28

Chapitre II : Simulation numérique par logiciel SCAPS

II.1	Introduction	30
II.2	Principe de simulation	30
II.3	Utilisation de SCAPS	31
II.3.1	Action panel	32
II.3.2	Définition panel	33
II.3.3	Ajout de défauts	34
II.3.4	Afficher les courbes simulées	36
II.3.5	Les courbes I-V à l'obscurité et en éclairage	37
II.4	Avantages et inconvénients du SCAPS	38

Table de matière

II.5	Conclusion	38
------	------------------	----

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1	Introduction	40
III.2	La cellule solaire p^+/n en GaAs	42
III.2.1	La structure de la cellule solaire p^+/n en GaAs	42
III.2.2	Effet des défauts sur les paramètres de la cellule solaire p^+/n en GaAs	44
III.3	La cellule solaire n-p en GaAs	47
III.3.1	La structure de la cellule solaire n^+/p en GaAs	47
III.3.2	Effet des défauts sur les paramètres de la cellule solaire n^+/p en GaAs	48
III.4	Comparaison entre la cellule p^+/n et n^+/p	51
III.5	Effet de la densité des défauts	53
III.6	Conclusion	56
	Conclusion générale	58
	Références	59

Liste des figures

Figure I.1	Spectre solaire	17
Figure I.2	Structure cristalline du GaAs	18
Figure I.3	(a) Présentation bidimensionnelle de la structure cristalline du GaAs, (b) Structure des bandes du GaAs et (c) mouvement d'un électron et d'un trou dans l'espace réel et dans l'espace réciproque	19
Figure I.4	Structure d'une cellule (à gauche) et son diagramme de bande (à droite)	21
Figure I.5	(a) les couches cellule solaire à base GaAs et (b) Transport électrique et mécanismes de recombinaison dans une cellule p-n en GaAs	22
Figure I.6	Jonction pn à l'équilibre	23
Figure I.7	Caractéristique typique d'une cellule solaire illuminée	26
Figure II.1	Le point de fonctionnement	33
Figure II.2	Définir le problème	33
Figure II.3	Ajout, modification et suppression des défauts	34
Figure II.4	Le panneau de propriétés de défaut	35
Figure II.5	Panneau des bandes d'énergie	36
Figure II.6	Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclairage	37
Figure III.1	Schéma de la structure unidimensionnelle de la cellule solaire p^+/n en GaAs	43
Figure III.2	Diagramme d'énergie de la cellule solaire p^+/n en GaAs	43
Figure III.3	La caractéristique J-V de la cellule solaire p^+/n en GaAs	44
Figure III.4	La densité des porteurs de charge de la cellule solaire p^+/n en GaAs- Electron (Bleu), Trous (Rouge), Total (Noir)	45
Figure III.5	Recombinaison Génération de la cellule solaire p^+/n en GaAs- Génération (Vert) ; Recombinaison (Violet)	45
Figure III.6	Rendement quantique de la cellule solaire p^+/n en GaAs	46
Figure III.7	Schéma de la structure unidimensionnelle de la cellule solaire n^+/p en GaAs	48
Figure III.8	Diagramme d'énergie de la cellule solaire n^+/p en GaAs	48
Figure III.9	La caractéristique J-V de la cellule solaire n^+/p en GaAs	49
Figure III.10	La densité des porteurs de charge de la cellule solaire n^+/p en GaAs- Electron (Bleu), Trous (Rouge), Total (Noir)	49
Figure III.11	Recombinaison Génération de la cellule solaire p^+/n en GaAs- Génération (Vert) ; Recombinaison (Violet)	50
Figure III.12	Rendement quantique de la cellule solaire n^+/p en GaAs	50
Figure III.13	La caractéristique J-V de l'effet des défauts sur la cellule solaire p^+/n	

Liste des figures

	(Bleu) et n^+/p (Rouge)	52
Figure III.14	Rendement quantique de l'effet des défauts sur la cellule solaire p^+/n (Bleu) et n^+/p (Rouge)	52
Figure III.15	La caractéristique J-V d'effet de la densité des défauts ($1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) sur la cellule solaire p^+/n (Bleu) et n^+/p (Rouge)	54
Figure III.16	Rendement quantique d'effet de la densité des défauts ($1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) sur la cellule solaire p^+/n (Bleu) et n^+/p (Rouge)	54

Liste des tableaux

Tableau I.1	Les caractéristiques des pièges à électrons et des pièges à trous à partir de.....	29
Tableau III.1	Les paramètres des pièges à électrons et trous d'une cellule solaire irradié par 1MeV d'irradiation à électrons	41
Tableau III.2	Paramètres physiques du GaAs introduits dans SCAPS	42
Tableau III.3	Dopages et épaisseurs des régions de la cellule solaire p^+/n en GaAs dont l'épaisseur totale est 1.6 μm	43
Tableau III.4	Effet des défauts sur les paramètres de sorties de la cellule solaire p^+/n en GaAs	46
Tableau III.5	Dopage et épaisseurs des régions de la cellule solaire n^+/p en GaAs dont l'épaisseur totale est 1.6 μm	47
Tableau III.6	Effet des défauts sur les paramètres de sorties de la cellule solaire n^+/p en GaAs	51
Tableau III.7	Effet de la densité des défauts sur les paramètres de sortie de la cellule p^+/n en GaAs et n^+/p en GaAs	55

Nomenclature

Lettres latin

a_0	La constante de réseau	$[A^0]$
D_n	Les coefficients de diffusion des électrons	$[cm^2.s^{-1}]$
D_p	Les coefficients de diffusion des trous	$[cm^2.s^{-1}]$
E_g	Gap d'énergie	$[eV]$
FF	Le facteur de forme	(%)
G	Taux de génération	$[cm^{-3}.s^{-1}]$
H	La constante de planck	$[m^2.kg.s^{-1}]$
I	L'intensité de spectre	$[kW/m^2]$
J_o	Le courant de saturation en polarisation inverse	$[Am^{-2}]$
J_{ph}	Le photocourant	$[Am^{-2}]$
J_{sc}	La densité du courant de court circuit	$[Am^{-2}]$
k_B	La constante de Boltzmann	$[J.k^{-1}]$
T	Temperature	$[k]$
N	La densité de charge négative	$[cm^{-3}]$
N_C	La densité d'état efficace dans la bande de conduction	$[cm^{-3}]$
N_v	La densité d'état efficace dans la bande de valence	$[cm^{-3}]$
V_{oc}	La tension du circuit ouvert	$[V]$
P	La densité de charge positive	$[cm^{-3}]$
P_{max}	La puissance maximale	$[Wcm^{-2}]$
U	Taux de recombinaison	$[cm^{-3}.s^{-1}]$
V_{thn}	Vitesse thermique des électrons	$[cm/s]$
V_{thp}	Vitesse thermique des trous	$[cm/s]$

Lettres grecques

ϵ_0	Vacuum permittivité	$[F.m^{-1}]$
ϵ_r	Permittivité relative	
$\epsilon_0\epsilon_r$	La constante diélectrique	$[F.m^{-1}]$
λ	La longueur d'onde	$[\mu m]$
μ_n	La mobilité des électrons	$[cm^2/V_s]$
μ_p	La mobilité des trous	$[cm^2/V_s]$

Nomenclature

η	Le rendement de conversion de la cellule	(%)
ρ	La densité de charges	[C. m ²]
τ_n	Les durées de vie des électrons	[s]
τ_p	Les durées de vie des trous	[s]
ν	La fréquence	[s ⁻¹]
ψ	Le potentiel	[V]
χ	Affinité électronique	[eV]

Abréviations

AM0	Air Mass 0 .
BC :	Band Conduction
BV :	Band Valence
DLTS :	Deep Level Transient Spectroscopy
GaAs :	Galium Arsenic
LPE :	Liquid Phase Epitaxy .
MBE :	Molecular Beam Epitaxy
SCAPS :	Solar Cell Capacitance Simulator one Dimension
VPE :	Vapor Phase Epitaxy
ZCE :	Zone Charge d'Espace .

Introduction générale

Introduction générale

Les premières cellules solaires en GaAs, fabriquées par Jenny et al en 1956 ont été sous forme d'homo-jonction p/n avec une efficacité de conversion de 3 à 6 % seulement .En 1962, l'efficacité de ces cellules solaires a été améliorée à 11% pour le spectre AM1. Ensuite, en 1970, Alferov a essayé une approche différente pour la conception des cellules solaires à base du GaAs. En utilisant des composants ternaires $Al_xGa_{1-x}As$, il a fabriqué la première cellule solaire à hétérojonction p-AlGaAs/n-GaAs. Bien que cette première cellule n'avait qu'un rendement de 10-11%, Alferov a démontré un point important, en employant un matériau d'un gap d'énergie large entre la région de base en GaAs et la surface avant, la réponse spectrale de la cellule s'est améliorée pour les longueurs d'ondes courtes . En se basant sur cette idée, en 1972 Woodall et Hovel ont plutôt fabriqué une cellule à hétéro-face (juste la face avant qui est en AlGaAs) AlGaAs p/n. La génération des porteurs s'est élevée dans l'émetteur, et avec un matériau d'un grand gap d'énergie pour passiver la surface avant, le nouveau design de Woodall et Hovel a montré un rendement de 15.3% pour AM1 et 19.1% pour AM2. Cinq ans plus tard, Woodall et Hovel ont amélioré le rendement de leur cellule à 21.9% pour AM1 . En parallèle, Sahai et al ont fabriqué une cellule à hétéro-face mais avec une couche graduelle de l'émetteur AlGaAs et le rendement atteint de la cellule était 24.7% [1].

En 1978, Fan et Bosler ont proposé une nouvelle approche. En fabriquant une cellule homo-jonction $n^+/p/p^+$ avec une couche étroite de l'émetteur, ils ont réalisé que l'efficacité de collection peut rester élevée sans l'incorporation d'une couche AlGaAs. Leur première cellule avait une jonction émettrice de $0.045 \mu m$, ce qui signifie qu'une fraction importante des porteurs générés se trouve dans la région de base faiblement dopée. Ce qui a rendu leur cellule si connue était la simplicité du design et la couche oxyde de l'anode sur la surface avant utilisée comme couche antireflet. Cette première tentative a donné un rendement de 20% pour AM1 . Ensuite des cellules similaires avec des jonctions émettrices de $0.06 \mu m$ ont été conçues pour les concentrateurs. Ces jonctions émettrices étroites ont présenté de faibles pertes par résistances causées par les courants latéraux lorsque l'émetteur n^+ est fortement dopé. En 1984, Gale et al ont ajouté une hétérojonction à la face arrière de la cellule homo-jonction qui fait apparaître un champ électrique important de la face arrière. Ceci a donné une amélioration dans la tension de circuit ouvert. Pour AM1 le rendement était de 22% et la tension du circuit ouvert est de 1.01 V [1].

Pendant que la cellule n/p à homo-jonction étroite se développée durant le début des années 80, la cellule p/n à hétéro-face a montré des améliorations assez lentes jusqu'à 1985 quand Hamaker

Introduction générale

et al ont présenté des cellules avec un rendement de 26% à 753 Suns AM1.5. Une couche fenêtre de juste 300 Å a été développée pour supprimer les pertes indésirables dans l'absorption. En 1987 le groupe Spire atteint un rendement de 23.7% pour 1 sun AM1.5 qui était à l'époque un rendement record.

Actuellement le design le plus fréquent pour les cellules solaires à base du GaAs est la jonction p/n à hétéro-face [1].

Le développement des énergies renouvelables représente un des défis majeurs de nos sociétés pour les générations futures. En effet, la consommation mondiale d'électricité n'a cessé d'augmenter ces dernières décennies.

La production mondiale d'énergie actuelle est constituée à 80% d'énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz) et fissiles (nucléaire). Dans le cas des énergies d'origine fossile se pose tout d'abord le problème de l'approvisionnement prévu dans les quelques dizaines d'années à venir en cas de maintien, voire d'intensification, du rythme de la consommation. S'ajoute à cela la question du rejet massif de CO₂ lié à la combustion de ces matières premières, qui devient de plus en plus inquiétante puisque ce gaz à effet de serre contribue au réchauffement climatique [2]. Presque toutes les énergies renouvelables sont des dérivées de l'énergie solaire : le vent, le rayonnement solaire, la force de l'eau [3]. L'énergie photovoltaïque, à savoir la conversion directe de l'éclairement solaire en électricité, possède un potentiel énorme. En effet, l'énergie Le principe d'une cellule photovoltaïque repose sur la conversion d'une énergie lumineuse en énergie électrique utilisable et est basée sur trois mécanismes :

- L'absorption des photons par le matériau constituant la cellule.
- La conversion en énergie électrique, c'est-à-dire la création de paires électron/trou dans le matériau.
- La collecte des porteurs générés dans un circuit électrique extérieur [2].

L'étude de l'effet de l'irradiation sur les propriétés électriques et optiques des semiconducteurs a fait l'objet de nombreux travaux depuis plusieurs décennies. Les premières études sur ces effets ont été effectuées au début des années cinquante sur le germanium vu la bonne qualité des échantillons disponibles. Au cours des années soixante, d'autres travaux de l'effet de l'irradiation sur les propriétés électriques et optiques ont été entrepris sur le silicium en raison du développement de l'industrie des transistors formés à partir de ce matériau. Avec l'amélioration des méthodes de croissance et avec l'introduction des matériaux épitaxiés dans les circuits industriels. Il y a eu une reprise de cette activité au cours des dernières années qui a été motivée par les besoins de la recherche spatiale [4].

Introduction générale

Dans ce travail nous allons essayer d'étudier de l'effet des défauts d'irradiations par des électrons énergétique sur les paramètres électrique d'une cellule solaire en GaAs de type p^+/n et n^+/p à travers simulation numérique par logiciel SCAPS .

Dans le premier chapitre , nous présenterons une étude théorique pour expliquer généralités sur cellules solaire , la structure de Arsenic galium , Les interaction des particules massives avec cellule solaire et défauts par l'irradiation des électrons .

Dans le deuxième chapitre , nous présenterons la description de la simulation numérique par logiciel SCAPS .

Enfin nous présentons au dernier chapitre les résultats obtenus dans cette etude et leurs interprétations.

*Chapitre I : Cellules solaires en
Arsenic de gallium*

I.1 Introduction :

L'énergie renouvelable est n'importe quelle source d'énergie maintenable qui vient de l'environnement naturel. Les formes les plus fréquentes de l'énergie renouvelable sont le soleil, le vent, la biomasse et l'hydraulique. Shell Oil prévoit que 50% de l'énergie du monde va être fournie par les sources renouvelables vers 2040 [5]. Chaque heure, le soleil éclabousse la terre avec beaucoup plus d'énergie que la population entière du globe en consomme. Par conséquent, l'énergie solaire a la propriété souhaitable d'être essentiellement illimitée [6]. Énergie naturelle par excellence, le Soleil, cet astre incandescent dont la température de surface est voisine de 5 500 °C, nous dispense chaleur et lumière. Centre de notre système planétaire, sa place est si grande dans l'activité terrestre sous toutes ses formes qu'il fut bien souvent objet d'adoration [7].

Lorsque la lumière pénètre dans le semiconducteur, les photons peuvent être absorbés ou transmis à l'intérieur. Ceci dépend de l'énergie du photon et celle du gap interdit E_g du semiconducteur. Si l'énergie du photon est inférieure à E_g , le photon n'est pas absorbé. Dans ce cas, la lumière est transmise à travers le matériau. Si cependant l'énergie du photon est supérieure ou égale à E_g , le photon interagit avec un électron de la bande de valence et le déplace vers la bande de conduction laissant derrière lui un trou dans la bande de valence.

Ce mouvement des électrons produit un courant et le champ électrique résultant donne une tension. Ainsi on peut extraire une puissance, qui est le produit de la tension et le courant. L'efficacité de conversion d'une cellule solaire est définie comme étant le rapport entre la puissance électrique fournie et la puissance de la lumière incidente.

Les cellules solaires à base du GaAs présente aussi une bonne résistance aux irradiations qui sont particulièrement importantes dans les applications spatiales où l'endommagement par les irradiations peut considérablement dégrader le fonctionnement des cellules [8].

I.2 Rayonnement solaire:

Le rayonnement électromagnétique émis par le soleil est la manifestation externe des interactions nucléaires qui se produisent au cœur du soleil et l'ensemble des interactions secondaires qu'elles génèrent dans son enveloppe. Ce rayonnement constitue la quasi-totalité de l'énergie expulsée par le soleil. Le rayonnement électromagnétique a un double aspect ondulatoire et corpusculaire. Le corpusculaire est le photon de masse nulle ; son énergie est

reliée à la fréquence ν ou à la longueur d'onde λ de l'onde associée par la formule $E = h\nu = hc / \lambda$.

I.3 Le spectre solaire :

L'intensité du spectre solaire hors atmosphère est de 1.367 kw/m^2 [9]. La répartition spectrale (en longueurs d'onde) est assez simple puisqu'elle à 5700 K [8, 9]. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement en [9] :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($\lambda < 0.4\mu\text{m}$).
- 47% dans le visible ($0.4 < \lambda < 0.8\mu\text{m}$).
- 44% dans la bande des infrarouges ($\lambda > 0.8\mu\text{m}$).

Sur terre, le spectre solaire est modifié en intensité (de l'ordre de 1000W/m^2) et en distribution spectrale énergétique. Cette modification est due à l'absorption par l'atmosphère (vapeur d'eau, gaz carbonique, etc...). La Figure I.6 donne l'allure du spectre hors atmosphère et au niveau de la mer lorsque le soleil est au zénith. Les ordonnées représentent le flux de puissance en fonction de la longueur d'onde en microns, que l'on appelle aussi l'irradiance spectrale. On qualifie souvent ces différents spectres par la masse d'air traversée, une masse d'air 1 correspond par définition à l'épaisseur de l'atmosphère terrestre [8, 9, 10]. Le premier spectre (hors atmosphère) est donc appelé **AM0** (Air Mass 0, la masse d'air est nulle) et le second (lorsque le soleil est au zénith) **AM1** [8, 9]. Le spectre de référence, correspond à **AM1.5** constitue une estimation des latitudes moyennes, et il s'étale de $0.3\mu\text{m}$ à $2\mu\text{m}$. Chaque fois que l'on désira comparer les performances des convertisseurs photovoltaïques il sera nécessaire de se ramener à ce spectre de référence [9].

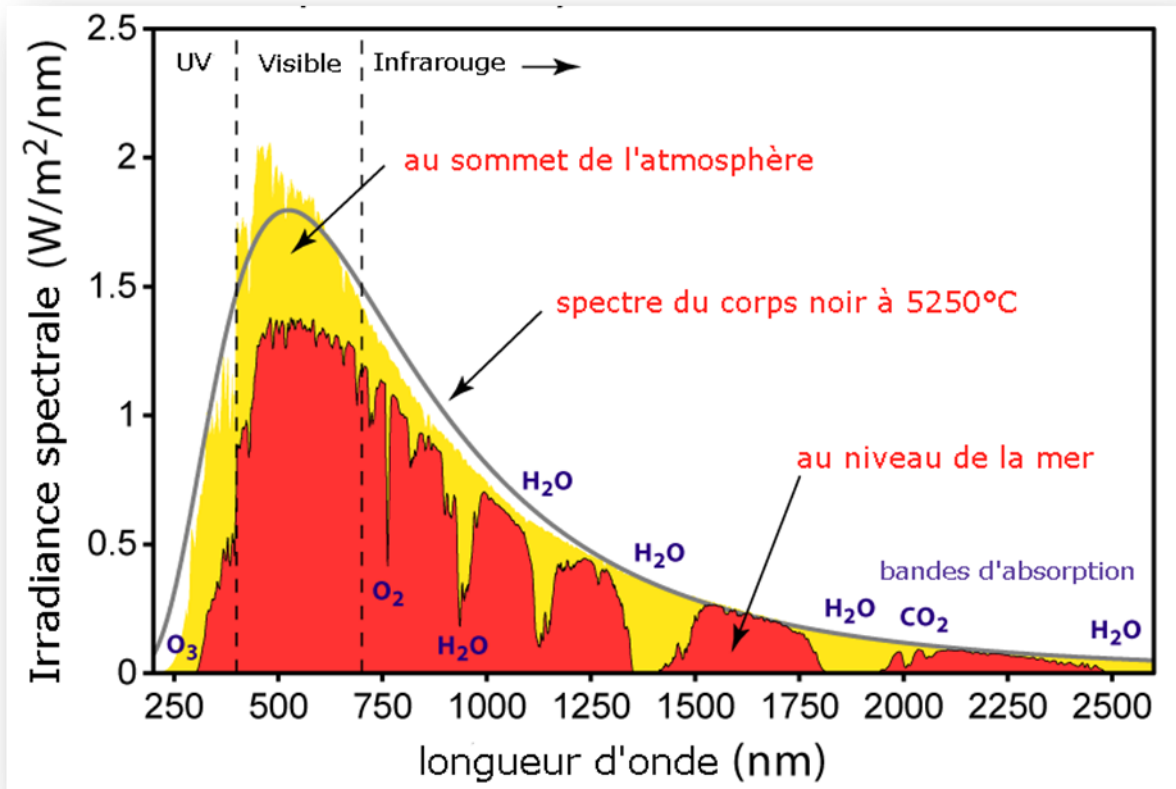


Figure I.1 : Spectre solaire.

I.4 Méthodes de croissance des couches GaAs :

La figure I.2 montre la structure tétraédrique de base du GaAs dans laquelle chaque atome de Ga a quatre plus proches voisins de As, et celui-ci a comme plus proches voisins quatre atomes de Ga. Cette figure montre également l'interpénétration des deux sous-réseaux semblables au réseau de diamant avec une constante de réseau $a_0 = 5.6533 \text{ \AA}$ [10].

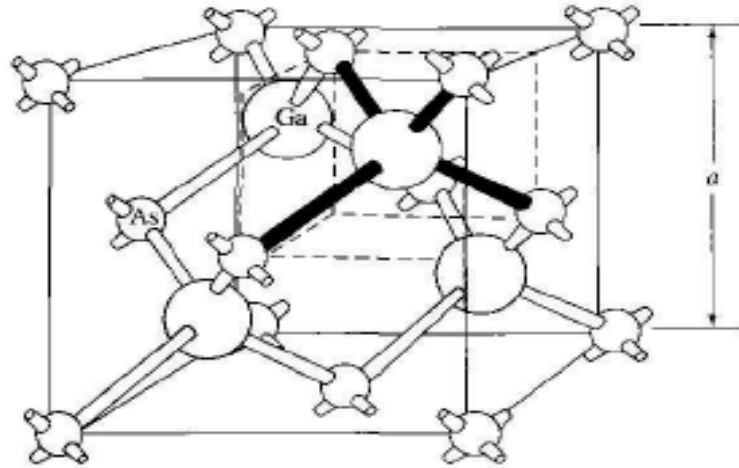


Figure I.2: Structure cristalline du GaAs [10].

Il est possible de schématiser cette structure bidimensionnellement (voir figure I.3(a)). L'arrangement périodique des atomes qui forme le solide donne naissance à ce qu'on appelle une structure de bandes d'énergie résultantes de la dégénérescence des niveaux d'énergie discrets de l'atome isolé. La dégénérescence reflète l'effet du potentiel périodique qui n'est autre que la somme des potentiels des atomes de la structure cristalline. Dans la figure I.3(b) on montre la structure de bande pour le GaAs obtenue par la résolution de l'équation de Schrödinger pour les électrons de valences exposés au potentiel périodique de la structure. Une excitation extérieure peut fournir de l'énergie à un électron lié (dans la bande de valence). Si cette énergie est suffisante pour libérer l'électron, il devient mobile et peut se déplacer librement au sein de la structure, laissant derrière lui une lacune au voisinage de l'ion que l'on appelle *Trou* qui peut mouvoir aussi à travers la structure comme charge positive. D'un point de vue énergétique on dit que l'électron s'est déplacé depuis la bande de valence jusqu'à la bande de conduction. Le gap interdit E_g (1.43 eV) [11] n'est autre que la barrière de potentiel que doit surmonter l'électron pour devenir libre (voir figure I.3(c)).

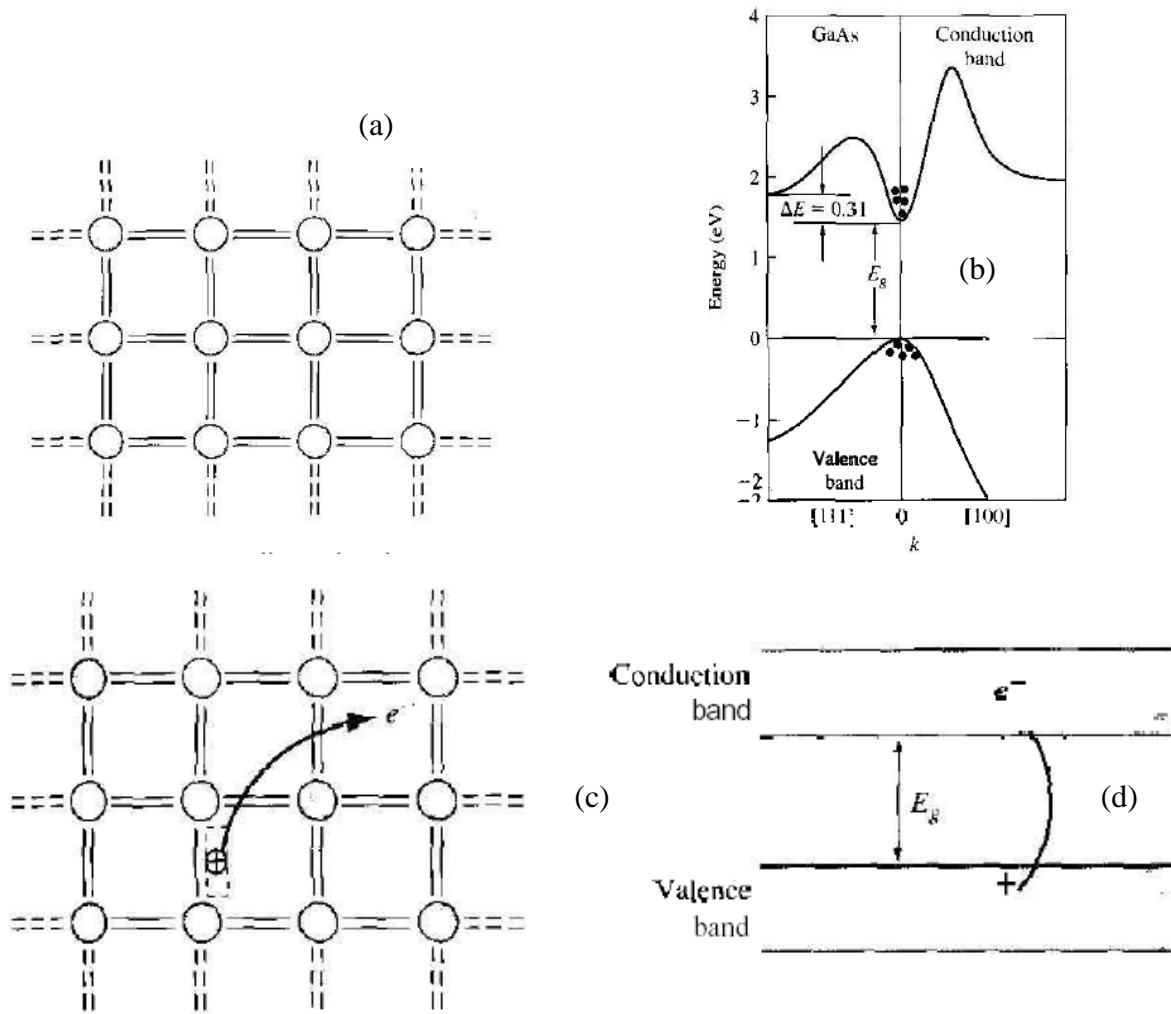


Figure I.3 : (a) Présentation bidimensionnelle de la structure cristalline du GaAs, (b) Structure des bandes du GaAs et (c) et (d) mouvement d'un électron et d'un trou dans l'espace réel et dans l'espace réciproque.

Plusieurs méthodes sont utilisées comme techniques de croissance des couches des films GaAs ; L'épitaxie par jets moléculaires (MBE), l'épitaxie en phase liquide (LPE) et l'épitaxie en phase vapeur (VPE) [12].

L'épitaxie est une technique de croissance orientée, l'un par rapport à l'autre, de deux cristaux possédant un certain nombre d'éléments de symétrie communs dans leurs réseaux cristallins. On distingue l'homo-épitaxie, qui consiste à faire croître un cristal sur un cristal de nature chimique identique, et l'hétéro-épitaxie, dans laquelle les deux cristaux sont de natures chimiques différentes. Étymologiquement, « épi » signifie « sur » et « taxis », « arrangement ». L'épitaxie est utilisée pour faire croître des couches minces. On utilise pour cela une

surface parfaitement polie d'un monocristal, le substrat, sur lequel seront déposés d'autres atomes. Le substrat est choisi de façon à avoir des paramètres de maille proches de ceux du cristal que l'on veut obtenir [12].

A titre d'exemple nous présentons les deux premières techniques (MBE [13], LPE [14]).

I.5 Conversion photovoltaïque dans une jonction p-n en GaAs :

Une jonction p-n est un dispositif semiconducteur constitué d'un cristal dont une partie est dopée de type p et l'autre de type n.

Un semiconducteur de type p est obtenu en ajoutant un élément trivalent (ex : le Gallium) au matériau. Cet élément a 3 électrons de valence qui forment des liaisons avec 3 atomes voisins alors que la quatrième liaison covalente reste pendante. Un électron de valence voisin est facilement piégé par la liaison pendante, laissant derrière lui un trou mobile dans la bande de valence. Ainsi le courant dans un semiconducteur de type p est dû au déplacement des trous mobiles [9,15].

Un semiconducteur de type n est obtenu cependant en ajoutant un élément pentavalent (ex : l'Arsenic) au matériau. Cet élément a 5 électrons de valence. 4 d'entre eux forment des liaisons avec 4 atomes voisins alors que la cinquième liaison covalente reste pendante. L'électron de cette liaison est facilement émis à la bande de conduction. Ainsi le courant dans ce type de semiconducteur est dû au déplacement des électrons mobiles [9,15].

Lorsque la lumière tombe sur une cellule solaire (qui est à base d'un semiconducteur), les photons ayant une énergie supérieure au gap interdit produisent des paires électron-trou excédentaires. L'un des porteurs est considéré comme porteur minoritaire dans un semiconducteur dopé. Une jonction p-n sépare et collecte spatialement ces porteurs minoritaires photogénérés. Les porteurs minoritaires qui diffusent vers la jonction avant qu'ils soient recombinés deviennent des porteurs majoritaires et constituent le courant externe généré par la lumière du dispositif. Le voltage de la cellule dépend de la hauteur de la barrière du potentiel, qui est toujours inférieure à la largeur de la bande interdite et liée au dopage des régions *p* et *n*. Pour aboutir à une efficacité de conversion élevée, il est nécessaire de produire des paires (électron-trou) avec des longueurs de diffusion qui dépassent la région de base pour améliorer la collection des électrons et des trous pour chaque photon absorbé. Par conséquent il est souhaitable que l'absorption des photons se produise là où un champ électrique existe [16].

La structure d'une cellule solaire, comme le montre la figure 1.4, est formée d'une jonction qui sépare la région de l'émetteur de la région de la base de types de conductivités opposées (n ou p). Les dimensions des régions de l'émetteur et de la base sont optimisées de sorte que l'absorption de la lumière soit maximale près de la jonction. Ceci dans le but de minimiser l'effet de la recombinaison sur les porteurs minoritaires photogénérés. Des appellations plus descriptives peuvent être attribuées à l'émetteur et à la base. La base peut être nommée par absorbeur puisque dans l'optimisation usuelle d'une cellule solaire la majorité de la lumière incidente est absorbée dans la base. L'émetteur peut être aussi nommé par collecteur puisque ces premières fonctions sont de collecter les porteurs minoritaires photogénérés dans la base [16]. L'émetteur et la base sont métallisés pour le contacte ohmique. Le contact avant est formé sur une grille modèle qui assure une transparence de 95% pour la lumière incidente [16].

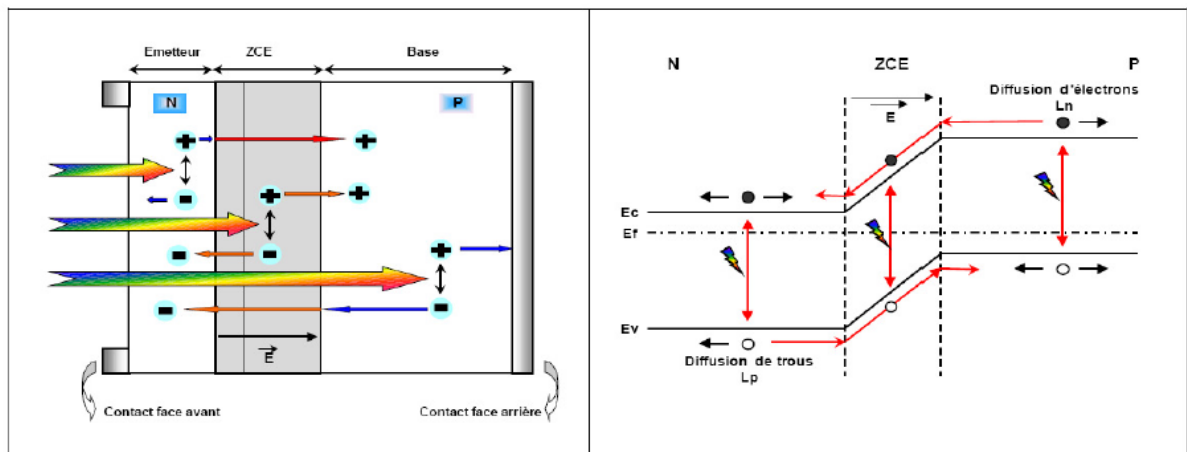


Figure I.4 : Structure d'une cellule (à gauche) et son diagramme de bande (à droite) [17].

Les phénomènes physiques importants dans une cellule solaire sont l'absorption optique, la génération des porteurs minoritaires, le transport des porteurs minoritaires (par diffusion ou entraînement), et la recombinaison en surfaces et en volume. La figure I.5 (b) montre les régions de la cellule solaire dans lesquelles ces phénomènes se produisent et (a) montre les couches cellule solaire à base GaAs, Le film transparent a comme rôle de minimiser les pertes par réflexion sur la surface avant de la fenêtre. La fenêtre est en GaAlAs avec un gap de 1.8 eV pour augmenter l'absorption des photons incident (absorption maximale pour 1.8 eV et 1.43 eV du spectre) [16].

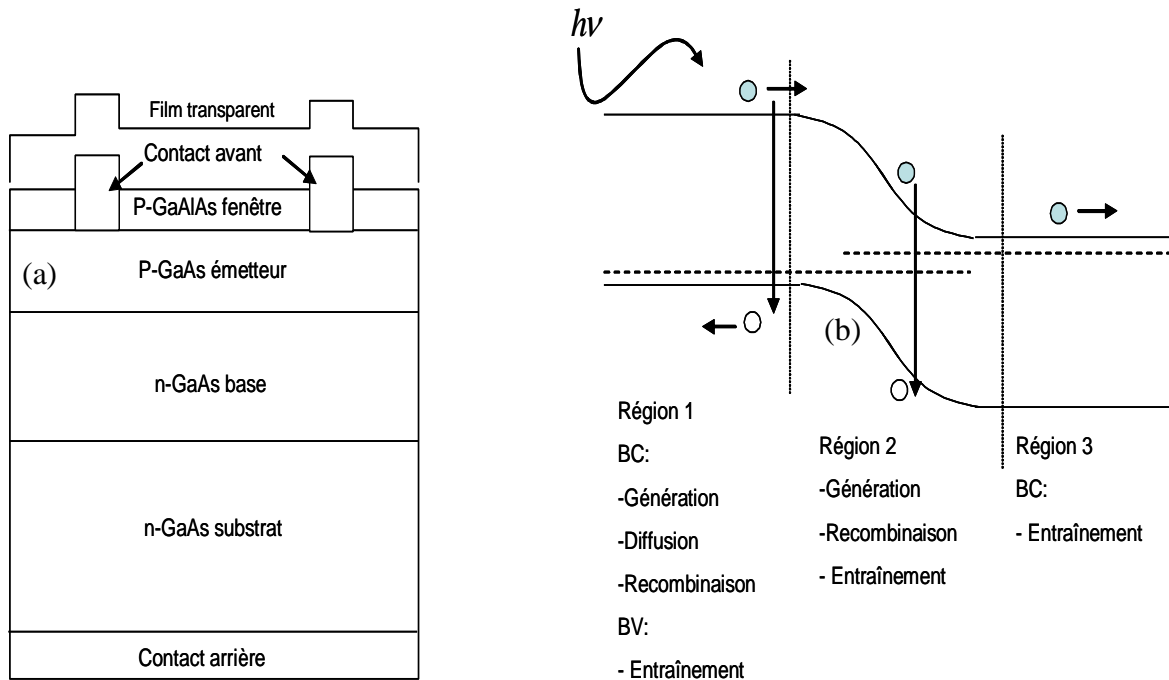


Figure I.5 : (a) les couches cellule solaire à base GaAs et (b) Transport électrique et mécanismes de recombinaison dans une cellule p-n en GaAs [18].

I.6 Les cellules solaires à base de GaAs :

La jonction PN constitue l'élément de base de toute l'électronique, et constitue le module élémentaire dont dépend le fonctionnement d'un grand nombre de dispositifs à semiconducteurs. Les résultats obtenus trouveront leurs applications dans de nombreux composants plus complexes [19]. La différence de concentration d'électrons entre la zone dopée n+ et celle de type p entraîne une tension de diffusion V_D à la jonction des deux zones de conductivité opposée. La tension de diffusion provoque un champ électrique intrinsèque à la jonction, dans une zone appelée ZCE (Zone Charge d'Espace) [20].

A l'équilibre, cette zone désertée de porteurs libres est présente essentiellement dans la région la moins dopée. Sa largeur varie en moyenne entre 0.1 et 1 micron en fonction du profil et du niveau de dopage (voir la figure I.6) [20]. On distingue alors, dans la jonction p/n , deux zones :

- Les zones neutres (émetteur et base) ou il ne règne aucun champ électrique.
- La zone charge d'espace.

A la jonction, le champ électrique intrinsèque permet l'accélération des porteurs minoritaires vers la zone où ils sont majoritaires. Ainsi, les électrons de la base de type p sont accélérés vers la zone d'émetteur dopée n+ [20]

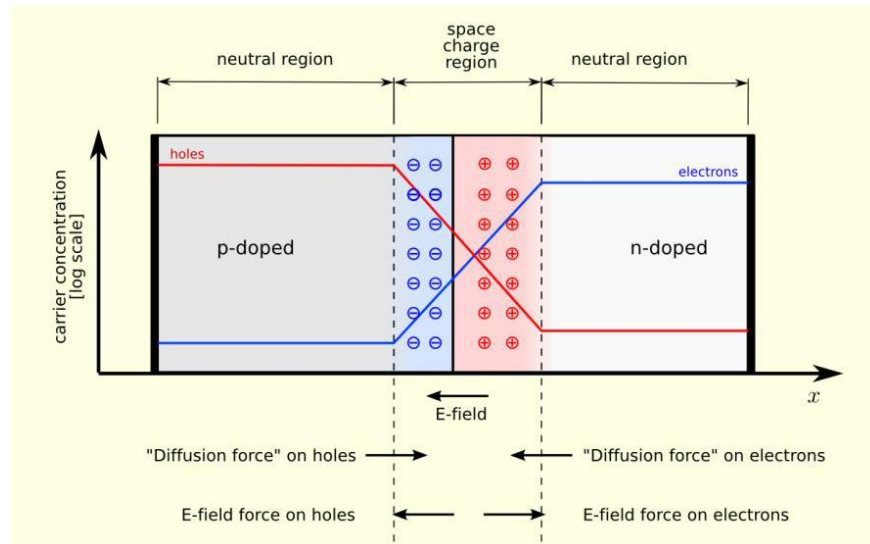


Figure I.6 : Jonction pn à l'équilibre.

Quand la jonction p-n est une cellule solaire qui est exposée à la lumière, les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photons porteuses auront un comportement différent suivant la région :

➤ dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura une photo courant de diffusion.

➤ dans la zone de charge d'espace, les paires électrons / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura une photo courant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner une photo courant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [21].

I.7 Les paramètres de sortie d'une cellule solaire:

Le fonctionnement d'une cellule solaire est généralement caractérisé par deux courants: le photocourant et le courant de l'obscurité. Le courant de l'obscurité est dû principalement à la diffusion des porteurs minoritaires injectés dans les régions quasi-neutres de l'émetteur et de la base. Le photocourant est composé des porteurs minoritaires qui diffusent à travers les régions quasi-neutres et se collectent par le champ électrique de la zone de charge d'espace.

Le photocourant et le courant de l'obscurité sont calculés par la somme des courants de diffusion et d'entraînement dans les régions quasi-neutres et la zone de charge d'espace, en tenant compte de la génération et de la recombinaison. Dans chaque région, le transport des porteurs minoritaires est déterminé par la résolution des équations de continuité et l'équation de Poisson, qui s'écrivent pour le cas unidimensionnelle comme suit :

L'équation de continuité des électrons libres :

$$-\frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = G - U \quad (\text{I.1})$$

L'équation de continuité des trous libres :

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = G - U \quad (\text{I.2})$$

L'équation de Poisson :

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_0\epsilon_r} \quad (\text{I.3})$$

Où les équations des densités de courants des électrons et des trous

$$J_n = q\mu_n n \left(-\frac{d\psi}{dx} \right) + \mu_n k_B T \left(\frac{dn}{dx} \right), \quad J_p = q\mu_p p \left(-\frac{d\psi}{dx} \right) - \mu_p k_B T \left(\frac{dp}{dx} \right) \quad (\text{I.4})$$

ρ est la densité des charges et $\epsilon_0\epsilon_r$ est la constante diélectrique.

La caractéristique courant-tension pour une cellule solaire est donnée par [9,22]

$$I = I_0 \left(\exp \frac{qV}{k_B T} - 1 \right) - I_{ph} \quad (\text{I.5})$$

Avec :

$$I_0 = qN_c N_v \left[\frac{1}{N_a} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_d} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right] \exp \left(\frac{-E_g}{k_B T} \right) \quad (\text{I.6})$$

I_0 est le courant de saturation en polarisation inverse et I_{ph} est le photocourant. N_c, N_v (cm^{-3}) Sont, respectivement, les densités des états effectives à E_c, E_v . N_a, N_d , sont les dopages des régions p et n , respectivement. D_p, D_n , sont, respectivement, les coefficients de diffusion des trous et des électrons. τ_n, τ_p , sont les durées de vie des électrons et des trous.

La figure I.7 montre la caractéristique $J-V$ idéale de la cellule solaire. Les paramètres représentatifs de cette caractéristique sont la densité du courant de court circuit ($J_{sc} \text{ Acm}^{-2}$), la tension du circuit ouvert ($V_{oc} \text{ V}$), le facteur de forme (FF %) et la puissance maximale ($P_{max} \text{ Wcm}^{-2}$).

V_{oc} c'est la tension aux bornes de la cellule solaire en condition de circuit ouvert, appelé également par le mode photovoltaïque [12]. Lorsqu'on branche un voltmètre aux bornes de la cellule, le courant qui débite de la cellule s'annule par la résistance élevée du voltmètre et celui-ci indique une tension, c'est la tension du circuit ouvert [22] :

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \tag{I.5}$$

V_{oc} est lié à E_g du matériau, la barrière du potentiel à l'équilibre, l'intensité de la lumière, le courant de saturation inverse, et les résistances séries [12]:

- Autant que E_g est large, plus grande est la barrière du potentiel, ce qui donne un V_{oc} plus grand.
- Quand l'intensité de la lumière augmente, la caractéristique $J-V$ va se déplacer en plus vers le bas, ce qui sert aussi à croître V_{oc} dû à la nature exponentielle de la relation entre le courant et la tension.
- D'après la relation (I.5), une augmentation dans le J_0 entraîne une diminution dans le V_{oc} , puisque si J_0 augmente il va déplacer la caractéristique illuminée vers le haut ce qui signifie qu'elle va couper l'axe des tensions a une tension plus inférieure.
- L'effet des résistances séries apparaît dans la pente de la caractéristique en régime ohmique.

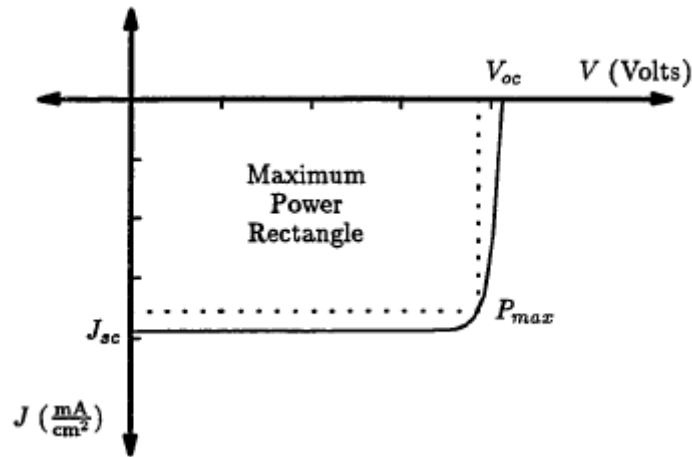


Figure I.7 : Caractéristique typique d'une cellule solaire illuminée.

J_{sc} est liée directement à l'absorption du dispositif, puisque la lumière non absorbée ne peut être convertie en courant. Cependant, la largeur de la région de déplétion et les longueurs de diffusion des porteurs affectent de façon importante J_{sc} . Si la région de déplétion est large, et les longueurs de diffusion sont longues alors une large fraction des photons absorbés va créer des paires électron-trou qui vont être séparés par le champ dans la région de déplétion et collecter comme courant. D'autre part si la région de déplétion est étroite et les longueurs de diffusion sont courtes, seulement une petite fraction de la lumière absorbée i.e. ; porteurs photogénérés qui vont être expulsés par le champ de la région de déplétion avant d'être recombinés dans la région neutre [12].

P_{max} représente le point de la puissance maximale, qui indique aussi le courant et la tension du fonctionnement optimaux et définit le facteur de forme à travers la relation $P_{max} = I_{sc} V_{oc} FF$ [12].

Finalement le rendement de conversion de la cellule est définie comme étant le rapport entre la puissance P_{max} de la cellule et la puissance de la lumière incidente :

$$\eta = (P_m/P_i) \times 100, (\%) \quad (\text{I.6})$$

L'efficacité de conversion maximale est approximativement 28%, mais en pratique et à cause de plusieurs autres facteurs, l'efficacité est seulement autour de 10-20%. Les facteurs qui influent le fonctionnement d'une cellule solaire sont la réflexion, les résistances série, la valeur basse du facteur de forme, et l'absorption inappropriée [23].

I.8 Interactions des particules massives avec la matière :

Les dommages causés par une particule massive sont à première vue proportionnels à l'énergie déposée dans le matériau par les particules, et plus particulièrement à l'énergie apportée par unité de masse du matériau cible. Cette perte d'énergie par unité de longueur évalue la façon dont la particule incidente est ralentie et absorbée dans le matériau [24].

L'énergie déposée par la particule incidente dépend du type d'interaction, il est donc essentiel de différencier les interactions des particules incidentes avec les électrons du cortège des interactions avec les noyaux. Nous les présentons rapidement ici, par ordre croissant d'impact sur les structures des composants optoélectroniques [25].

a) Ionisation et excitation :

L'interaction d'une particule chargée avec un électron du cortège consiste en un transfert d'une partie de l'énergie de la particule vers l'électron. Il y a ionisation quand l'énergie cédée est suffisante pour arracher cet électron qui peut alors à son tour interagir avec le matériau cible. Il y a création d'un pair électron / trou. Dans le cas où l'énergie cédée est insuffisante, l'électron du cortège n'est pas arraché mais excité sur un niveau supérieur, on parle d'excitation. La désexcitation de cet électron se fait par l'émission d'un photon X ou d'un électron Auger. Dans ces deux cas, la particule incidente est diffusée et change de direction. Ce changement de direction est d'autant plus important que la particule incidente est légère. Ceci explique la différence de trajectoire dans le matériau entre électrons et ions lourds. Alors qu'un électron sera fortement diffusé et aura donc une trajectoire non linéaire dans le matériau cible, un ion lourd, du fait de sa masse plus importante sera très peu diffusé et traversera le matériau cible linéairement [26, 27].

b) Rayonnement de freinage :

Dans le cas des particules chargées, et en particulier pour les électrons, lors de l'interaction avec le champ électrique des atomes cibles, la particule est déviée, et donc rayonne. Ces rayonnements, qui sont principalement dans la gamme des rayons gamma, peuvent à leur tour ioniser la matière. Ce rayonnement est appelé rayonnement de freinage ou

Bremsstrahlung. Il devient important pour des particules de forte énergie ($> 10 \text{ MeV}$ pour les électrons et $> 1 \text{ GeV}$ pour les protons) [26].

Collision élastique avec les noyaux atomiques : Un atome peut être déplacé de son site du réseau par les interactions coulombiennes des particules énergétiques chargées et la charge positive du noyau atomique (diffusion de Rutherford). L'atome déplacé peut à son tour entrer en collision avec d'autres atomes en les obligeant à se déplacer si une énergie suffisante a été transférée à l'atome initial [27, 28].

Collisions inélastiques avec les noyaux atomiques: La collision inélastique de protons très énergétiques avec le noyau atomique provoque la mise du noyau dans un état excité. Une fois excité, le noyau émet des nucléons énergétiques qui provoquent son recul à travers la structure du réseau. Le noyau reculé à son tour entre en collision avec d'autres noyaux en causant leur déplacement. [27, 28].

I.9 Les défauts introduits par l'irradiation des électrons :

L'irradiation par des électrons énergétiques introduit des défauts dans les structures des semiconducteurs. Ces défauts produisent des niveaux d'énergie profonds dans le gap d'énergie [29, 30]. Les effets des irradiations des électrons sur la production de niveaux profonds dans le GaAs a été étudié en détail par un nombre de groupes de recherche [31, 32, 33]. Dans le GaAs, Lang *et al.* ont montré que le taux d'introduction du défaut pour des électrons de 1 MeV sur les atomes de gallium est plus grand que sur les atomes d'arsenic. Ils ont conclu que les défauts créés (pièges à électron désignés par E_1 à E_5) sont dus principalement aux déplacements du gallium [34]. D'autre part, Arnold et Gobeli ont trouvé que les défauts responsables de la réduction de la photoluminescence proviennent principalement de déplacement des atomes d'arsenic [34]. Cette conclusion a été aussi confirmée par Pons et Bourgoin qui ont vérifié que les principaux défauts créés par l'irradiation des électrons dans le GaAs de type n, proviennent des déplacements atomiques dans le sous réseau de l'arsenic et non pas dans celui du gallium [34, 35].

Les défauts induits par l'irradiation des électrons dans le GaAs de type n et de type p sont caractérisés par: le taux d'introduction (ou la concentration), l'énergie d'ionisation, et les sections efficaces de captures des porteurs libres. Un exemple de ces caractéristiques déduites à partir des données de la technique DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) réalisée par

le groupe de Bourgoin est présenté dans le tableau I.1 [35, 36]. E_4 , E_5 et H_3 sont des pièges profonds et peuvent être considérés comme des centres de recombinaison [36].

Pièges à electrons	$K(cm^{-1})$	$E_c - E_T(eV)$	$\sigma_n(cm^2)$
E_1	1.50	0.045	2.2×10^{-15}
E_2	1.50	0.140	1.2×10^{-13}
E_3	0.40	0.300	6.2×10^{-15}
E_4	0.08	0.760	3.1×10^{-14}
E_5	0.10	0.960	1.9×10^{-12}
Pièges à trous	$K(cm^{-1})$	$E_v + E_T(eV)$	$\sigma_p(cm^2)$
H_0	0.8	0.06	1.6×10^{-16}
H_1	0.1 – 0.7	0.29	5.0×10^{-15}
H_2	0.1	0.41	2.0×10^{-16}
H_3	0.2	0.71	1.2×10^{-14}

Tableau I.1: Les caractéristiques des pièges à électrons et des pièges à trous à partir de [31, 36].

I.10 Conclusion :

Ce premier chapitre est une introduction sur les rayonnements solaires et Le spectre solaire (hors atmosphère AM0 et dans l'atmosphère AM1, AM1.5). Nous avons présenté, par la suite, Méthodes de croissance des couches GaAs , Conversion photovoltaïque dans une jonction p-n en GaAs , Les cellules solaires à base de GaAs et leur paramètres de sortie , à prés ça nous avons présenté Les défauts introduits par l'irradiation des électrons .

***Chapitre II : Simulation numérique
par logiciel SCAPS***

II.1 Introduction :

Le SCAPS-1D acronyme de « Solar Cell Capacitance Simulator one Dimension » est un logiciel de simulation des cellules solaires unidimensionnelles développé à l'Université de Gent en Belgique par Marc Burgelman et al [37]. Pour simuler les caractéristiques électriques des dispositifs photoniques tels que les cellules solaires à couches minces. Le SCAPS a été développé à l'origine pour des structures des cellules de CuInSe₂ et de CdTe. Cependant, Plusieurs version ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour des cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et des cellules amorphes (a-Si et de Si micro-morphe). Avec le SCAPS, il est possible de simuler des structures constituées d'un nombre définis de couches (jusqu'à 7 couches intermédiaires ainsi que les contacts avant et arrière), avec des profils de dopage différents, et avec des distributions énergétiques des niveaux donneurs ou accepteurs donnés, dans le volume et aux interfaces pour un spectre de lumière arbitraire [37]. La majorité des paramètres peuvent être introduits avec variations graduées (en dépendance de la composition et de la profondeur de la cellule). Par exemple, χ , ϵ , N_C , N_V , V_{thn} , V_{thp} , μ_n , μ_p , N_A , N_D , tous les pièges (défauts) N_t plus l'effet tunnel (Tunneling) inter-bandes (dans la bande de conduction ou dans la bande de valence) [37].

II.2 Principe de simulation :

Ce logiciel a été développé par le département électronique et information des systèmes (ELIS) à l'université de Gent en Belgique. SCAPS-1D est un simulateur unidimensionnel pour simuler les caractéristiques électriques (DC et AC) des cellules solaires en couche minces à hétérojonction. Actuellement, cet outil offre une palette de services permettant aux utilisateurs de tester leurs modules sur les cellules à base de CdTe et CuInGaSe₂ [38]

En effet, le programme SCAPS permet de résoudre des équations complexes pour des structures composées de couches semi-conductrices. Le choix de ces couches est généralement fait à partir d'un profil de dopage arbitraire et d'une distribution énergétique arbitraire des niveaux profonds des donneurs ou des accepteurs sous différents type d'éclairement. Des itérations de résolutions des équations sont faites jusqu'à convergence de l'algorithme. Ce dernier a fait l'objet de plusieurs études qui ont montré sa forte faisabilité pour ce type de structures [38]. Avec SCAPS, il est possible de simuler des structures constituées d'un nombre définis de couches (jusqu'à 7 couches intermédiaires plus les

contacts avant et arrière), avec des profils de dopage différents, et avec des distributions énergétiques des niveaux donneurs ou accepteurs. Les résultats simulés et mesurés sont comparés avec un bon accord théorie pratique [38].

En principe, n'importe quel programme numérique capable de résoudre les équations de base des semi-conducteurs peut être employé pour modéliser les cellules solaires à base de couches minces. Parmi ces programmes de simulation, on cite : PC-1D qui a été développé avec deux versions l'une en 1985 et l'autre en 1988, ADEPTF et AMPS. Le calcul est basé sur l'équation de Poisson, reliant la charge au potentiel électrostatique, et les équations de continuité pour les électrons et les trous. Cependant, plusieurs options additionnelles doivent être réunies dans le programme surtout pour simuler des cellules solaires à base de couches minces. Le calcul devrait également être capable de prendre en compte la présence de plusieurs couches dans la cellule; le phénomène de recombinaison à l'interface des couches, introduit par les discontinuités dans les bandes d'énergie (E_c et E_v). Il devrait aussi, traiter correctement le problème de recombinaison et les centres de génération-recombinaisons dans les états profonds au sein du volume des couches. Il devrait être aussi capable de calculer et simuler des mesures électro-optiques effectuées généralement sur ce type de cellules, non seulement la caractéristique $I(V)$, mais aussi la réponse spectrale et les mesures de capacité $C(V)$ et $C(f)$. Enfin, il devrait fournir la convergence au moins pour les structures les plus communes des cellules à base de couches minces. Toutes ces options sont mises en application dans le programme de simulation SCAPS [38].

II.3 Utilisation du SCAPS :

Le logiciel SCAPS possède trois grandes fenêtres [37] :

- Fenêtre d'exécution (action panel) : elle contient deux blocs :

Le premier bloc permet de spécifier les conditions de l'expérience et les points de fonctionnement tels que, la température, la tension, la fréquence, l'illumination, les résistances série et shunt. En revanche, le deuxième bloc permet de sélectionner les grandeurs voulus afin de les simuler à savoir: la caractéristique IV , la capacitance – voltage, la capacitance-fréquence et la réponse spectrale [37].

- Fenêtre de conception de dispositif et la définition du problème (Définition panel) :

Cette fenêtre permet de définir le dispositif photovoltaïque où l'ajout d'une couche affiche une fenêtre qui contient un grand nombre de paramètres électriques comme l'énergie de gap,

la permittivité électrique, l'affinité, le dopage, et le type de dopage. En plus, les défauts de différents types peuvent être définis, à la fois, dans la masse de couches et aux interfaces. En considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux à savoir : le type de charge, la distribution énergétique, la propriété optique et les transitions métastables entre les niveaux. Toutefois, il faut noter que les Propriétés optiques telles que le coefficient d'absorption et la réflexion face avant et arrière, en fonction de la longueur d'onde, peuvent être importés des fichiers data du logiciel. On note également, que le code du SCAPS contient des fichiers data d'extension.def qui contiennent une conception et une définition du dispositif photovoltaïque standard comme le CdTe et le CIGS. En outre, la conception est modifiable grâce à des champs spécifiques [37]

- Fenêtre des résultats :

Cette fenêtre affiche les résultats de la simulation sous forme de graphe avec la possibilité de les sauvegarder ou exporter leurs valeurs. Le SCAPS est capable de calculer les bandes d'énergie, les concentrations et les courants à un point de fonctionnement donné, les caractéristiques (J-V), les caractéristiques du courant alternatif (C et G en fonction de la tension V et /ou f), le rendement quantique (également avec polarisation lumière ou tension), et les bandes d'énergies en régime alternatif [37].

II.3.1 Action panel :

Le point de fonctionnement spécifie les paramètres qui ne sont pas variables dans les mesures de la simulation, et qui sont relatifs à l'opération de mesure. Ceci implique [39] :

- La température T** : Importante pour toutes les mesures. Note : dans SCAPS, seulement $N_c(T)$, $N_v(T)$, les vitesses thermiques, le voltage thermique kT et tous leurs dérivés sont les seuls variables qui ont une dépendance thermique explicite ; on doit saisir manuellement, pour chaque valeur T , les paramètres du matériau correspondant.
- Le voltage V** : il ne concerne pas les simulations $I-V$ et $C-V$. C'est le voltage de la polarisation DC dans une simulation $C-f$ et $QE(\lambda)$. SCAPS commence toujours à 0 V, et s'exécute au voltage du point de fonctionnement par un nombre d'étapes qu'on doit aussi spécifier.
- La fréquence f** : elle ne concerne pas les simulations $I-V$, $QE(\lambda)$ et $C-f$. C'est la fréquence dans laquelle la caractéristique $C-V$ est simulée.
- L'illumination** : elle est utilisée dans toutes les mesures. Pour $QE(\lambda)$, elle détermine les conditions de polarisation de la lumière. Les paramètres de base sont : l'obscurité ou la

lumière, le choix du côté illuminé, le choix du spectre. Le spectre d'illumination one sun (= 1000 W/m^2) avec la masse d'air 1.5 global est le spectre par défaut, mais il existe aussi une large gamme de lumières monochromatiques et de spectres pour plus de simulations personnalisées. S'il y a un simulateur optique, on peut immédiatement charger un profil de génération au lieu d'utiliser un spectre.

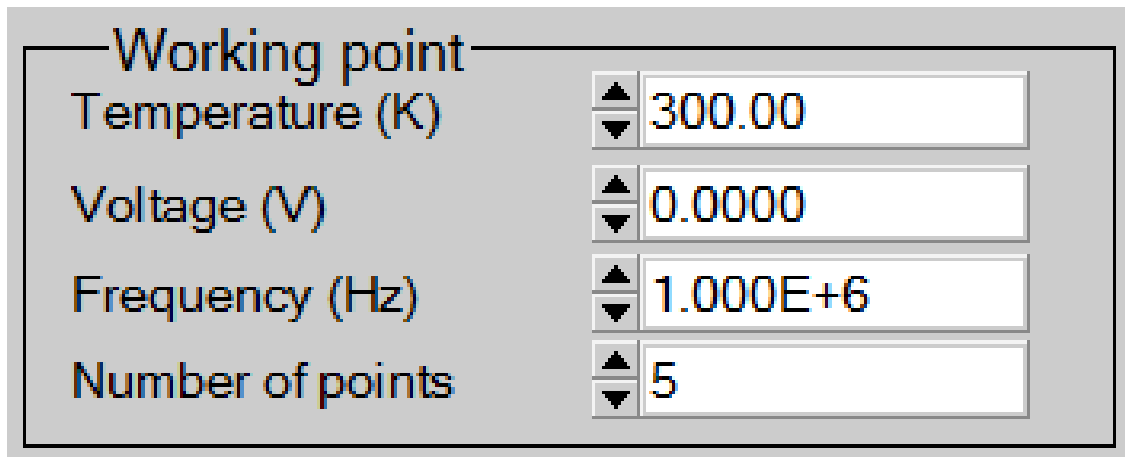


Figure II.1: Le point de fonctionnement [39].

II.3.2 Définition panel :

On clique sur le bouton SET PROBLEM dans le panneau d'action, et on choisit LOAD dans le coin droit en bas du panneau qui s'ouvre par la suite. On sélectionne et on ouvre (par exemple NUMOS CIGS Baseline.def. Ceci est un fichier exemple d'une cellule solaire à base de CIGS. Par la suite, il est possible de modifier toutes les propriétés de la cellule en cliquant sur 'SETPROBLEM' dans le panneau d'action [39].

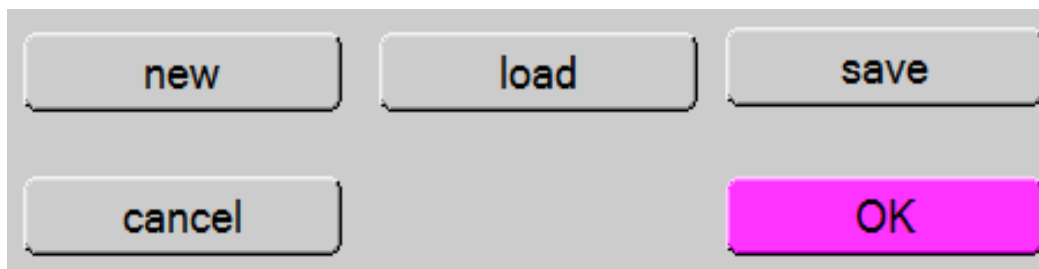


Figure II.2 : Définir le problème.

II.3.3 Ajout de défauts:

Dans une diode, le courant est converti en courant de trou au contact p de courant d'électrons au contact n. Ce signifie que quelque part dans la recombinaison de diode doit avoir lieu, même dans le dispositif le plus idéal. Alors le utilisateur doit spécifier la recombinaison certains où, au moins à un endroit (dans une couche, à un contact ou à une interface) [39]. Si (s), il ne le fait pas, un échec de la convergence entraînera dans des conditions de non-équilibre (non nul la tension et / ou d'illumination) [39].

Dans la majeure partie d'une couche semi-conductrice, trois types différents de procédés de recombinaison peuvent être introduites: par défauts, radiatifs et Auger [39].

Jusqu'à sept défauts peuvent être introduits dans une couche semi-conductrice. Les paramètres régissant chaque défaut peut être édité en cliquant sur Ajouter / Modifier-bouton approprié, figure II.3, qui ouvre panneau des propriétés de défaut Figure II.4.



Figure II.3: Ajout, modification et suppression des défauts [39].

Defect 4 of layer 1

defect type	Single Donor (0/+)
capture cross section electrons (cm ²)	1.000E-15
capture cross section holes (cm ²)	1.000E-15
energetic distribution	Gauß
reference for defect energy level Et	Above EV (SCAPS < 2.7)
energy level with respect to Reference (eV)	0.600
characteristic energy (eV)	0.200

Nt grading dependent on position x: Nt (x) exponential

Nt total (1/cm ³)	Left (x=0)	1.000E+15	Right (x=1)	1.000E+14
Nt peak (1/eV/cm ³)	Left (x=0)	2.821E+15	Right (x=1)	2.821E+14

Optical capture of electrons

refractive index (n)	3.000
effective mass of electrons (rel.)	1.000E+0
effective field ratio	1.00E+0
cut off energy (eV)	10.00

optical electron capture cross sections file: Model File

Optical capture of holes

refractive index (n)	3.000
effective mass of holes (rel.)	1.000E+0
effective field ratio	1.00E+0
cut off energy (eV)	10.00

optical hole capture cross sections file: Model File

accept cancel

Figure II.4 : Le panneau de propriétés de défaut [39].

II.3.4 Afficher les courbes simulées :

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la figure II.5. Dans ce panneau, on peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres, la densité du courant ; au dernier point de polarisation. Si on veut afficher les résultats pour des tensions intermédiaires, on utilise le bouton pause dans le panneau d'action. On peut faire apparaître les résultats par les commandes PRINT, SAVE GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran. Il est possible de faire du Couper & Coller vers, par ex., Excel, ou sauvegarder les valeurs dans un fichier de données. Vous pouvez basculer vers un de vos panneaux personnalisés (si vous avez toutefois simulé au moins une seule opération de mesure) [39].

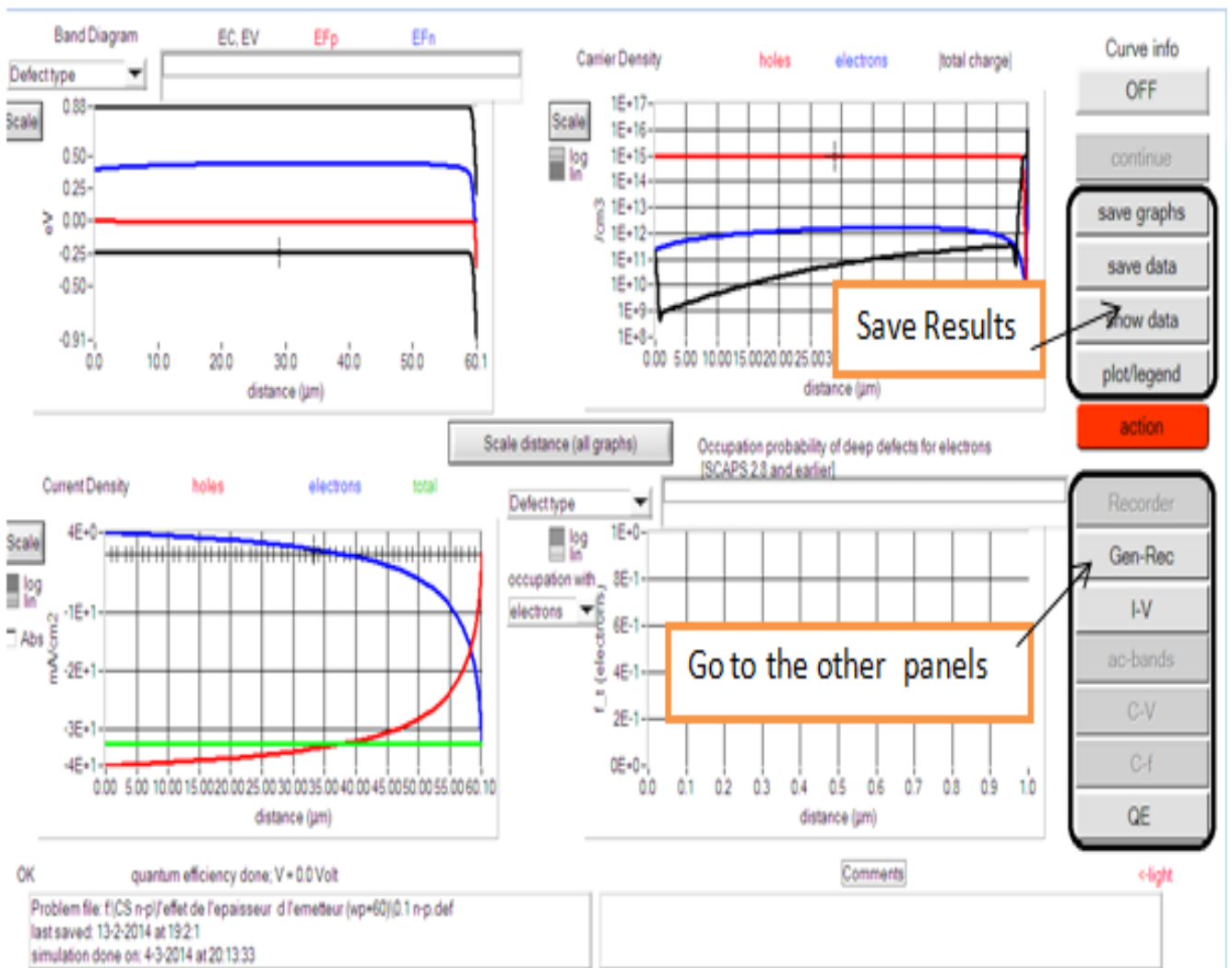


Figure II.5 : Panneau des bandes d'énergie [39].

II.3.5 Les courbes I-V à l'obscurité et en éclaircissement :

La figure II.6 montre le panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclaircissement. La couleur de la dernière courbe calculée est indiquée (lorsque le graphe est trop encombré, on clique CLEAR ALL GRAPHS dans le panneau d'action). Les courbes des taux de recombinaison sont affichées seulement pour la dernière simulation. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe [39].

Si CURVE INFO est sur ON et si on clique sur une courbe du graphe, un panneau pop-up apparaîtra, avec des informations concernant le graphe, la courbe ainsi que le point cliqué. Le bouton SCALE aide a changer la gamme et l'échelle des axes. Si on appuie sur le bouton CTRL et on sélectionne une aire rectangulaire dans un graphe, celui-ci fera un zoom intérieur (agrandissant) dans la zone sélectionnée. L'appui sur le bouton CTRL accompagné d'un clic droit donnera un zoom extérieur (Zoom out).

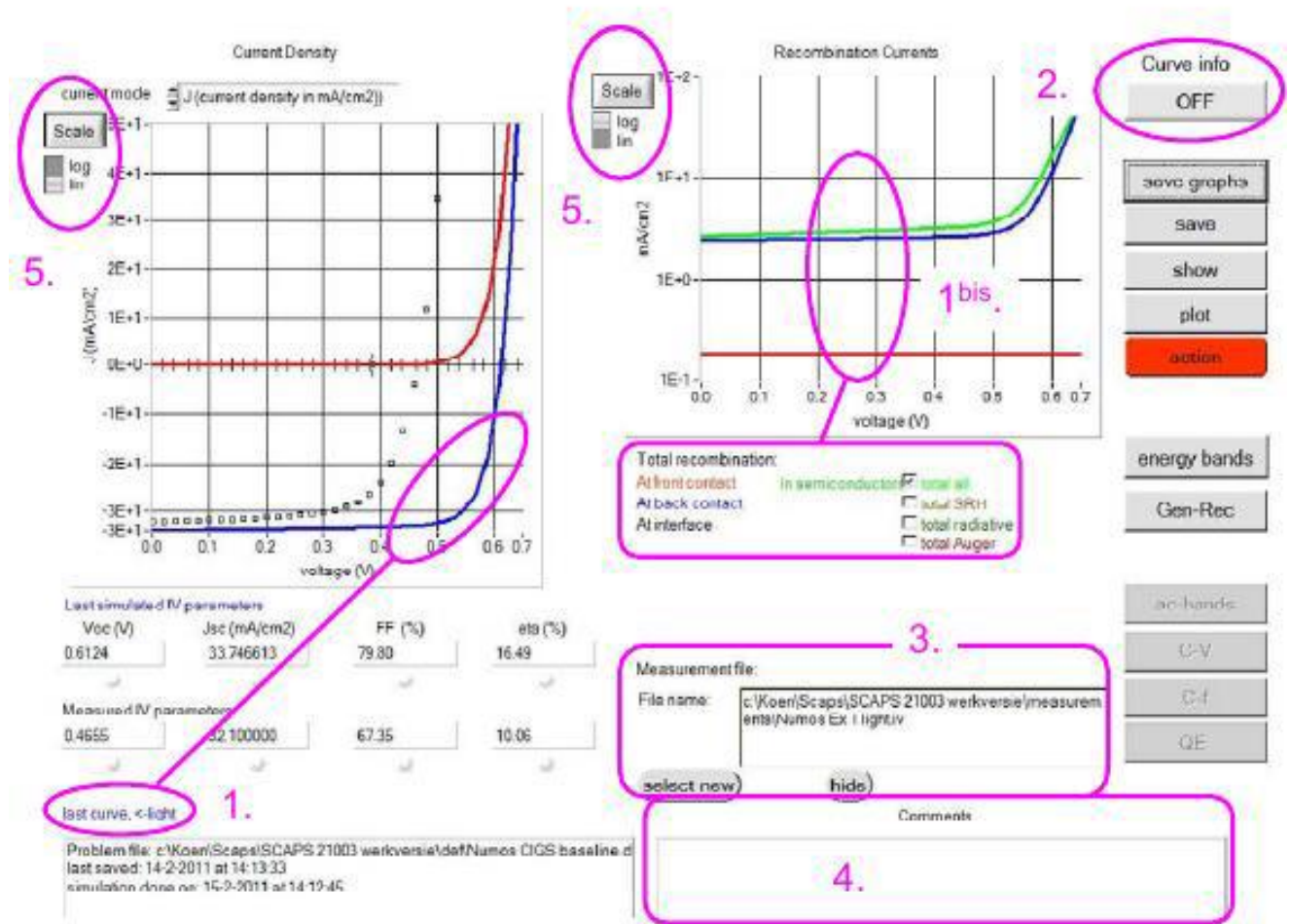


Figure II.6 : Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclaircissement [39].

II.4 Avantages et inconvénients du SCAPS :

Les avantages du SCAPS sont multiples à savoir : la grande vitesse d'exécution, les fichiers d'entrée sont accessibles à l'utilisateur en format texte tel que les données spectrales et les paramètres décrivant le dispositif, la possibilité d'introduire des interfaces et prise en compte du phénomène de recombinaison en celle-ci, l'introduction de résistances en série, et l'obtention des caractéristiques capacité-tension et capacité-fréquence [37]. Cependant, ses inconvénients concernent l'absence de la réflexion aux interfaces de différentes couches constituant la cellule qui n'est pas gérée par le SCAPS et son programme de traçage inflexible. D'autant plus, qu'il peut être instable lorsque le dispositif est loin d'être idéal et comprend des barrières secondaires [37].

II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous venons de présenter les notions de base de logiciel SCAPS, le principe de simulation, l'utilisation du SCAPS, action et définition panel, comment on ajoute les défauts, l'Affichage des courbes simulées : la courbe I-V et enfin les avantages et les inconvénients du SCAPS.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1 Introduction:

L'étude des défauts des irradiations dans le GaAs a reçu de considérables attentions pour l'intérêt que présente ce matériau dans les dispositifs électroniques employés dans les systèmes spatiaux. Ce sujet est également important pour comprendre les endommagements dans le GaAs durant l'implantation ionique utilisée dans le traitement des dispositifs. Bien que la gamme d'énergie et le type d'irradiations utilisés dans ces deux domaines soient différents, la nature des défauts principaux créés par les irradiations pourrait avoir des similarités importantes.

Il existe un grand nombre de chercheurs qui ont étudié activement l'effet des irradiations par des électrons énergétiques dans les cellules solaires à base du GaAs. Ces irradiations ont comme principale effet la production de déplacements atomiques dans le matériau, et comme résultats de ces déplacements, des défauts de structure sont créés tels que les lacunes, interstitiels, des défauts complexes (double lacune, paire lacune-impureté, paire interstitiel impureté, etc). Les défauts de structure agissent soit comme des centres de recombinaison ou des centres de piégeage des électrons et des trous. Le tableau III.1 montre les pièges d'électrons et de trous qu'ils ont caractérisés (toujours par la technique DLTS) en fonction de la dose de l'irradiation d'énergie 1 MeV dans les cellules solaires en GaAs.

$\Phi_e (cm^{-2})$	$N_d (cm^{-3})$	Irradiation température(°C)	Pièges à électrons		Pièges à trous	
			$E_t (eV)$	$N_t (cm^{-2})$	$E_t (eV)$	$N_t (cm^{-2})$
10^{14}	1.45×10^{15}	200	$E_t - 0.13$	3.2×10^{12}	$E_t - 0.29$	6.4×10^{12}
			$E_t - 0.41$	1.3×10^{12}	$E_t - 0.71$	
			$E_t - 0.71$	1.2×10^{12}		
			$E_t - 0.90$	1.6×10^{12}		
10^{15}	1.05×10^{15}	200	$E_t - 0.13$	2.2×10^{14}	$E_t - 0.29$	6.9×10^{12}
			$E_t - 0.41$	1.3×10^{14}	$E_t - 0.71$	2.0×10^{12}
			$E_t - 0.71$	7.8×10^{12}		3.0×10^{12}
			$E_t - 0.90$	9.5×10^{12}		
10^{14}	1.5×10^{15}	25	$E_t - 0.14$	1.8×10^{12}	$E_t - 0.71$	
			$E_t - 0.41$	8.2×10^{12}		
			$E_t - 0.71$			
			$E_t - 0.90$	8.8×10^{12}		
10^{15}	1.1×10^{15}	25	$E_t - 0.41$	2.1×10^{14}	$E_t - 0.13$	2.2×10^{14}
			$E_t - 0.71$	1.7×10^{12}	$E_t - 0.29$	4.0×10^{14}
			$E_t - 0.90$	2.8×10^{12}	$E_t - 0.35$	8.0×10^{12}
					$E_t - 0.71$	6.4×10^{12}
5×10^{15}	9.4×10^{14}	25	$E_t - 0.41$	4.5×10^{14}	$E_t - 0.13$	8.9×10^{14}
			$E_t - 0.71$	3.2×10^{12}	$E_t - 0.29$	1.5×10^{15}
			$E_t - 0.90$	5.0×10^{15}	$E_t - 0.35$	1.0×10^{15}
					$E_t - 0.71$	1.9×10^{14}
10^{16}	8.4×10^{14}	25	$E_t - 0.41$	8.8×10^{12}	$E_t - 0.13$	8.4×10^{14}
			$E_t - 0.71$	5.0×10^{12}	$E_t - 0.29$	1.6×10^{15}
			$E_t - 0.90$	6.5×10^{12}	$E_t - 0.35$	1.0×10^{15}
					$E_t - 0.71$	2.7×10^{14}

Tableau III.1: Les paramètres des pièges à électrons et trous d'une cellule solaire irradié par $1MeV$ d'irradiation à électrons.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'effet des défauts d'irradiations par des électrons énergétiques sur les paramètres électriques d'une cellule solaire en GaAs de type p^+/n et n^+/p . Nous présentons dans ce chapitre les résultats de la simulation numérique des caractéristiques électriques, courant-tension et réponse spectrale et aussi la densité des porteurs des charges, le taux de recombinaison-génération, d'une cellule solaire en GaAs. Une comparaison entre la structure n^+/p et p^+/n de la cellule est effectuée pour constater laquelle des deux structure présente le meilleur rendement de conversion.

Les paramètres physiques du GaAs définis dans l'interface du logiciel SCAPS sont présentés dans le tableau III.2

Paramètres	Définition	Valeurs
$E_g (eV)$	Energie de gap	1.420
ϵ_r	Permittivité relative	12.9
$\chi (eV)$	Affinité électronique	4.070
$N_c (cm^{-3})$	La densité d'état efficace dans la bande de conduction	4.7×10^{17}
$N_v (cm^{-3})$	La densité d'état efficace dans la bande de valence	7×10^{18}
$\mu_n (cm^2/v_s)$	La mobilité des électrons	8×10^3
$\mu_p (cm^2/v_s)$	La mobilité des trous	4×10^2
$V_{thn} (cm/s)$	Vitesse thermique des électrons	10^7
$V_{thp} (cm/s)$	Vitesse thermique des trous	10^7

Tableau III.2: Paramètres physiques du GaAs introduits dans SCAPS.

III.2 La cellule solaire p^+/n en GaAs:

III.2.1 La structure de la cellule solaire p^+/n en GaAs :

La cellule solaire étudiée dans cette section est une jonction p^+/n en GaAs (figure III-1), dans ce cas on a utilisé la densité des défauts dans le gap est égale à 10^{14} cm^{-3} . Le tableau III-3 présente les paramètres d'entrée de cette cellule : les épaisseurs, le dopage des deux régions p et n, Tous ces paramètres sont introduits dans l'interface de SCAPS pour simuler la densité des porteurs des charges, la recombinaison-génération, la caractéristique courant-tension de la

cellule et son rendement. Le diagramme d'énergie de la cellule est présenté dans la figure III-2

	Region p	Region n
Epaisseur (μm)	0.1	1.5
Dopage (cm^{-3})	1×10^{18}	1×10^{16}

Tableau III.3: Dopages et épaisseurs des régions de la cellule solaire p^+/n en GaAs dont l'épaisseur totale est $1.6 \mu\text{m}$.

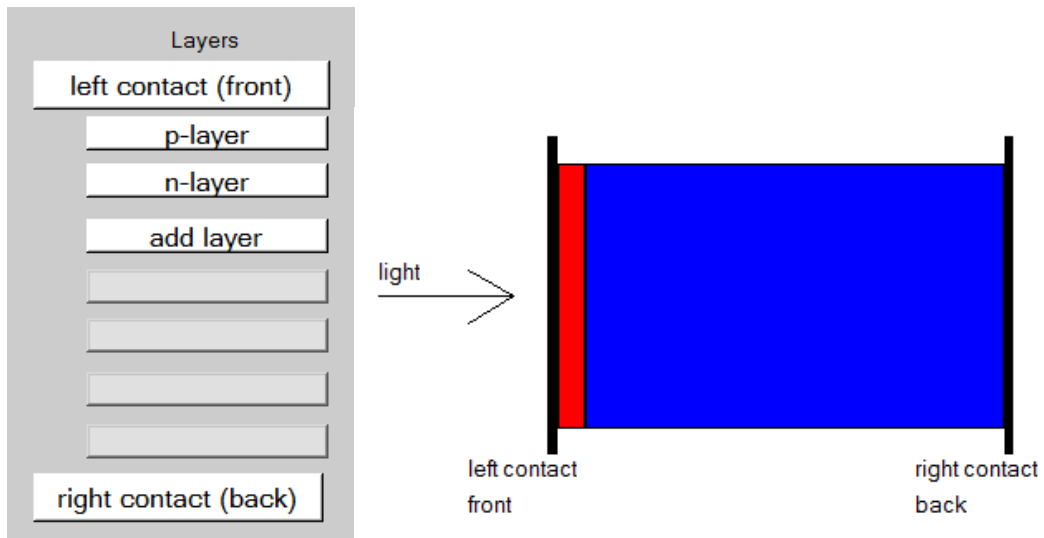


Figure III.1: Schéma de la structure unidimensionnelle de la cellule solaire p^+/n en GaAs.

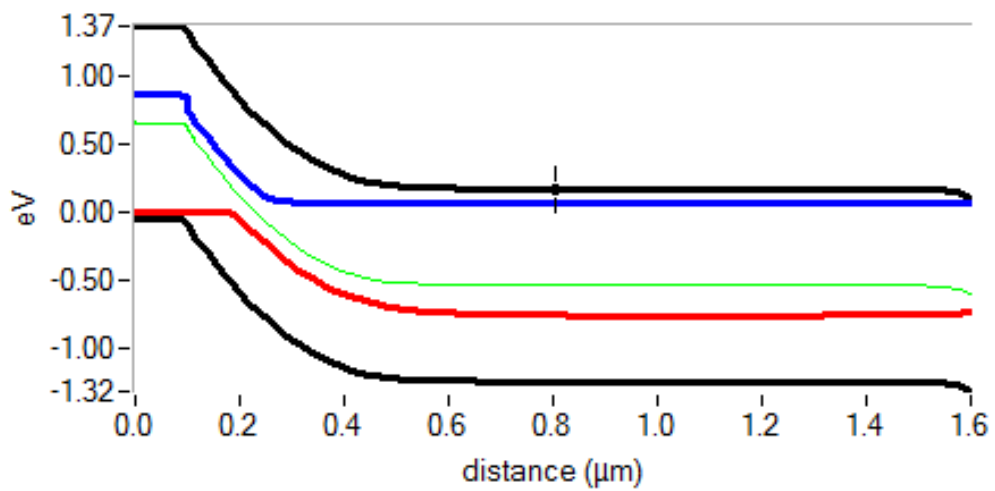


Figure III.2 : Diagramme d'énergie de la cellule solaire p^+/n en GaAs.

III.2.2 Effet des défauts sur les paramètres de la cellule solaire p^+/n en GaAs:

L'effet des défauts sur les paramètres de sortie de la cellule (outputs) extraits des caractéristiques J-V de la cellule solaire p^+/n en GaAs irradié par d'irradiation à électrons de densité des défauts est égale à $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ est résumé dans le tableau III.4. La caractéristique J-V, la densité des porteurs de charge, la recombinaison génération et la réponse spectrale obtenues sont présentées dans les figures III.3 et III.4, III.5 et III.6 respectivement.

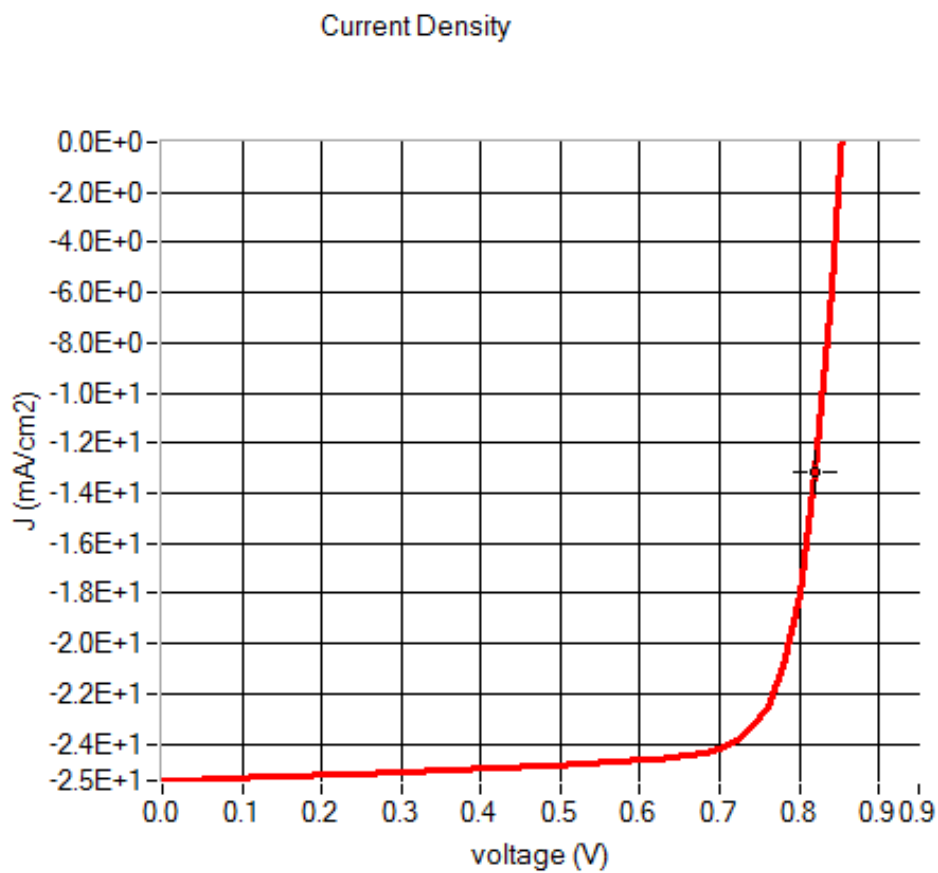


Figure III.3: La caractéristique J-V de la cellule solaire p^+/n en GaAs.

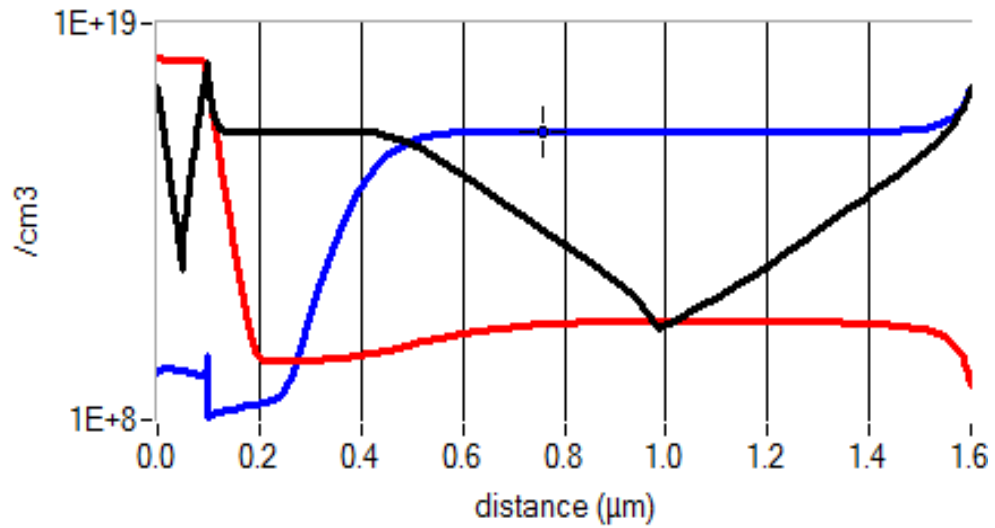


Figure III.4: La densité des porteurs de charge de la cellule solaire p^+/n en GaAs- Electron (Bleu), Trous (Rouge), Total (Noir).

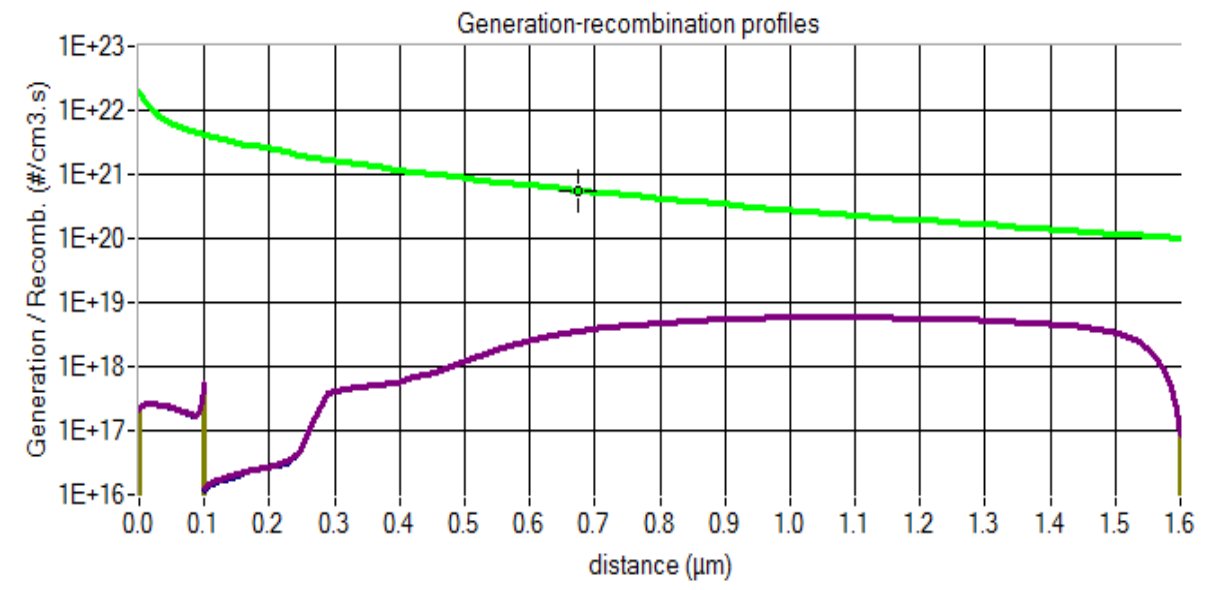


Figure III.5: Recombinaison Génération de la cellule solaire p^+/n en GaAs- Génération (Vert) ; Recombinaison (Violet).

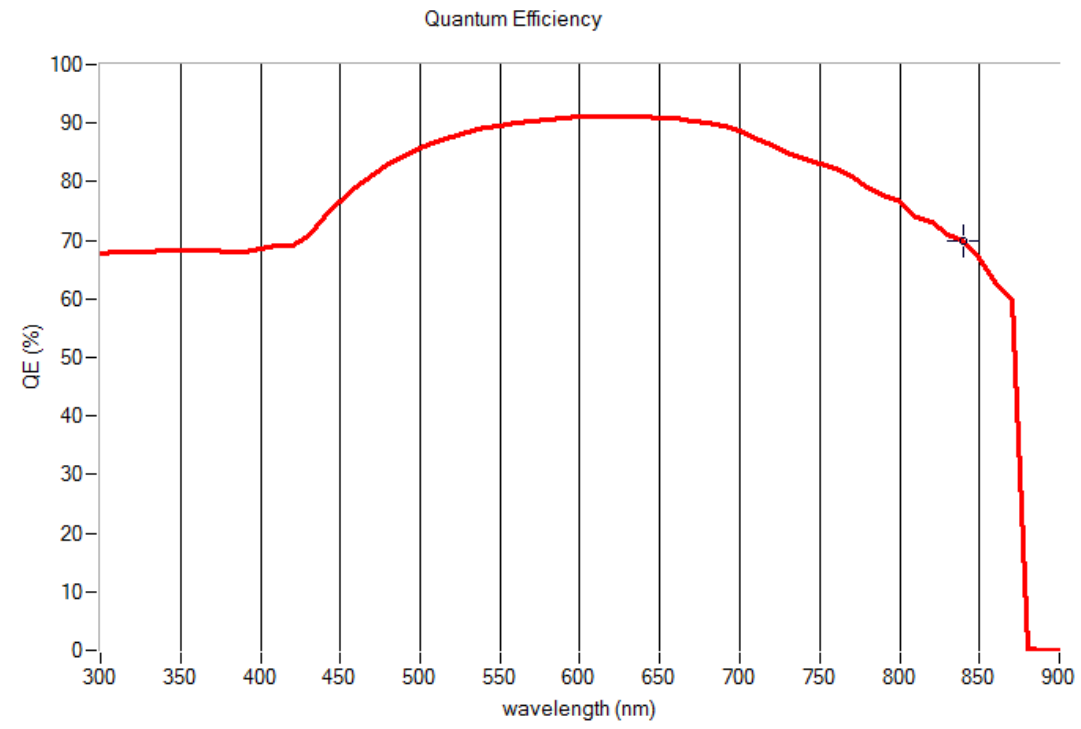


Figure III.6: Rendement quantique de la cellule solaire p^+/n en GaAs.

Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF (%)	η (%)
25.465970	0.8534	79.62	17.30

Tableau III.4: Effet des défauts sur les paramètres de sorties de la cellule solaire p^+/n en GaAs.

D'après les résultats obtenus on remarque que la densité des charges positives (Figure.III.4) au voisinage immédiat de l'interface p^+/n diminue alors qu'elle augmente dans la région 0.4-1.5 μm . La même chose pour la densité des charges négatives, leur densité augmente dans la région 0.2-1.5 μm . On remarque aussi que la densité des charges totale égale à la densité des charges positives au voisinage de 1 μm dans qui devient par conséquent

légèrement de type p. Le taux de recombinaison $U(x) = \frac{N_R C_n C_p (n \cdot p - n_i^2)}{C_n n + C_p p + C_n n_1 + C_p p_1}$, est influencé

au voisinage immédiat de l'interface p^+/n , $U(x)$ diminue considérablement et devient

négligeable devant $G(x)$ (figure III.5) à cause de la diminution de la densité des charges positive.

L'augmentation des porteurs des charges négatives encourage la recombinaison qui devient comparable à la génération optique (Figure III.5). A cause de ceci on remarque que la densité du courant décroisse avec l'augmentation de la densité des défauts. En fin les résultats de la simulation montrent que les pièges sont principalement responsables de la dégradation de J_{sc} et que tous les centres de recombinaison sont responsables de la dégradation de V_{oc} . Les autres paramètres (FF et η) sont dégradés par la combinaison de pièges et des centres de recombinaison.

Pour la réponse spectrale, une augmentation importante est remarquée pour les longueurs d'onde supérieures à 400 nm, puisque l'épaisseur du collecteur est $1.5\mu m$ cette valeur capable de favoriser l'absorption et la photogénération des porteurs libres par la lumière.

III.3 La cellule solaire n^+/p en GaAs:

III.3.1 La structure de la cellule solaire n^+/p en GaAs :

Dans ce cas la cellule solaire étudiée est une jonction n^+/p en GaAs, la figure III.4 présente la structure de la cellule utiliser, on garde les mêmes valeurs de la densité des défauts dans le gap, et l'épaisseur totale de la cellule étudiée. Les paramètres d'entrée de cette cellule sont présentés dans Le tableau III.5. Le diagramme d'énergie de la cellule est présenté dans la figure III.5.

	Region n	Region p
Epaisseur (μm)	0.1	1.5
Dopage (cm^{-3})	1×10^{18}	1×10^{16}

Tableau III.5: Dopage et épaisseurs des régions de la cellule solaire n^+/p en GaAs dont l'épaisseur totale est $1.6 \mu m$.

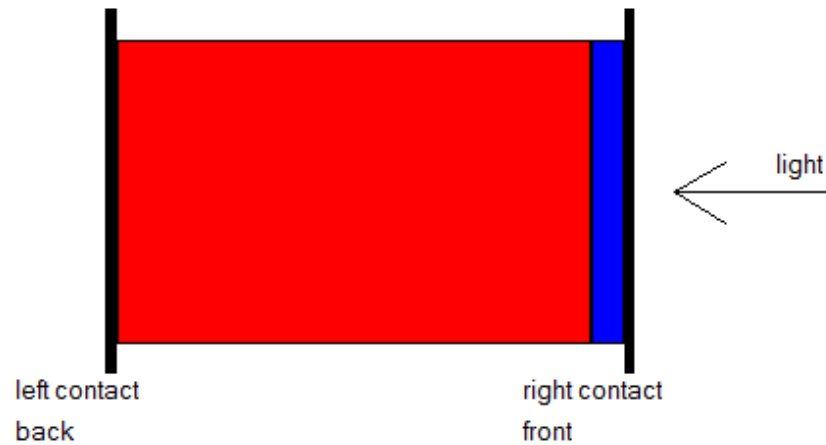


Figure III.7: Schéma de la structure unidimensionnelle de la cellule solaire n^+/p en GaAs.

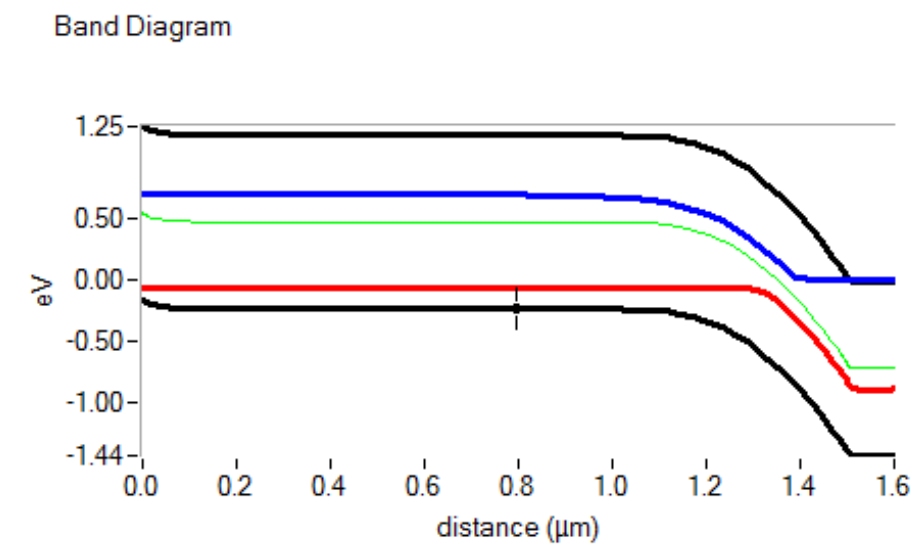


Figure III.8 : Diagramme d'énergie de la cellule solaire n^+/p en GaAs.

III.3.2 Effet des défauts sur les paramètres de la cellule solaire n^+/p en GaAs:

L'effet des défauts sur les paramètres externes de la cellule solaire n^+/p en GaAs irradié par d'irradiation à électrons de densité des défauts est égale à $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ est résumé dans le tableau III.6. La caractéristique J-V, la densité des porteurs de charge, la recombinaison

génération et la réponse spectrale obtenues sont présentées dans les figures III.9 et III.10, III.11 et III.9 respectivement.

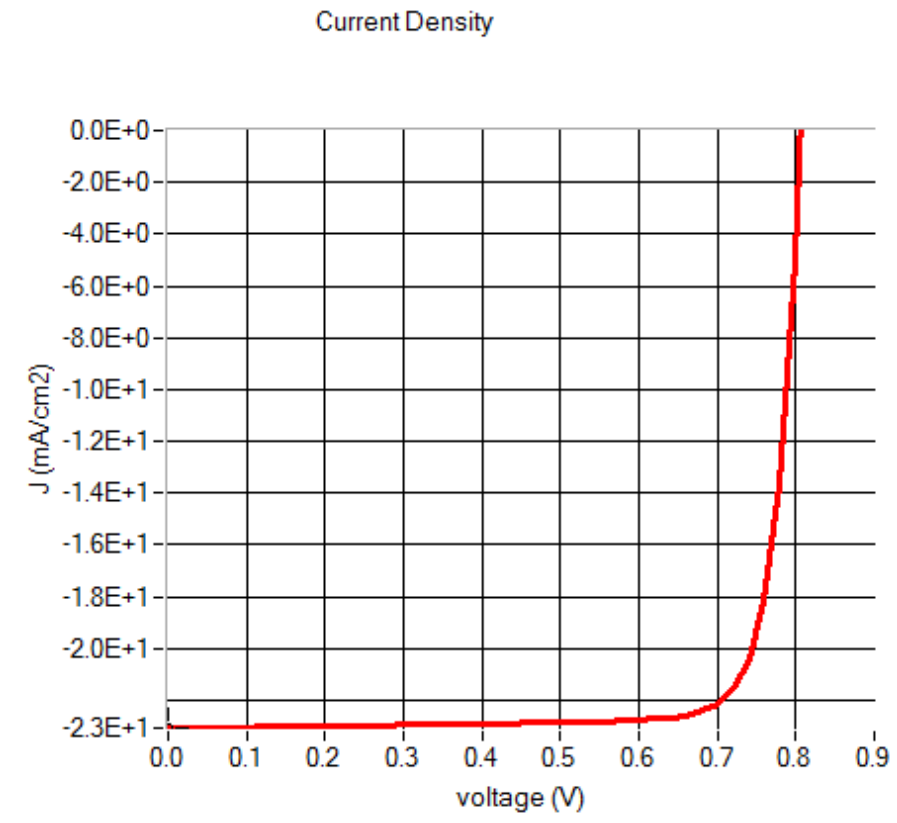


Figure III.9: La caractéristique J-V de la cellule solaire n^+/p en GaAs.

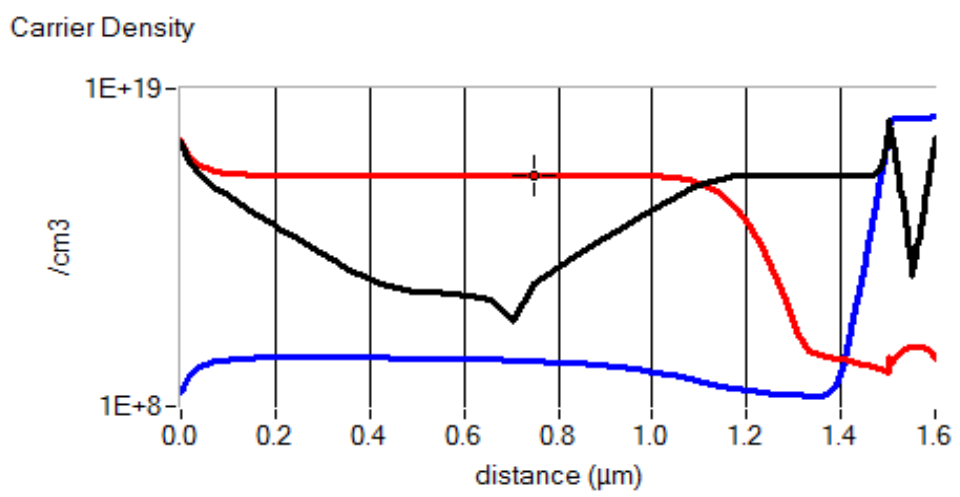


Figure III.10: La densité des porteurs de charge de la cellule solaire n^+/p en GaAs- Electron (Bleu), Trous (Rouge), Total (Noir).

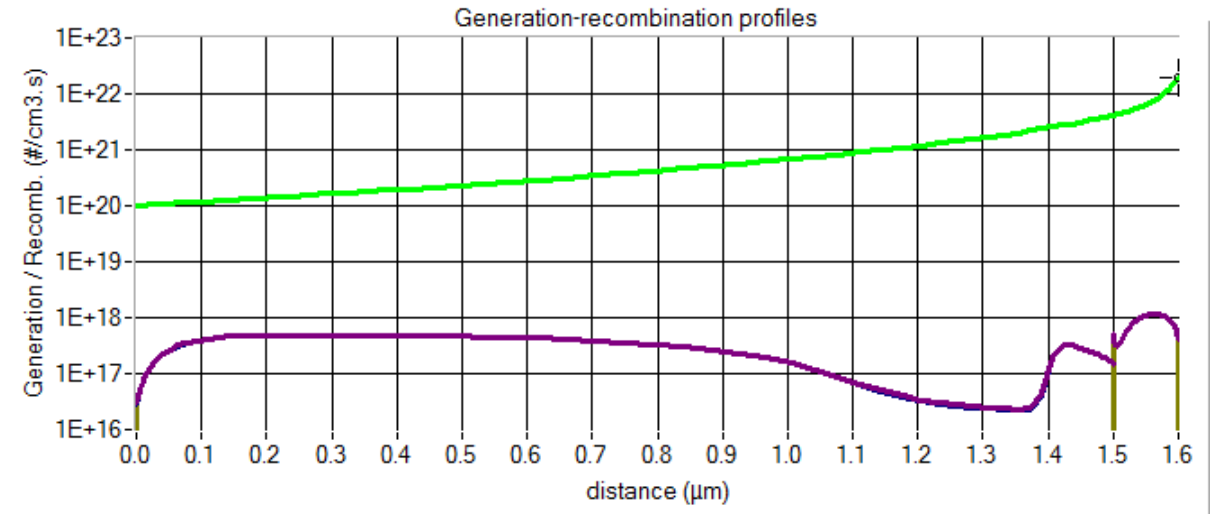


Figure III.11: Recombinaison Génération de la cellule solaire n^+ / p en GaAs- Génération (Vert) ; Recombinaison (Violet).

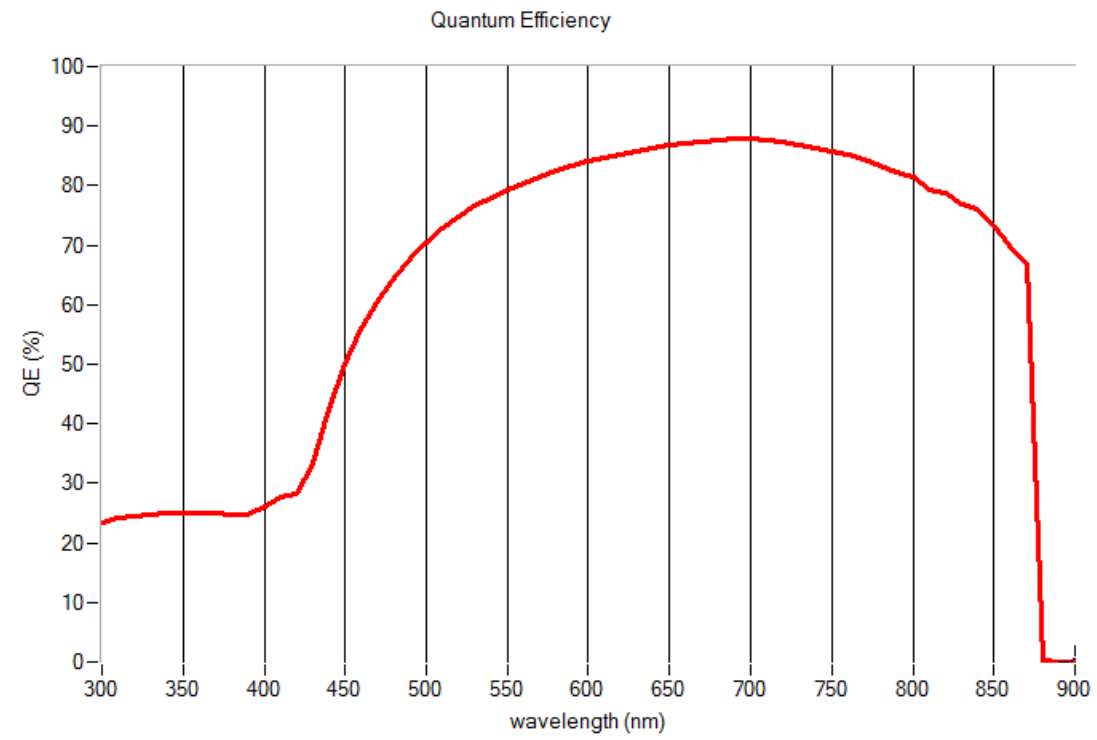


Figure III.12: Rendement quantique de la cellule solaire n^+ / p en GaAs.

Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF (%)	η (%)
23.064956	0.8076	83.41	15.54

Tableau III.6: Effet des défauts sur les paramètres de sorties de la cellule solaire n^+/p en GaAs.

D'après les résultats obtenus dans le tableau III.6 la densité de court circuit $J_{sc}=23.064956$ (mA/cm²), la tension ouverte $V_{oc} = 0.8076$ V, le facteur de remplissage $FF=83.41\%$ et le rendement $\eta=15.54\%$ si on compare ces valeurs avec les résultats obtenus de la cellule solaire p^+/n on remarque que sont plus faible puisque les trous sont moins mobiles que les électrons et plus exposés à la recombinaison (figure III.8). Puisque le dopage (10^{16} cm⁻³) du collecteur de type p entraîne un rétrécissement de la largeur de la zone de déplétion qui se produit dans la région du collecteur. Par la suite la collecte des porteurs photogénérés sera affectée, puisque c'est le champ interne de la zone de déplétion qui assure la dissociation et la collecte des électrons et des trous photogénérés.

III.4 Comparaison entre la cellule p^+/n et n^+/p :

Dans cette section on va faire une comparaison entre la cellule p^+/n et n^+/p pour constater laquelle des deux cellules présente le meilleur rendement de conversion. Pour chaque structure, on a fait également une étude comparative de l'effet des défauts sur les paramètres de sortie de la cellule qui sont, la tension de circuit ouvert V_{oc} , le courant de court circuit J_{sc} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η . La caractéristique J-V de l'effet des défauts sur la cellule solaire p^+/n et n^+/p est présenté dans la figure III.13.

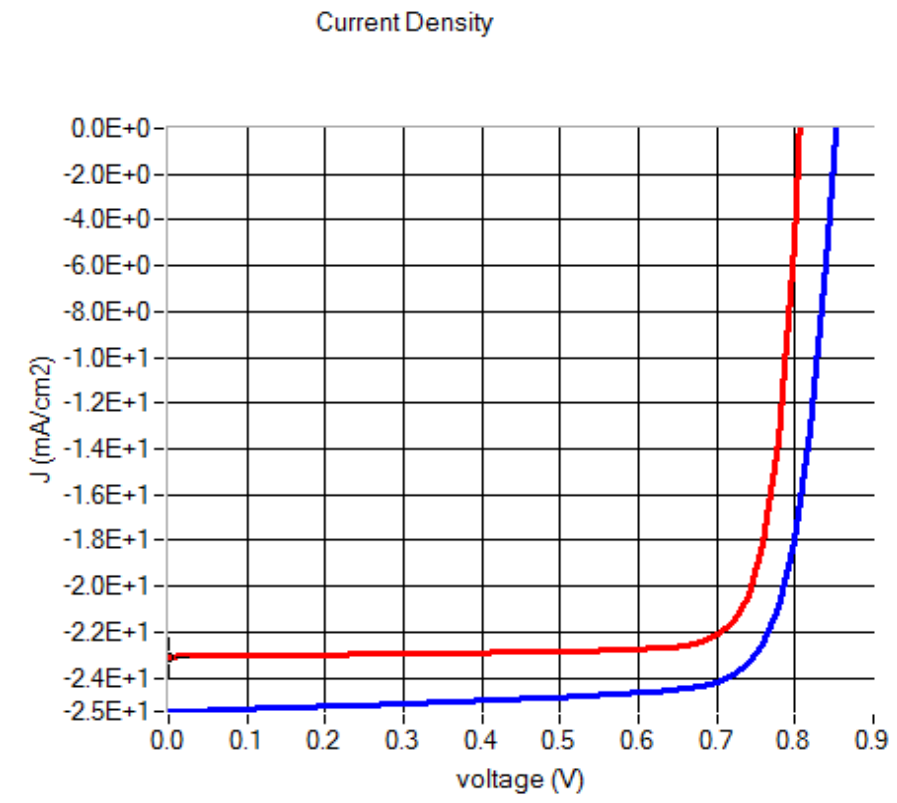


Figure III.13: La caractéristique J-V de l'effet des défauts sur la cellule solaire p^+/n (Bleu) et $n-p$ (Rouge).

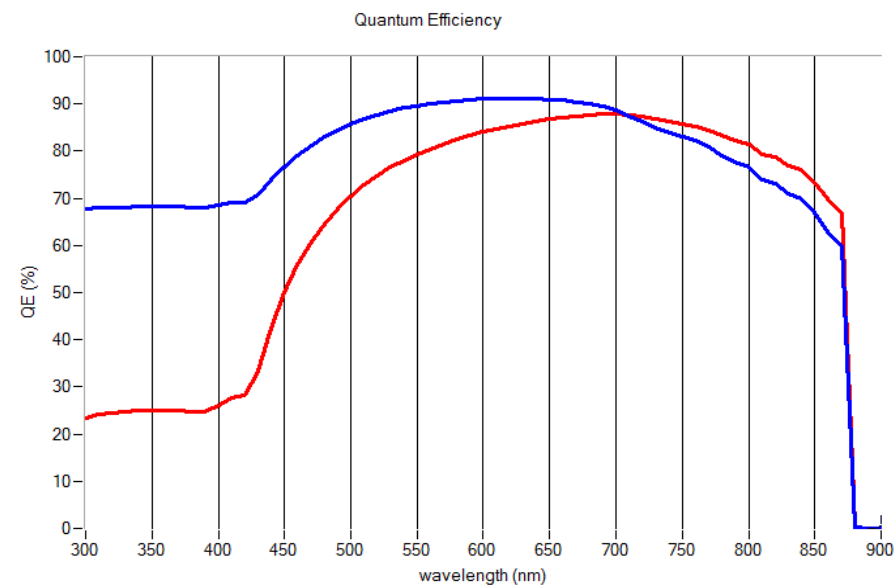


Figure III.14: Rendement quantique de l'effet des défauts sur la cellule solaire p^+/n (Bleu) et n^+/p (Rouge).

La cellule p^+/n présente un rendement de 17.30%, pour un émetteur de $0.1\mu\text{m}$ d'épaisseur et de dopage de 10^{18} cm^{-3} et un collecteur de $1.5\mu\text{m}$ avec un dopage de 10^{16} cm^{-3} . Ces dopages et épaisseurs constituent également les paramètres de la cellule n^+/p mais son rendement est plus faible, 15.54%. Ceci est dû au fait que dans la cellule n^+/p les porteurs minoritaires injectés depuis la région n vers la région p sont les trous qui ont une mobilité plus faible que celle des électrons dans la cellule p^+/n .

Ceci s'explique par le fait que dans la jonction n-p les porteurs minoritaires générés dans l'émetteur sont les trous qui ont une mobilité inférieure à celle des électrons, générés comme des porteurs minoritaires dans l'émetteur de la jonction p-n. Par conséquent, les trous sont moins mobiles que les électrons et plus exposés à la recombinaison.

Pour la réponse spectrale, elle est sensible à l'épaisseur de l'émetteur pour les longueurs d'onde courtes. Plus l'émetteur est épais, il y aura plus de recombinaison des minoritaires avec les majoritaires, puisque ils doivent parcourir une distance plus longue pour atteindre la jonction.

III.5 Effet de la densité des défauts :

Dans cette section on fait varier la densité des défauts. N_R est augmentée de 10^{14} à 10^{16} cm^{-3} . L'effet de ceci sur les paramètres externes de la cellule est donné dans le tableau III.7. Dans le but de détailler les résultats du tableau III.7, nous avons tracés la caractéristique électrique J-V (figure III.15) et leur réponse spectrale (figure III.16).

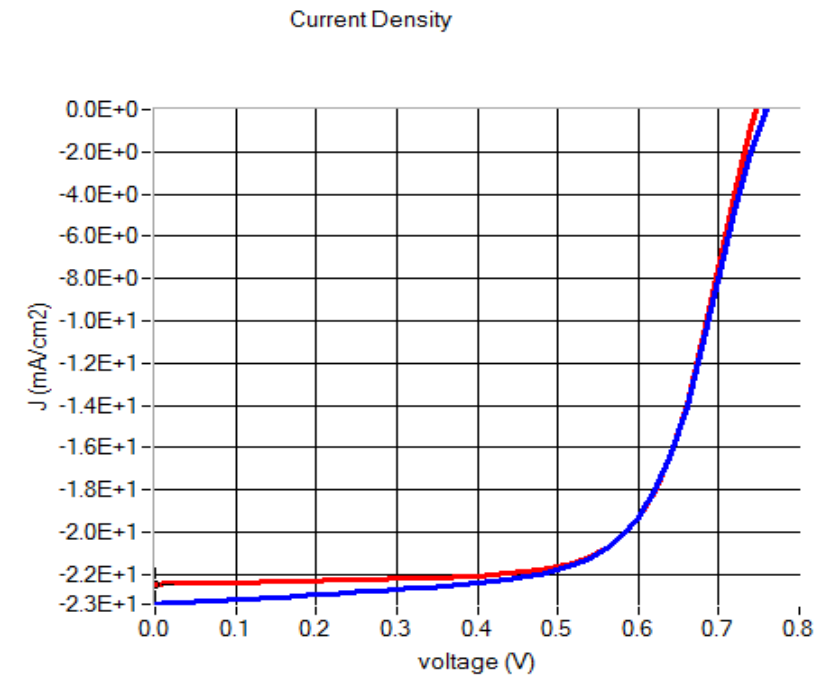


Figure III.15: La caractéristique J-V d'effet de la densité des défauts ($1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) sur la cellule solaire p^+/n (Bleu) et n^+/p (Rouge).

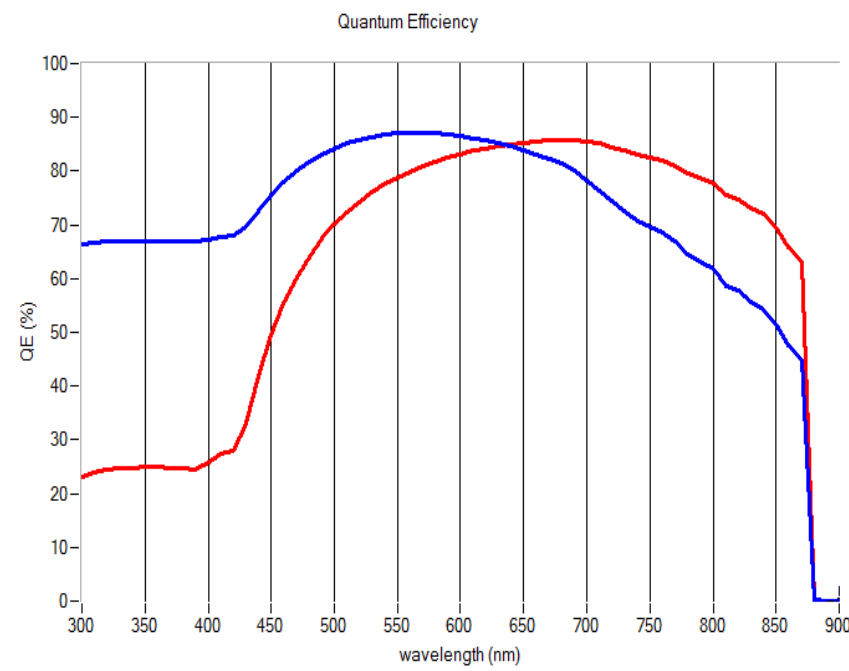


Figure III.16: Rendement quantique d'effet de la densité des défauts ($1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) sur la cellule solaire p^+/n (Bleu) et n^+/p (Rouge).

La densité des défauts (cm ⁻³)	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF (%)	η (%)
La cellule p ⁺ /n en GaAs				
1x10 ¹⁴	25.465970	0.8534	79.62	17.30
1x10 ¹⁶	23.42128	0.7602	65.74	11.71
La cellule n ⁺ /p en GaAs				
1x10 ¹⁴	23.064956	0.8076	83.41	15.54
1x10 ¹⁶	22.463602	0.7462	69.76	11.69

Tableau III.7: Effet de la densité des défauts sur les paramètres de sortie de la cellule p⁺/n en GaAs et n⁺/p en GaAs.

D'après les résultats obtenus dans le tableau III.7, on remarque qu'avec l'augmentation de la densité des défauts, les paramètres externes de la cellule (p⁺/n et n⁺/p) diminuent, la tension de circuit ouvert Voc, le courant de court circuit Jsc, le facteur de forme FF et le rendement de conversion η. Le rendement de conversion est le paramètre le plus sensible, alors que le FF est le moins sensible. La diminution du courant de court circuit de 25.465970 mA/cm² à 23.42128 mA/cm² pour la cellule p⁺/n mais pour la cellule n⁺/p la diminution du courant de court circuit de 23.064956 mA/cm² à 22.463602 mA/cm², puisque la densité du courant est proportionnelle à la différence entre le taux de génération et le taux de recombinaison $J \propto \int (G - U) dx$. Alors que la diminution de Jsc est due à l'augmentation de la recombinaison, liée à l'augmentation de la densité des défauts.

Si on compare les résultats de deux cellules p⁺/n et n⁺/p on observe que les paramètres externes de la cellule p⁺/n est le moins diminuée que la cellule n⁺/p, donc on peut dire que le rendement de la cellule p⁺/n est plus grand que la cellule n⁺/p. on distingue que la cellule n⁺/p est le plus sensible à l'irradiation à électrons que la cellule p⁺/n.

III.6 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous venons de présenter les résultats numériques de la simulation par logiciel SCAPS du comportement électrique de deux cellules solaires en GaAs p^+/n et n^+/p , nous avons présenté l'effet des défauts et la densité des défauts des irradiations électrons, sur la caractéristique (J-V) et la réponse spectrale de deux cellules solaires en GaAs p^+/n et n^+/p et on a fait une comparaison entre les résultats obtenus.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Cette étude nous a permis d'examiner les paramètres externes de deux cellules solaires p^+/n et n^+/p irradié par l'irradiation à électrons telles que : la densité de courant, la tension de circuit ouvert, le facteur de remplissage et le rendement, et étudier, par la suite, la caractéristique $J-V$ et la réponse spectrale et leur dépendance avec les paramètres suivants qui peuvent avoir un effet sur ces caractéristiques.

Avec l'augmentation de la densité des défauts, les paramètres externes de la cellule (p^+/n et n^+/p) diminuent. Le rendement de conversion est le paramètre le plus sensible, alors que le FF est le moins sensible. La diminution du courant de court circuit de 25.465970 mA/cm² à 23.42128 mA/cm² pour la cellule p-n mais pour la cellule n-p la diminution du courant de court circuit de 23.064956 mA/cm² à 22.463602mA/cm² . Alors que la diminution de J_{sc} est due à l'augmentation de la recombinaison, liée à l'augmentation de la densité des défauts.

Si on compare les résultats de deux cellules p^+/n et n^+/p on résulte que :

- les paramètres externes de la cellule p^+/n est le moins diminué que la cellule n^+/p .
- le rendement de la cellule p^+/n est le plus grand que la cellule n^+/p .
- la cellule n^+/p est le plus sensible au l'irradiation à électrons.

Références

- [1] P.D.Demoulia, “The physics and modeling of gallium arsenide solar cells”,PH.D,purdue University,1988.
- [2] Key world energy statistics 2009, IEA (International Energy Agency)...Disponible Sur http://www.iea.org/textbase/npdf/free/2009/key_stas_2009.pdf,2009
- [3] Anne labouret et al : cellules solaires : les bases de l'énergie photovoltaïque, collection ETSF, Dunod, 4e édition, 2005.
- [4] Cohen, J. D. (1984), Semiconductors and Semimetals, Pankove, J. I. ed. (Academic Press, Orlando), Vol. 21C, Chapter 2.
- [5] Mahawaela, Development of high band gap high efficiency photovoltaïque device, PH.D thesis, University of south Florida, June 24, 2004.
- [6] A. Labouret, P. Cumunel, J. P. Braun et B. Faraggi, Cellules solaires les bases de l'énergie photovoltaïque, 5^{ème} édition, paris, 2010.
- [7] C.B.Honsberg, “Design and fabrication of thin light-trapped GaAs solar cells”,PH.D thesis,Univercity of Delware,1992.
- [8] B.Equer, Energie solaire photovoltaïque,physique et technologie de la conversion photovoltaïque,volume1,Ellipses.
- [9] S.M.Sze, “Physics of semiconductor devices”,2nd Edition,John Wiley and Sons,NewYork,1982.
- [10] B.Equer, Energie solaire photovoltaïque,physique et technologie de la conversion photovoltaïque,volume 1,Ellipses.
- [11] Donald A.Neamen,Mc Graw-Hill, “Semiconductor physics and devices basic principles”,Third Edition,2003.
- [12] A.W.Bett,F.Dimroth,G.Stollwercla,O.V.Sulima,Appl.phys.lett.A.69,1999,119.
- [13] D.B.Jackrel, “INGAAs and GAINNAS(SB) 1064 NM Photodetectors and solar cells on GaAs Substrates”,PH.D,Stanford University,december 2005.
- [14] J.A.Carlin, “Investigation and development of high quality GaAs-ON-Si for space photovoltaïque Using a graded GeSi Buffer”,PH.D thesis,the ohio state University,2001.

Références

- [15] A.Crnatovic, "LPE grown GaAs_{1-x}P_x/GaP top cells for high-efficiency tandem solar cells", PH.D, University of Toronto, 1995.
- [16] S.Khelifi, "Modélisation d'une cellule solaire Ga_{1-x}Al_xAs(n)-GaAs(i)-GaAs(p)", mémoire de magister, Université de Béchar, 2003.
- [17] A.Martin Green, " Photovoltaic principles. Physica" E, 2002, Vol. 14, pp. 11-17.
- [18] C.B.Honsberg, "Desing and fabrication of thick light-trapped GaAs cells", PH.Dthesis, University of Delaware, 1992.
- [19] R.H.Parekh, A.M.Barnett, IEEE Transactions on electron devices Vol ED-31, No 5, 1984, P 577.
- [20] I. S-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled «Etude de la jonction PN d'un semi-conducteur l'équilibre thermodynamique ", Journal of Electron Devices, Vol. 5, 2007, Université de Mentouri- Constantine et l'Institut National des Sciences appliquées de Lyon.
- [21] J-P. Louineau : "guide pratique du solaire photovoltaïque, dimensionnement, installation, et maintenance", éditions systèmes solaires, 2e édition, 2005.
- [22] D.Lincot, "La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire", Découvertes 344-345 Janvier-Février 2007.
- [23] [15] H.Mathieu, Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, 3ed, Masson, Paris 1996.
- [24] S.Pagala, "Study of defects in technologically important III-V compound semiconductors", Master of science, B.tech, Kakatiya University, december 2005.
- [25] V. Gorge, Caractérisation de matériau et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V, PH.D thèse, Université paris-SUD 11, 2mai, 2012.
- [26] P. Würfel, Physics of solar cells from principles to new concepts, Wiley-VCH, 2005.
- [27] K.Olender and al, Native Deep-level defects in MBE-Grown p-type CdTe, ACTA Physica Plonica A, Vol 120, N^o 5, 201.
- [28] K.Djeriouat, Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonction GaInPGaAs, PH.M. thèse, Université Abou Bakr Belkaid telemcan, 2011.
- [29] Daniel Blanc, les rayonnements ionisants, Elsevier, Masson, 1999.
- [30] J. H. Warner, G. P. Summers, R. J. Walters, and S. R. Messenger, Energy dependence of majority carrier defect introduction rates in p+n GaAs photodiodes irradiated with protons, J. Appl. Phys. 96(2004) 7225-7228.

Références

- [31] D. E. Aspnes, S. M. Kelso, R. A. Logan, and R. Bhat, Optical properties of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, *J. Appl. Phys.* 60, 754 (1986).
- [32] S.M. Khanna, G.H. Yousefi, J.B. Webb and Z. Wasilewski, Comparison of Proton, Neutron and Electron Radiation-Induced Electron Traps in IM-GaAs Epilayers Studied by Deep Level Transient Spectroscopy, Defence research establishment ottawa technical memorandum dreotm, 1999.
- [33] Loo RY, Kamath GS, Li SS. Radiation damage and annealing in GaAs solar cells, *IEEE Trans Electron Dev* 1990, 37(2):85.
- [34] J.C. Bourgoin, M. Zazoui, Irradiation-induced degradation in solar cell: characterization of recombination centres, *Semicond. Sci. Technol.* 17 (2002) 453–60.
- [35] S. S. Li, W. L. Wang, Lai, and R. T. Owen, *J. Electron. Mater.* 9, 335 (1980).
- [36] M. Yamaguchi, Radiation-resistant solar cells for space use, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 68 (2001) 31-53.
- [37] Naïma Touafek, Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$, thèse de doctorat en Sciences en Electronique, Université Des Frères Mentouri – Constantine, 2015.
- [38] Yan XU, Fabrication et caractérisation des films CuInGaSe_2 par pulvérisation cathodique Etude des défauts par la spectroscopie des pièges profonds par la charge, thèse de doctorat, Université de nantes, 2014.
- [39] Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Stefaan Degrave, Johan Verschraegen, Koen Decock, SCAPS manual, Version 24 April 2012.

Résumé

Dans ce travail on a simulation numérique par logiciel SCAPS qui permet d' étudier de l'effet des défauts d'irradiations par des électrons énergétiques sur les paramètres électriques d'une cellule solaire en GaAs de type p^+/n et n^+/p .

Les paramètres externes de la cellule solaire sont : le courant de court circuit (J_{sc}), la tension du circuit ouvert (V_{oc}), le facteur de remplissage (FF) et le rendement η .

Les résultats obtenues par la simulation , montrent que l'augmentation de la densité des défauts, les paramètres externes de la cellule (p^+/n et n^+/p) diminuent , où la cellule n^+/p est le plus sensible au l'irradiation à électrons. Comme ils apparaissent que les paramètres externes de la cellule p^+/n est le moins diminue que la cellule n^+/p , ce qui rend leur rendement est le plus grand que la cellule n^+/p .

Mots de clé : Cellule solaire , Effet des défauts , Irradiation par des électrons énergétique , paramètre de cellule solaire

المخلص :

قمنا في هذا العمل بمحاكاة عددية بواسطة برنامج SCAPS تسمح بدراسة تأثير العيوب المتولدة بواسطة إشعاعات الإلكترونات الطاقوية على الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية ذات قاعدة GaAs من نوع p^+/n و n^+/p .

تتمثل الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية في : التيار الكهربائي للدائرة القصيرة J_{sc} ، جهد الدارة المفتوحة V_{oc} ، عامل التعبئة FF ، المردود η .

تظهر النتائج المتحصل عليها أن ارتفاع كثافة العيوب يؤدي إلى تناقص الوسائط الكهربائية للخليتين حيث تكون الخلية n^+/p أكثر تحسنا من الخلية p-n ، كما تظهر أن الوسائط الخارجية للخلية p^+/n أقل تناقصا من الوسائط للخلية n^+/p ، مما يجعل مردودها يكون أكثر بكثير من مردود الخلية n^+/p .

الكلمات المفتاحية : الخلية الشمسية ، تأثير العيوب ، الإشعاع بواسطة الإلكترونات الطاقوية ، وسائط الخلية الشمسية