



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences de la Matière

# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine des Sciences de la Matière  
Filière de Physique

Spécialité Physique énergétique et énergies renouvelables

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
Khineche nassima

Le : jeudi 27 juin 2019

## *Effet d'irradiation par des protons dans une cellule solaire en $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$*

---

### Jury :

Mme Himani Nadjette	M.A.A	Université Med Khider- Biskra	Président
Mme Laiadi widad	M.C.B	Université Med Khider- Biskra	Rapporteur
Melle Meftah Amjad	Pr	Université Med Khider- Biskra	Examineur

Année universitaire : 2018/2019



## Résumé

Nous avons étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire à base de (AlGaAs / GaAs/ Ge) de structure  $p^+nn^+$  sous éclairement AM0 par le logiciel de simulation SCAPS. Nous avons présenté les résultats de l'étude pour la cellule solaire ( $p^+ -Al_xGa_{1-x}As / p-GaAs / n^+-Ge$ ), les paramètres de la cellule externes diminuent, la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ), le facteur de forme ( $FF$ ) et le rendement de conversion ( $\eta$ ). Le rendement de conversion est le paramètre le plus sensible, alors que le FF est le moins sensible avec l'augmentation de la fluence des protons. Le courant de court-circuit diminue de  $30.10 \text{ mA/cm}^2$  à  $22.66 \text{ mA/cm}^2$ . Le rendement de conversion  $\eta$  de la cellule diminue de 25.19 % à 14.40 % est le paramètre le plus sensible. Pour la réponse spectrale sa sensibilité aux petites doses est toujours limitée dans la gamme des longueurs d'ondes grandes. L'allure dégradée de la réponse spectrale dans le cas de la présence uniquement des pièges profonds est semblable aux cas de présence de tous les pièges. Donc on estime que l'effet de la dégradation des performances de la cellule est dominé par la présence des pièges profonds à électrons considérés comme centres de recombinaison. D'après les résultats, nous avons constaté une générale amélioration dans les caractéristiques photovoltaïques de la cellule avec avec la diminution de l'épaisseur de la région de l'émetteur  $p^-GaAs$  de  $1 \mu m$  jusqu'à  $0.6 \mu m$ , notamment dans la densité de courant de court circuit ( $J_{sc}$ ), et le rendement de conversion photovoltaïque  $\eta$ . la densité de courant de court circuit  $J_{sc}$  s'améliore de  $J_{sc} = 22.66 \text{ mA/cm}^2$  à  $J_{sc} = 27.78 \text{ mA/cm}^2$  et le rendement de conversion photovoltaïque  $\eta$  s'améliore de 14.4 % à 18.01 %. La valeur de dopage de la région  $p^-GaAs$  qui permet de diminuer l'effet d'irradiation par des protons est  $N_a = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  pour améliorer les caractéristiques photovoltaïques de la cellule.

## *Dédicaces*

*A mes triée chers parents*

*A mon professeur Laiadi widad*

*A mes frères et sœurs*

*A toute ma famille*

*A Toute mes Camarades*

*A mes amis au travail*

*A tous ces que je connaisse et qui me  
sont chers Je dédie ce travail.*

## *Remerciements*

*Je remercie Dieu tout puissant de  
m' avoir accordé la volonté et le courage  
pour réaliser ce mémoire.*

*Je tiens à exprimer mon encadreur*

*Mme Laiadi widad*

*Maître de conférences (M. C. B) à*

*l' université de Biskra, pour*

*sa patience et ces précieux conseils.*

*Je remercie cordialement Mme Himani*

*Nadjette, Maître de conférences*

*(M. C. A) à l' université de Biskra,*

*d'avoir accepté de présider et juger  
cette thèse.*

*Mes remerciements s'adressent  
également à Melle Meftah Amjad,  
professeur à l'université de Biskra  
pour l'honneur qu'elles nous ont fait en  
acceptant de juger la thèse.  
J'adresse également mes remerciements à  
tous les membres du Laboratoire des  
Matériaux Semiconducteurs et  
Métalliques (LMSM), mes  
enseignants du département de  
Physique, et mes collègues*

# Sommaire

Résumé

Dédicace

Remerciements

Sommaire I

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction générale.....12

## Chapitre I : Notion générale sur Le rayonnement solaire

I.1 Introduction.....15

I.2 Soleil..... 15

I.3 Le rayonnement solaire.....15

I.4 Différents types de rayonnement.....16

I.4.1 Rayonnement ionisant .....16

I.4.2 Rayonnement non-ionisant.....16

I.5 Caractéristiques de rayonnement solaire.....17

I.6 Le spectre solaire.....18

I.7 Génération et recombinaison des porteurs de charges.....19

I.7.1 Génération de porteurs..... 19

I.7.2 Recombinaison de porteurs en excès.....20

I.8 L'irradiation par des protons.....21

I.9 Les défauts profonds.....23

I.9.1 Caractéristiques des défauts profonds.....23

I.10 Conclusion.....25

## Chapitre II : Les cellules solaires à base de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ge}$

II.1 Introduction.....27

II.2 Type des semi-conducteurs.....27

II.2.1 Semi-conducteur intrinsèque.....28

## ***Sommaire***

II.2.2 Semi-conducteur extrinsèque.....	29
II.2.2.1 Semi-conducteur dopé n.....	29
II.2.2.2 Semi-conducteur dopé p.....	30
II.3 Le Germanium Ge.....	30
II.3.1 Structure cristalline diamant de Germanium (Ge).....	31
II.3.2 Structure de bande d'énergie de Germanium (Ge).....	32
II.4 Les composés binaires GaAs.....	33
II.4.1 L'Arsenic de Gallium (GaAs).....	34
II.4.1.1 Structure cristalline de GaAs .....	35
II.4.1.2 Structure de bande d'énergie de GaAs.....	35
II.4.2 Les composés ternaires $Al_xGa_{1-x}As$ .....	36
II.5 La jonction P-N.....	37
II.6 Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque.....	38
II.7 Hétérojonctions.....	39
II.8 Structure de bande et mécanisme de transport des porteurs d'une cellule solaire tri-jonction.....	41
II.9 Conclusion.....	42
<b>Chapitre III : Simulation numérique de la cellule solaire <math>Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge</math> par logiciel SCAPS</b>	
III.1 Introduction.....	44
III.2 Utilisation de SCAPS.....	44
III.2.1 Notion de base.....	44
III.2.2 Définir le problème.....	46
III.2.3 Ajout de défauts.....	47
III.2.4 Les courbes (I-V) sous éclairement.....	50
III.3 La cellule solaire $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$ .....	51
III.3.1 La structure de la cellule solaire $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$ .....	51
III.3.2 L'effet de la fluence d'irradiation .....	54
III.3.3 L'effet d'énergie d'activation.....	57
III.3.4 L'effet de l'épaisseur de l'émetteur (région p+-GaAs).....	59
III.3.5 L'effet du dopage de l'émetteur (région p+-GaAs).....	61
III.4 Conclusion.....	63
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>65</b>



# *Sommaire*

Références.....67

## *Liste des figures*

<b>Figure I.1 :</b> Le rayonnement solaire .....	16
<b>Figure I.2 :</b> Spectre solaire.....	19
<b>Figure I.3 :</b> (a) Recombinaison directe et (b) Recombinaison indirecte.....	21
<b>Figure I.4 :</b> Recombinaison directe radiative.....	21
<b>Figure I.5 :</b> Schéma illustrant l'émission et la capture d'électrons et de trous.....	24
<b>Figure II.1 :</b> Structure cristalline diamant.....	32
<b>Figure II.2 :</b> Structure de bande du Ge.....	33
<b>Figure II.3 :</b> Structure cristalline du GaAs, liaison tétraédrique de la structure Zinc-blende.....	35
<b>Figure II.4 :</b> Structure de bande du GaAs.....	36
<b>Figure II.5 :</b> Structure du GaAs, elle se compose de deux sous réseaux cubiques à faces centrées, décalés d'un quart de la grande diagonale du cube, et occupés l'un par l'anion (As), et l'autre par le cation (Al,Ga).....	37
<b>Figure II.6 :</b> Structure de la jonction P-N.....	38
<b>Figure II.7 :</b> Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	39
<b>Figure II.8 :</b> Diagrammes schématiques montrant deux types différents d'hétérojonction.....	40
<b>Figure II.9 :</b> Diagramme de bandes d'énergie simplifié d'une cellule solaire tri-jonction.....	41
<b>Figure III.1 :</b> Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.....	45
<b>Figure III.2 :</b> Définir le problème.....	46
<b>Figure III.3 :</b> Ajout des défauts.....	48
<b>Figure III.4 :</b> Le panneau de propriétés de défauts.....	49
<b>Figure III.5 :</b> Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclaircissement.....	50
<b>Figure III.6 :</b> La structure de la cellule solaire $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$ ( $p^+/n/n^+$ ).....	51
<b>Figure III.7:</b> Diagramme d'énergie de la cellule solaire $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$ ( $p^+/n/n^+$ ) à l'équilibre thermodynamique.....	52
<b>Figure III.8 :</b> (a) Caractéristique courant-tension, (b) Rendement quantique de la cellule solaire $p^+/n/n^+$ en $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$ avant l'irradiation.....	54

<b>Figure III.9 :</b> (a) Caractéristique courant-tension, (b) Rendements quantiques de la cellule solaire $p^+/n/n^+$ en $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$ sous éclairement AM0 pour différentes fluence des protons.....	55
<b>Figure III.10 :</b> Effet de la fluence des protons sur les paramètres de sortie de la cellule solaire $p^+/n/n^+$ en $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$ .....	56
<b>Figure III.11 :</b> (a) Caractéristique courant-tension, (b) Rendements quantiques de la cellule solaire $p^+/n/n^+$ en $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$ sous éclairement AM0 pour différentes énergies d'activation.....	58
<b>Figure III.12 :</b> (a) Caractéristique courant-tension, (b) Rendements quantiques de la cellule solaire $p^+/n/n^+$ en $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$ sous éclairement AM0 pour différentes valeurs de l'épaisseur de la région $p^+-GaAs$ .....	60
<b>Figure III.13 :</b> (a) Caractéristique courant-tension, (b) Rendements quantiques de la cellule solaire $p^+/n/n^+$ en $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$ sous éclairement AM0 pour différentes valeurs de dopage de la région $p^+-GaAs$ .....	62

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau I.1</b> : Paramètres des défauts caractérisés par.....	23
<b>Tableau II.1</b> : Bande interdite, concentration intrinsèque des porteurs, densité effective de la bande de conduction et la bande de valence à $T = 300 \text{ K}^\circ$ pour différents semi-conducteurs.....	29
<b>Tableau II.2</b> : Paramètres des principaux composés binaires III-V.....	34
<b>Tableau III.1</b> : Paramètres d'entrée du matériau dans le logiciel de simulation SCAPS.....	52
<b>Tableau III.2</b> : Dopage et épaisseurs des régions de la cellule solaire $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ge}$ ( $p^+/n/n^+$ ) dont l'épaisseur totale est $4.53 \mu\text{m}$ .....	53
<b>Tableau III.3</b> : Grandeurs photovoltaïques des cellules solaires à base de GaAs (a) National Renewable Energy Laboratory (USA). (b) Fraunhofer Institute for Solar Energy System (Allemagne).....	54
<b>Tableau III.4</b> : Paramètres photovoltaïques de la cellule ( $p^+-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / n- \text{GaAs} / n^+-\text{Ge}$ ) pour différentes fluence des protons.....	56
<b>Tableau III.5</b> : Paramètres photovoltaïques de la cellule ( $p^+-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / n- \text{GaAs} / n^+-\text{Ge}$ ) pour différentes énergies d'activation.....	59
<b>Tableau III.6</b> : Paramètres photovoltaïques de la cellule ( $p^+-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / n- \text{GaAs} / n^+-\text{Ge}$ ) pour différentes valeurs de l'épaisseur de la région $p^+-\text{GaAs}$ .....	61
<b>Tableau III.7</b> : Paramètres photovoltaïques de la cellule ( $p^+-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / n- \text{GaAs} / n^+-\text{Ge}$ ) pour différentes valeurs de dopage de la région $p^+-\text{GaAs}$ .....	63

# *Introduction générale*

## *Introduction générale*

### **Introduction générale**

Pour tous les pays, les télécommunications sont une priorité incontournable. Les rapides développements de la recherche et de l'industrialisation ont permis à un large public d'accéder aux moyens modernes de communication. Les applications civiles telles que les télécommunications par satellites, les téléphones mobiles, l'automobile avec le radar anticollision, les transmissions de données connaissent un essor rapide grâce à la maîtrise des techniques à mettre en œuvre.

Les cellules solaires sont des dispositifs à semi-conducteur qui transfèrent la lumière en énergie électrique utilisable. Ces dispositifs ont été initialement étudiés dès 1839 par Antoine César Becquerel qui a remarqué que si la lumière brille sur des diodes cela induit un courant électrique. Cependant, une cellule solaire relativement efficace générant une quantité raisonnable de puissance n'a pas été créée jusqu'en 1954, lorsque Chapin, Fuller et Pearson ont développé une cellule solaire à base de silicium pour les laboratoires Bell (Bell Labs). Depuis la création de la première cellule solaire rentable, la recherche sur la technologie et l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires a augmenté rapidement. L'accent mis récemment sur l'utilisation des énergies renouvelables et le besoin de puissance dans les régions éloignées telles que l'espace a mis cette recherche dans le premier rang [1].

Les cellules solaires à base de GaAs ont des avantages significatifs supplémentaires. En comparaison avec les cellules solaires en silicium, Le GaAs possède des propriétés électroniques qui sont supérieures à celles du silicium. La vitesse de saturation des électrons est plus élevée et leur mobilité est une plus grande. Relativement aux cellules de silicium, un autre avantage de GaAs est dans le fait qu'il présente un gap d'énergie direct, ce qui signifie qu'il peut être utilisé pour émettre de la lumière de façon efficace. Un problème important s'opposait au développement des cellules solaires au GaAs, est celui de la vitesse de recombinaison en surface [2]. Ce problème a été réduit grâce à la croissance d'une couche de  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sur la surface du GaAs. Cette couche a été utilisée pour passiver la surface avant des cellules. Les deux matériaux ayant des paramètres cristallins voisins, peu de défauts et de centres de recombinaison peuvent exister à l'interface entre les deux semi-conducteurs. C'est ainsi que le rendement des cellules à base de GaAs a

## *Introduction générale*

dépassé pour la première fois 20% vers la fin des années 70 quand Woodall et Hovel ont fabriqué des cellules aux hétéro-structures avec un rendement de 22% [3].

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 [4]. 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].

Le premier chapitre présente des notions générales sur Notion générale sur Le rayonnement solaire. Le deuxième chapitre présente les cellules solaires à base de  $\text{Al}_x\text{G}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ge}$ . Le troisième chapitre est consacré à la description et l'application du logiciel de simulation SCAPS et présente une description détaillée des conditions et de cellule étudiée et résultats essentiels aboutis de cette étude.

*Chapitre I : Notion générale sur Le  
rayonnement solaire*



**I.1 Introduction**

Toutes les énergies renouvelables sont issues, directement ou indirectement du soleil. Le rayonnement direct de cette étoile peut être utilisé de deux manières : Energie solaire thermique : qui représente la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique ; transformation utilisée directement pour chauffer un bâtiment par exemple ou indirectement pour la production de vapeur d'eau dans l'entraînement des turboalternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique. Des rendements élevés peuvent être atteints. En revanche l'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques [5]. Nous consacrons ce chapitre aux généralités et notions fondamentales sur le rayonnement solaire.

**I.2 Soleil :**

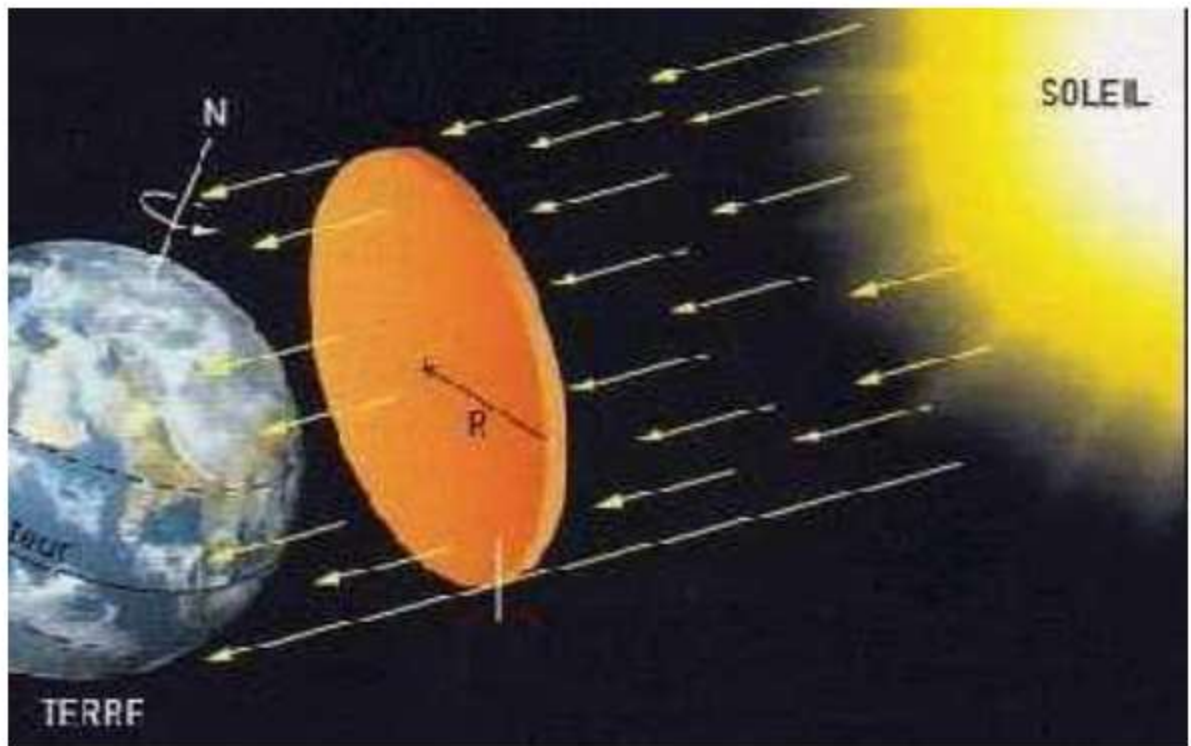
Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé de 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tout les éléments chimiques (figure n°1). Il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre [6].

**I.3 Le rayonnement solaire:**

Le terme rayonnement désigne le processus de transfert d'énergie impliquant une particule porteuse. Selon la nature électrique de cette dernière, deux classes se présentent: les particules chargées et les particules neutres. Le rayonnement chargé inclus les électrons et les particules lourdes chargées alors que pour le rayonnement neutre, on retrouve les photons (rayonnement électromagnétique) et les neutrons [7]. Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10

$$E=h\nu=hc/\lambda \quad (I.1)$$

$h$  : Constante de Planck,  $c$  : La vitesse de la lumière, et  $\lambda$  : La longueur d'onde.



**Figure I.1 :** Le rayonnement solaire

#### **I.4 Différents types de rayonnement :**

##### **I.4.1 Rayonnement ionisant:**

Un rayonnement ionisant est un rayonnement capable de déposer assez d'énergie dans la matière qu'il traverse pour créer une ionisation. L'ionisation est l'action qui consiste à enlever ou ajouter des charges à un atome ou une molécule. L'atome - ou la molécule - perdant ou gagnant des charges n'est plus neutre électriquement [8].

##### **I.4.2 Rayonnement non-ionisant:**

Un rayonnement non-ionisant désigne un type de rayonnement pour lequel l'énergie électromagnétique transportée par chaque quantum est insuffisante pour provoquer l'ionisation d'atomes ou de molécules. Ces radiations peuvent cependant avoir suffisamment d'énergie pour provoquer le passage d'un électron sur un niveau d'énergie

plus élevé. Parmi les rayonnements non-ionisants, on compte les rayonnements du proche ultraviolet, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes, les ondes radio et les champs statiques.

**I.5 Caractéristiques de rayonnement solaire :****a) Energie renouvelable :**

L'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Outre, l'apport direct sous forme de lumière et de chaleur, l'énergie est émise dans l'espace par la surface du soleil, notamment sous forme d'ondes électromagnétique (lumière). Les seules ressources énergétiques non solaires sont la chaleur de la terre (géothermie), les marées, l'énergie nucléaire, le vent, la biomasse... etc [9].

**b) Le rôle de l'atmosphère :**

Les couches atmosphériques modifient profondément la distribution spectrale du rayonnement solaire laquelle subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite des phénomènes complexes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols (les aérosols seront définis ultérieurement). Ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge [10].

**c) La masse d'air :**

Le rayonnement solaire est partiellement absorbé lors de son passage à travers l'atmosphère. L'absorption est presque entièrement causée par des gaz de faible concentration dans la région infrarouge du spectre solaire, ces gaz sont la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), les fluorocarbures, ainsi que la poussière et, dans la région ultraviolette du spectre, Par l'ozone et l'oxygène. L'absorption augmente évidemment avec la longueur du trajet à travers l'atmosphère et donc avec la masse d'air à travers laquelle le rayonnement passe. Pour une épaisseur  $l_0$  de l'atmosphère, la longueur du trajet  $l$  dans l'atmosphère du rayonnement incident du soleil à un angle  $\alpha$  par rapport à la normale de la surface de la terre [11].

## I.6 Le spectre solaire :

La lumière solaire est composée de toutes sortes de rayonnements, de couleurs différentes, caractérisées par différentes longueurs d'onde. Des photons; grains de lumière composent ce rayonnement électromagnétique. En 1924, Louis de Broglie a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules (photons) et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde. Le rayonnement émis par le soleil correspond à celui du corps noir à la température de 6000 °C. L'intensité du rayonnement au dessus de l'atmosphère est de 1.35 kW/m<sup>2</sup> , 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/m<sup>2</sup> 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. Pour mesurer l'effet de l'atmosphère on utilise l'air masse, défini par  $AM=1/\cos \alpha$  ou  $\alpha$  représente l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale. AM0 est utilisé pour préciser les conditions au dessus de l'atmosphère. AM 1.5 étant celui atteignant le sol par temps clair (surface d'un mètre carré faisant un angle de 48° avec l'équateur). De plus, on distingue les spectres AM1.5D et AM1.5G qui correspondent respectivement au flux direct et au flux global (direct et diffus). La figure I.2 donne ces spectres. Elle indique quelques semi-conducteurs utilisés pour les applications photovoltaïques ainsi que leurs énergies de gap  $E_g$  correspondantes [12].

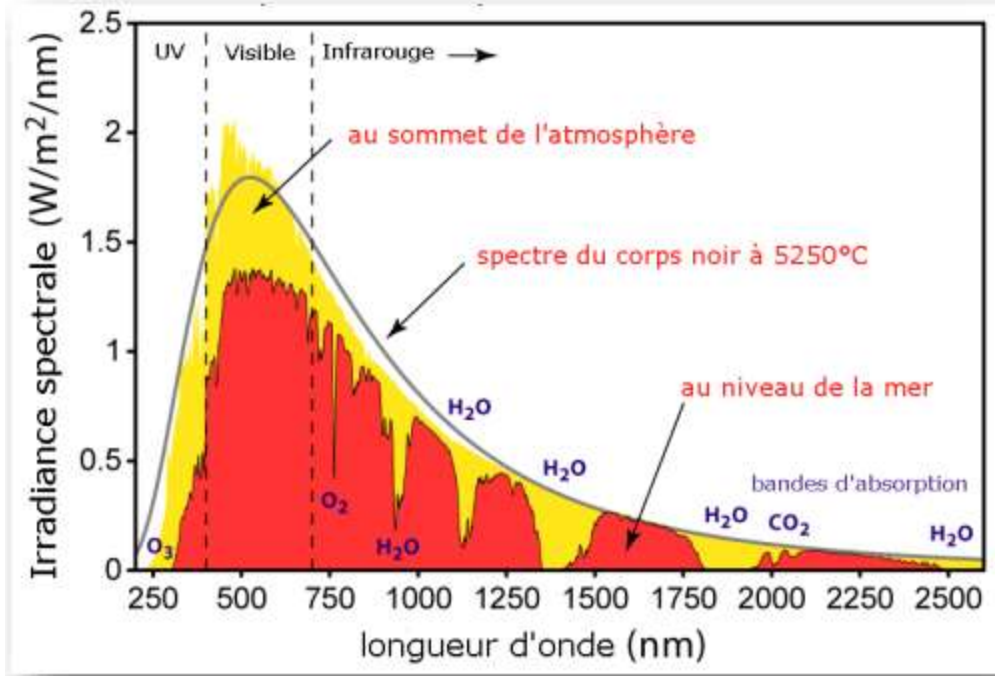


Figure I.2 : Spectre solaire.

### I.7 Génération et recombinaison des porteurs de charges :

Lorsqu'il y a dans la bande de conduction et dans la bande de valence un excès d'électrons libres et de trous libres par rapport aux concentrations d'équilibre thermique, différents processus tendent à ramener le système vers son état d'équilibre. Ces processus sont traduits dans les équations de conservation par les termes  $G$  et  $R$ , qui caractérisent la création (génération) et la disparition (recombinaison) des porteurs dans un semi-conducteur [13].

#### I.7.1 Génération de porteurs :

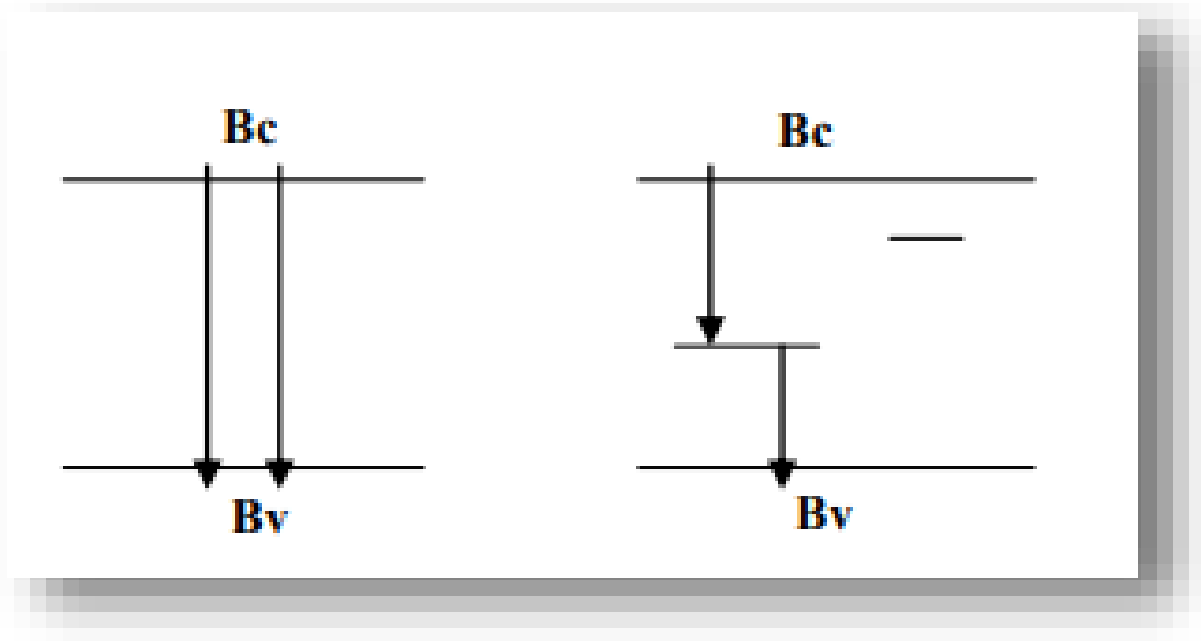
Les électrons et les trous sont produits par des procédés qui peuvent fournir au moins l'énergie minimum de génération d'une paire électron-trou. Cela comprend l'ionisation par impact, dans lequel un électron (ou un trou) avec une énergie cinétique suffisante frappe un électron lié (dans la bande de valence) hors de son état lié et le favorise à un état dans la bande de conduction, en créant ainsi un électron et un trou. Le même processus pour exciter un électron de la bande de valence à la bande de conduction peut se faire avec une vibration du réseau géant fournissant l'énergie, ou par l'absorption d'un photon. En présence d'impuretés

fournissant des états d'énergies dans le gap d'énergie, l'excitation peut se dérouler en plusieurs étapes et l'énergie générée peut être fournie en portions plus petites par des phonons ou même des photons [14].

Quand on expose un matériau semi-conducteur à une excitation extérieure, on génère des paires supplémentaire (é, o) dans ce matériau : on a un peuplement de plus dans les bandes Bc et Bv, c'est la génération de porteurs de charges, ce phénomène est caractérisé par un taux de génération (ou vitesse de génération).

### **I.7.2 Recombinaison de porteurs en excès :**

Quand on coupe l'excitation extérieure, le semi-conducteur tente de revenir à son état initial d'équilibre par la recombinaison des porteurs en excès (ou annihilation). La recombinaison de porteurs de charges est alors une opération qui ramène des é de la Bc à la Bv. On distingue plusieurs sortes de recombinaison : la recombinaison directe, l'é libre retombe directement de Bc dans Bv et la recombinaison indirecte, qui s'effectue par l'intermédiaire de niveaux localisés dans la bande Bi, figure I.3.(a) et (b) Ces recombinaisons peuvent ou non s'accompagner d'émissions radiatives, on parle alors de recombinaisons radiatives et non radiatives.



(a)

(b)

Figure I.3 : (a) Recombinaison directe et (b) Recombinaison indirecte

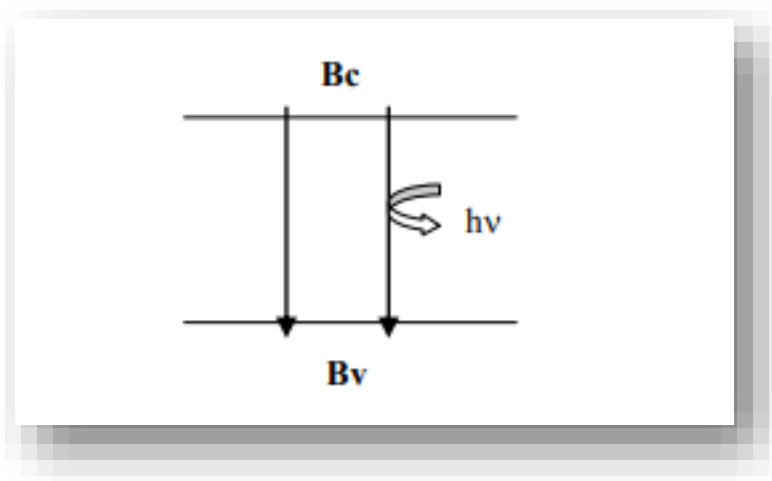


Figure I.4 : Recombinaison directe radiative.

### I.8 L'irradiation par des protons :

Les particules les plus utilisées comme source d'irradiations sont les neutrons et les protons pour simuler respectivement l'environnement nucléaire civil et l'environnement spatial. En ce qui concerne les applications spatiales, les protons sont préférés aux électrons car leur pouvoir de pénétration est plus élevé, ils sont par conséquent moins susceptibles d'être stoppés par le blindage du satellite [15]. Pour l'irradiation par des protons, la profondeur de pénétration est liée à l'énergie des protons. Contrairement aux électrons, le bombardement par des protons génère des endommagements non uniformes dans le matériau, et la majorité des dommages sont produits près de la fin du parcours des protons. Par conséquent, la nature des dommages par l'irradiation des protons est déterminée en grande partie par la profondeur de pénétration des protons dans la cellule solaire [16]. Par exemple, dans une cellule solaire en GaAs, les protons de faible énergie (inférieures à 300  $KeV$ ) sont arrêtés dans la région active de la cellule, alors que les protons de haute énergie (supérieures à 1  $MeV$ ) vont pénétrer dans la totalité de la cellule solaire [16]. En plus, il a été avancé que le nombre des défauts de déplacement augmente avec la diminution relative de l'énergie de la particule. Dans un intervalle d'énergie des protons qui s'étend d'une centaine de  $keV$  à des centaines de  $MeV$ , la contribution des protons d'énergie  $< 1 MeV$  dans la création des défauts pourrait être très importante [17]. Les études des effets des protons ne se faisaient pas indépendamment de celles des électrons, presque dans plusieurs travaux, on trouvait ces deux axes s'accompagné dans la même étude. Les premières études de l'effet des protons datent également des débuts des années 80. La relation entre la profondeur de pénétration des protons et la création des défauts ainsi que le fait que les protons de basse énergie (centaines de  $KeV$ ) sont plus efficaces, a été confirmés sur la base d'observations expérimentales effectuées par R Y loo et al à la fin des années 70 et les débuts des années 80 [18, 19]. Les défauts introduits par l'irradiation des protons et utiliser dans ce travail sont résumés dans le tableau suivant :



**Tableau I.1** : Paramètres des défauts caractérisés par [18]

Défauts	$E(eV)$	$\sigma_{ccs}(cm^2)$
<b>PR1</b>	0.781	$1.0 \times 10^{-12}$
<b>PR2</b>	0.649	$3.4 \times 10^{-12}$
<b>PR3</b>	0.392	$3.3 \times 10^{-17}$
<b>PR4'</b>	0.364	$7.6 \times 10^{-14}$
<b>PR4''</b>	0.303	$8.2 \times 10^{-16}$
<b>PR5</b>	0.095	$7.7 \times 10^{-16}$
<b>PH1</b>	0.090	$3.1 \times 10^{-19}$
<b>PH2</b>	0.213	$2.6 \times 10^{-18}$
<b>PH3</b>	0.355	$1.6 \times 10^{-16}$
<b>PH4</b>	0.422	$2.7 \times 10^{-16}$
<b>PH5</b>	0.544	$4.8 \times 10^{-17}$

### I.9 Les défauts profonds :

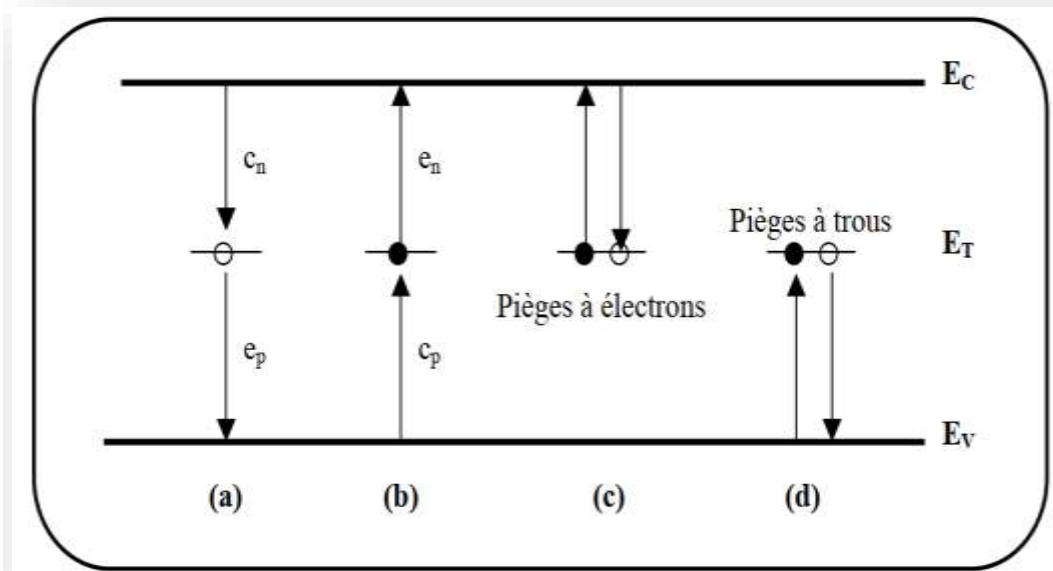
Les niveaux profonds sont dus à la présence d'impuretés, substitutionnelles ou interstitielles, ou de défauts, ponctuels ou étendus (dislocation), dans le réseau cristallin. Ces niveaux d'énergie, proches du centre de la bande interdite, sont associés à des états qui peuvent être localisés en surface, en volume ou aux interfaces de la structure à analyser.

#### I.9.1 Caractéristiques des défauts profonds :

Ces défauts peuvent être ponctuels (des lacunes, des atomes interstitiels, des antisites dans les semiconducteurs composés), des impuretés en site substitutionnel ou interstitiel (des métaux de transition: Fe, Cr, Co, etc.), des complexes impuretés défaut de réseau ou des défauts étendus (dislocations, fautes d'empilement). Ces défauts peuvent s'introduire dans la structure lors de la croissance du matériau (contamination dans la chambre de croissance, la pureté des produits de base), pendant les processus de réalisation du composant (gravures des couches, expositions au plasma) ou même au cours du fonctionnement du composant (vieillessement des lasers). Deux mécanismes principaux qui contrôlent les processus de

recombinaison sont observés dans les semiconducteurs [20]. Le premier, c'est la recombinaison directe entre la bande de conduction (BC) et la bande de valence (BV) accompagnée par l'émission de photons et de phonons. Le deuxième, c'est la recombinaison indirecte par un niveau dans la bande interdite (BI) (figure. I.3 (b)). Les niveaux profonds sont très localisés dans l'espace réel ( $\Delta x$  très faible), ce qui induit une grande délocalisation dans l'espace des vecteurs d'onde "k" ( $\Delta k$  très grand). Ils pourront donc interagir avec des porteurs des deux bandes et ainsi agir en centre de recombinaison indirecte [20].

Un défaut profond dans un semiconducteur peut se comporter comme un piège, comme un centre de recombinaison ou comme centre de génération. Si un porteur est piégé sur un niveau et si après un temps de piégeage il est réémis vers la bande de provenance, le défaut est considéré un piège. Si un porteur de signe opposé est aussi capturé avant que le premier soit réémis, le niveau est un centre de recombinaison. Les interactions possibles de ces niveaux profonds avec les porteurs libres sont (figure I.4) : capture d'un électron (a) ; émission d'un électron (b) ; Piège à électrons (c) ; Piège à trous (d) [20].



**Figure I.5 :** Schéma illustrant l'émission et la capture d'électrons et de trous [20].

Le processus d'émission dépend du taux d'émission ( $e_{n,p}$ ) et de la probabilité d'occupation du centre par un porteur libre, probabilité donnée par la statistique Fermi-Dirac à l'équilibre. Le processus de capture dépend du taux de capture ( $C_{n,p}$ ) propre au défaut et de la probabilité d'occupation du défaut par un porteur libre. Le trafic des électrons et de trous peut donc être décrit par les relations suivantes [20] :

- 1) émission des électrons :  $e_n \times N_T \times F$
- 2) capture des électrons :  $c_n \times N_T \times (1-F)$
- 3) émission des trous :  $e_p \times N_T \times (1-F)$
- 4) capture des trous :  $c_p \times N_T \times F$

Avec  $N_T$  la concentration totale des centres profonds et  $F$  la probabilité d'occupation d'un centre par un électron.

**I.10 Conclusion:**

Ce premier chapitre est une introduction sur les rayonnements solaires et les radiations par des protons. Des notions générales ont été présentées sur les types des rayonnements et le spectre solaire (hors atmosphère AM0 et dans l'atmosphère AM1, AM1.5). Nous avons présenté, par la suite, génération et recombinaison des porteurs de charges (génération de porteurs et recombinaison de porteurs en excès), à présent nous avons défini les défauts profonds et les caractéristiques des défauts profonds.

*Chapitre II : Les cellules solaires à base de  
 $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$*

**II.1 Introduction:**

La croissance importante du marché mondial des semiconducteurs est liée au fait que ces matériaux sont à l'origine de la révolution technologique de ces quarante dernières années dans le domaine de l'électronique. En effet, l'électronique représente à l'heure actuelle le marché mondial le plus important en volume ainsi que celui présentant la croissance la plus rapide. Le marché des semiconducteurs couvre des domaines industriels très divers tels que l'informatique, l'automobile, les applications spatiales et militaires, sans oublier bien entendu son rôle prépondérant dans les télécommunications.

Les semi-conducteurs ont pris une importance considérable dans notre société. Ils sont à la base de tous les composants électroniques et optoélectroniques utilisés dans les systèmes informatiques, la télécommunication, la télévision, les voitures et les appareils électroménagers, etc. Dans tous les matériaux semi-conducteurs, les composés III-V sont d'une classe bien définie avec des propriétés qui sont des sources d'intérêt en termes de connaissances et d'applications fondamentale. En effet, le GaAs est à gap direct ayant une largeur proche de la valeur idéale de 1.5 eV qui en résulte dans une efficacité maximale de conversion photovoltaïque assurée par une cellule solaire même à unique jonction. Des rendements de conversion autour de 25.7 % ont été atteints par de telle cellule au spectre AM1.5. Ce chapitre couvre des notions sur les matériaux semi-conducteurs en général et l'hétérojonction  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$ .

**II.2 Type des semi-conducteurs :**

Une manière commune de classer un matériel est par ses propriétés électriques. Selon le niveau de la résistivité d'un élément, elle peut être classée par catégorie comme isolateur, conducteur, ou semi-conducteur. La capacité de résister ou de conduire l'électricité d'un matériel dépend de beaucoup de facteurs; la structure de réseau, les électrons libres, l'énergie de bande interdite, et la température. Quelques matériaux ont des propriétés électriques très discrètes qui les définissent en tant qu'un isolateur ou conducteur. Cependant, d'autres matériaux tels que le silicium et l'arséniure de gallium peuvent agir en tant qu'isolateur ou conducteur et sont donc considérés des semi-conducteurs.

**II.2.1 Semi-conducteur intrinsèque :**

Un semi-conducteur dit intrinsèque est un matériau idéal ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique [21]. Dans un semi-conducteur intrinsèque la concentration des électrons est identique à la concentration des trous [22].

$$n = p = n_i \quad (\text{II.1})$$

A l'équilibre thermique, les densités totales d'électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence sont données par les expressions suivantes :

$$n = N_c \exp\left[\frac{E_F - E_c}{kT}\right] \quad \text{avec} \quad N_c = \frac{2}{h^3} [2\pi m_n kT]^{3/2} \quad (\text{II.2})$$

$$p = N_v \exp\left[\frac{E_v - E_F}{kT}\right] \quad \text{avec} \quad N_v = \frac{2}{h^3} [2\pi m_p kT]^{3/2} \quad (\text{II.3})$$

Où :  $N_c$  et  $N_v$  sont respectivement la densité effective d'états des électrons dans la bande de conduction et la densité effective d'états des trous dans la bande de valence

Dans un semi-conducteur intrinsèque la concentration des électrons est identique à la concentration des trous [22].

Le niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque  $n_i$  est obtenu en faisant  $n = p$ , par conséquent [23]

$$E_{F_i} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right) \quad (\text{II.4})$$

La concentration intrinsèque des porteurs de charge est donnée par [23] :

$$n_i^2 = n \cdot p = N_c N_v \exp\left[\frac{-E_g}{2kT}\right] \quad (\text{II.5})$$

**Tableau II.1 :** Bande interdite, concentration intrinsèque des porteurs, densité effective de la bande de conduction et la bande de valence à  $T = 300\text{ K}^\circ$  pour différents semi-conducteurs [24].

	$E_g$ (eV)	$n_i$ (cm <sup>-3</sup> )	$N_c$ (cm <sup>-3</sup> )	$N_v$ (cm <sup>-3</sup> )
InSb	0.18	$1.6 \times 10^{16}$		
InAs	0.36	$8.6 \times 10^{14}$		
Ge	0.67	$2.4 \times 10^{13}$	$1.04 \times 10^{19}$	$6.0 \times 10^{18}$
Si	1.124	$1.0 \times 10^{10}$	$7.28 \times 10^{19}$	$1.05 \times 10^{19}$
GaAs	1.43	$1.8 \times 10^6$	$4.35 \times 10^{17}$	$5.33 \times 10^{18}$
GaP	2.26	$2.7 \times 10^0$		
GaN	3.3	$\ll 1$		

### II.2.2 Semi-conducteur extrinsèque :

On peut modifier de façon considérable la concentration de porteurs de charge d'un semi-conducteur intrinsèque en lui ajoutant de faibles quantités d'atomes astucieusement choisis et que l'on appelle impuretés dopantes ou tout simplement dopants. On obtient alors un semi-conducteur extrinsèque ou dopé [25].

Selon la nature des atomes introduits, soit le nombre d'électrons devient très supérieur au nombre de trous et le semi-conducteur est appelé de type n, soit le nombre de trous devient très supérieur à celui des électrons et le semi-conducteur est appelé de type p [25].

#### II.2.2.1 Semi-conducteur dopé n :

Les atomes de silicium ou de germanium par exemple se cristallisent dans une structure où chaque atome est relié à 4 atomes voisins par des liaisons covalentes impliquant 2 électrons pour chaque liaison. Si on introduit un atome ayant 5 électrons de valence (phosphore, arsenic ou antimoine), cet atome prend la place d'un atome du cristal : 4 des électrons de l'impureté participeront aux 4 liaisons avec les 4 atomes voisins du cristal, le 5<sup>ème</sup> électron restera célibataire. A cet atome d'impureté est associé un niveau d'énergie appelé niveau donneur  $ND_d$  qui se situe juste en dessous de la bande de conduction. L'écart entre ce niveau et la bande de conduction étant faible, un électron d'un niveau donneur peut facilement.

passer dans la bande de conduction sous l'action de l'agitation thermique [26]. A température ambiante, presque toutes les impuretés sont ionisées et si la concentration en atomes donneurs est  $N_d$ , la densité de porteurs libres du semi-conducteur sera [21]:

$$n = n_0 + N_d \quad (\text{II.6})$$

### II.2.2.2 Semi-conducteur dopé p :

Si on introduit un atome d'impureté trivalent (bore, aluminium ou gallium), cet atome en se plaçant dans le réseau ne peut saturer que 3 liaisons sur 4. Il manque donc une liaison par atome d'impureté auquel correspond un niveau d'énergie situé juste au dessus de la bande de valence. Ce niveau est appelé niveau accepteur  $N_a$ . Au zéro absolu, ces niveaux accepteurs sont vides ; lorsqu'on augmente la température, ils peuvent être occupés par des électrons provenant de la bande de valence [26].

De la même façon que pour le semi-conducteur dopé n, la concentration en trous du semi-conducteur sera :

$$p = p_0 + N_a \quad (\text{II.7})$$

## II.3 Le Germanium Ge :

Un cristal peut être représenté à partir d'une cellule de base qui est répétée périodiquement, formant ainsi le réseau cristallin. Selon la nature des opérations de symétrie qui laissent la structure cristalline invariante, on est amené à définir sept systèmes cristallins, parmi lesquels le système cubique.

Le germanium, portant le numéro atomique 32, est un membre du groupe des cristallogènes. C'est un métalloïde semi-conducteur qui cristallise avec la même structure que le diamant, comme son voisin dans le tableau périodique des éléments, le silicium. Il possède 5 isotopes naturels comme le  $^{76}\text{Ge}$ , qui est faiblement radioactif, mais aussi 27 radioisotopes qui ont été synthétisés. Le germanium est un métal blanc ou argenté relativement fragile qui ne peut pas réagir ou réagit faiblement avec l'air, l'eau, les acides à l'exception de l'acide nitrique. Le germanium fait également partie des semi-conducteurs. De plus, tout comme le gallium, le germanium est l'un des rares

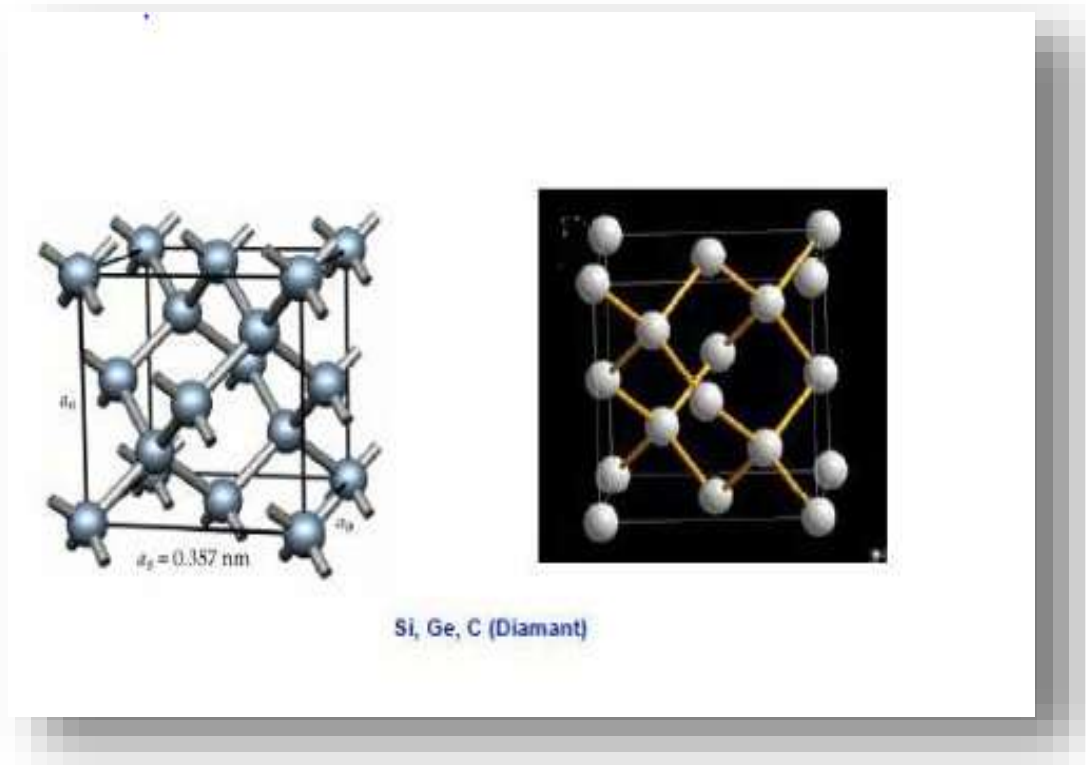


éléments qui voit son volume augmenter lorsqu'il passe de l'état liquide à l'état solide. Tout comme l'acier, la structure du germanium ne peut pas être altérée par le rayonnement neutronique. Mais l'irradiation aux neutrons rapides peut provoquer des défauts ponctuels qui recuisent vers 200°C.

### **II.3.1 Structure cristalline diamant de Germanium (Ge) :**

Un cristal de type diamant ou blende est une forme dérivée du cristal cubique à faces centrées (cfc). Il peut se décrire de différentes façons, notamment [27] :

- soit comme deux mailles d'un cristal de type cfc enchevêtrés, décalés d'un vecteur  $(1/4 ; 1/4 ; 1/4)$ , ou en d'autres termes, un cristal dont le système cristallin est cfc, mais dont le motif n'est pas un atome seul, mais deux atomes séparés par un vecteur  $(1/4 ; 1/4 ; 1/4)$ .
- soit comme la maille d'un cristal cfc dont quatre des huit sites tétraédriques sont occupés, deux dans la moitié basse du cube, suivant une petite diagonale, et deux dans la moitié haute, suivant l'autre petite diagonale. Un site tétraédrique d'une maille cfc est le centre du tétraèdre formé par un atome au coin du cube, et les trois atomes au centre de chacune des faces se rejoignant dans ce même coin.



**Figure II.1** : Structure cristalline diamant [27].

### II.3.2 Structure de bande d'énergie de Germanium (Ge) :

Matériau à gap indirect (ex. Si, Ge), les matériaux à gap indirect, comme le Germanium (colonne IV). La notion de gap direct et indirect est liée à la représentation de la dispersion énergétique d'un semi-conducteur : le diagramme E (énergie) - k (nombre d'onde). Ce diagramme permet de définir spatialement les extrema des bandes de conduction et de valence. Ces extrema représentent, dans un semi-conducteur à l'équilibre, des domaines énergétiques où la densité de porteurs type p pour la bande de valence et type n pour la bande de conduction sont importantes. On parle de semi-conducteur à gap indirect lorsque le maximum de bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent à des valeurs distinctes du nombre d'onde k sur le diagramme E(k) [27].

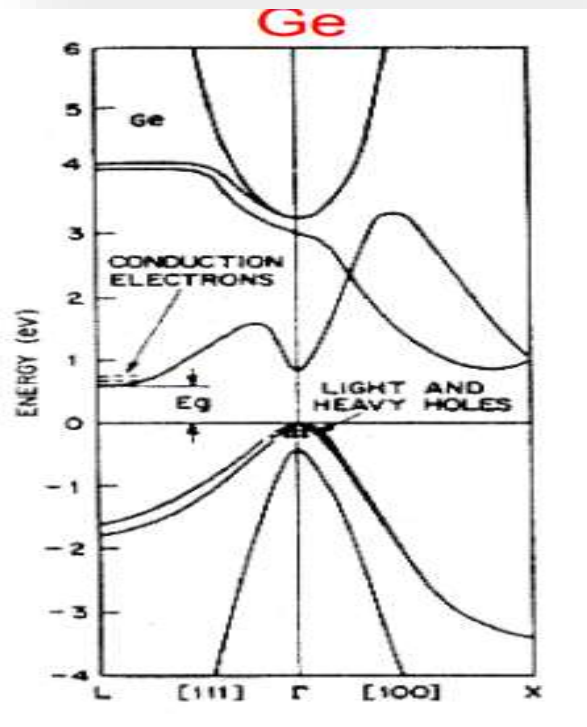


Figure II.2 : Structure de bande du Ge [27].

#### II.4 Les composés binaires (III-V) :

Parmi tous les composés binaires possibles, tous n'ont pas le même intérêt potentiel. L'étude de leurs propriétés, et en particulier de la structure de bandes montre que les éléments les plus légers donnent des composés dont laquelle la bande interdite est large et indirecte, et dans laquelle la masse effective des électrons est élevée. Les composés contenant du bore, de l'aluminium ou de l'azote entrent dans cette catégorie; ils ont en général peu d'intérêt pour l'électronique rapide [28], qui demande des semi-conducteurs à forte mobilité de porteurs ou pour l'optoélectronique ou une structure de bande directe est nécessaire pour que les transitions optiques soient efficaces [29]. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le thalium ou le bismuth donnent des composés à base de Galium (GaAs, GaSb) ou d'indium ( InP, InAs, InSb) dont les propriétés sont les plus intéressante le tableau (II.2) résume quelques paramètres pour différents matériaux de la famille III-V.

**Tableau II.2** Paramètres des principaux composés binaires III-V [29].

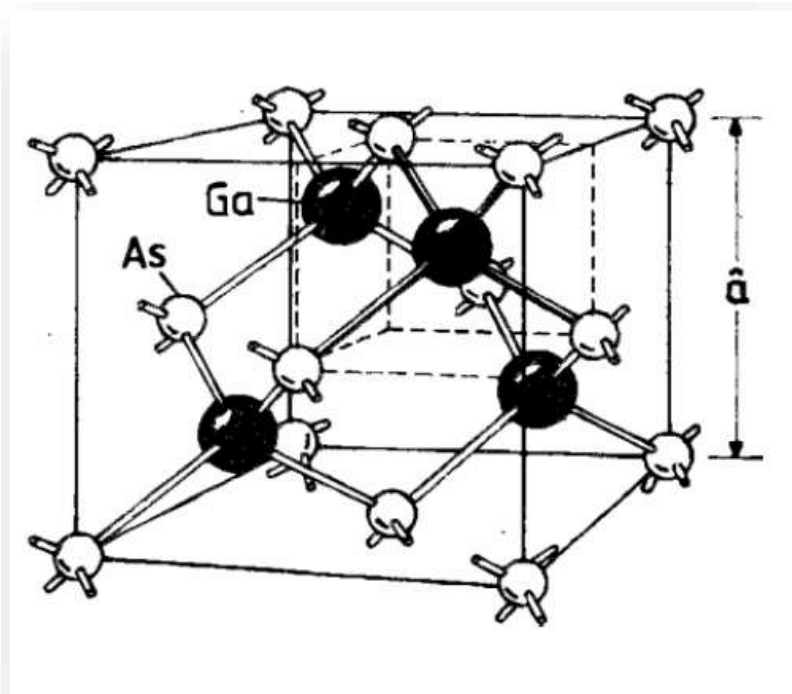
Composé III-V	$E_g$ (eV)	$m^* / m_e$	$\mu$ (cm <sup>2</sup> /V.S)	$a$ (Å°)
BN	7,5	-	-	3,6150
AlP	2,45	-	-	5,4510
AlAs	2,16	-	-	5,6605
AlSb	1,58	0,12	200	6,1355
BP	2,0	-	-	4,5380
GaN	3,36	0,19	380	$a=3,189$ $b=5,185$
GaP	2,26	0,82	110	5,4512
GaAs	1,42	0,067	8800	5,653
GaSp	0,72	0,042	5000	6,0959
InP	1,35	0,077	4600	5,8686
InAs	0,36	0,023	33000	6,0584
InSp	0,17	0,0145	80000	6,4794

#### II.4.1 L'Arsenic de Gallium (GaAs) :

L'arsenic de gallium (GaAs) a été reconnu depuis longtemps comme étant un matériau très favorable pour la conversion photovoltaïque grâce à ses propriétés importantes dont on cite: une bande interdite directe de 1.43eV et une longueur de diffusion des porteurs minoritaires de l'ordre de 2-3  $\mu\text{m}$  [10]. L'arséniure de gallium (GaAs) est un semi-conducteur composé d'un mélange de deux éléments, gallium (Ga) et l'arsénique (As). Le gallium est un élément chimique métallique d'atomique 31. On le trouve en petite quantités dans certaines variétés de blende, de bauxite, de pyrite, de magnétite et de kaolin. On obtient le gallium comme sous-produits de métallurgie de zinc et des bauxites. Le métal pur est préparé par électrolyse de sels alcalins. Le gallium reste facilement en surfusion. En effet, il peut rester liquide jusqu'à près de 2000 OC. Comme l'eau, il se dilate lors de sa cristallisation. Le gallium est chimiquement proche de l'aluminium: tous deux forment des sels et des oxydes dans lesquels le métal est trivalent. Ils forment également des composés monovalents et divalents. L'arsenic, est un élément semi-métallique solide, extrêmement toxique, de numéro atomique 33. Il appartient au groupe 15 de la classification périodique. L'arsenic n'est pas rare, mais il est toxique [30].

#### II.4.1.1 Structure cristalline de GaAs :

La figure II.3 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.

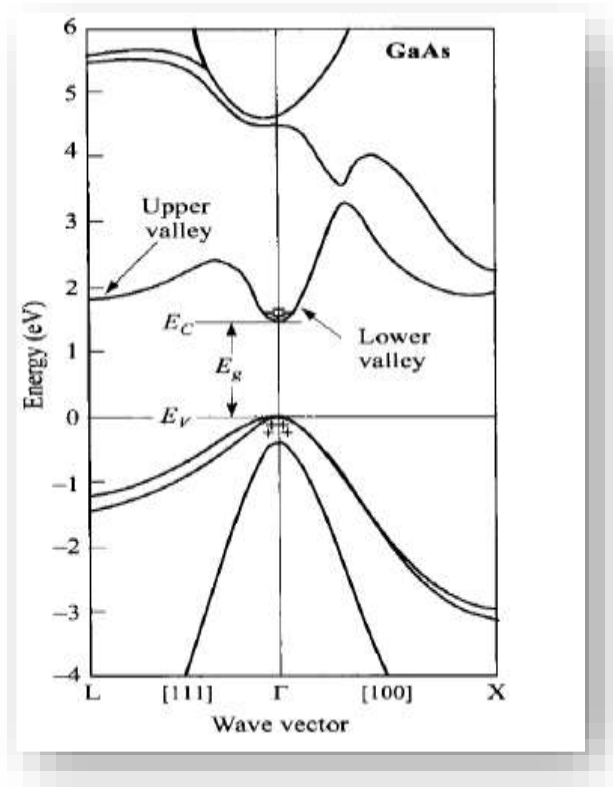


**Figure II.3 :** Structure cristalline du GaAs, liaison tétraédrique de la structure Zinc-blende [31].

#### II.4.1.2 Structure de bande d'énergie de GaAs :

La structure de bandes du semi-conducteur GaAs est représentée sur la figure II.4. Suivant les directions de plus haute symétrie de l'espace réciproque. La bande interdite est hachurée, les bandes supérieures sont les bandes de conduction, les bande inférieures sont les bandes de valence. Au zéro degré absolu la bande de valence est pleine d'électrons, la bande de conduction est vide. A la température ambiante à laquelle fonctionnent la plupart des composants électroniques, certains électrons thermiquement excités depuis la bande de valence occupent la

bande de conduction. Il est évident que les électrons les plus susceptibles de passer de la bande de valence vers la bande de conduction sont les électrons de la bande supérieure. En outre ces électrons occupent la bande de conduction inférieure. De plus, parmi les états de ces bandes ceux qui jouent le rôle essentiel sont respectivement ceux du sommet de la bande de valence et du minimum de la bande conduction [32].



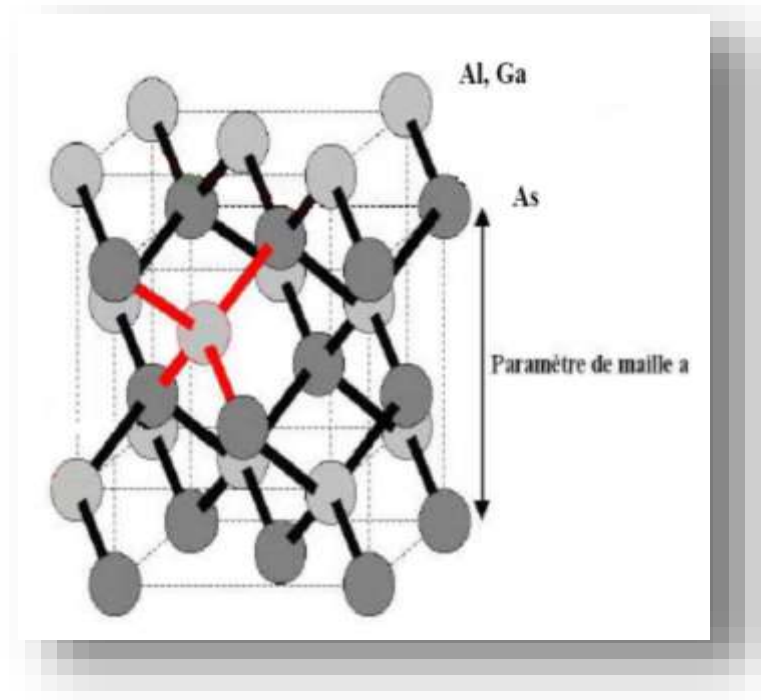
**Figure II.4 :** Structure de bande du GaAs [33].

#### II.4.2 Les composés ternaires $Al_xGa_{1-x}As$ :

L'intérêt pratique des semi-conducteurs III-V est encore considérablement renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre élément de la même colonne. On sait par exemple obtenir des alliages ternaires, qui sont identifiés de la façon suivante :

$A_x A'_{(1-x)} B$  exemple :  $Al_x Ga_{1-x} As$ , lorsque la composition exacte compte peu, on écrit tout court AlGaAs [34].

L'alliage  $Al_xGa_{1-x}As$  est une solution solide de GaAs et de AlAs (voir figure II.5). Les paramètres physiques relatifs à cet alliage peuvent être obtenus par combinaison des paramètres correspondants au GaAs et à l'AlAs. Les deux matériaux ont la même structure cristalline. Avec des paramètres physiques voisins et se rejoignent pour une température de 900 °C environ.



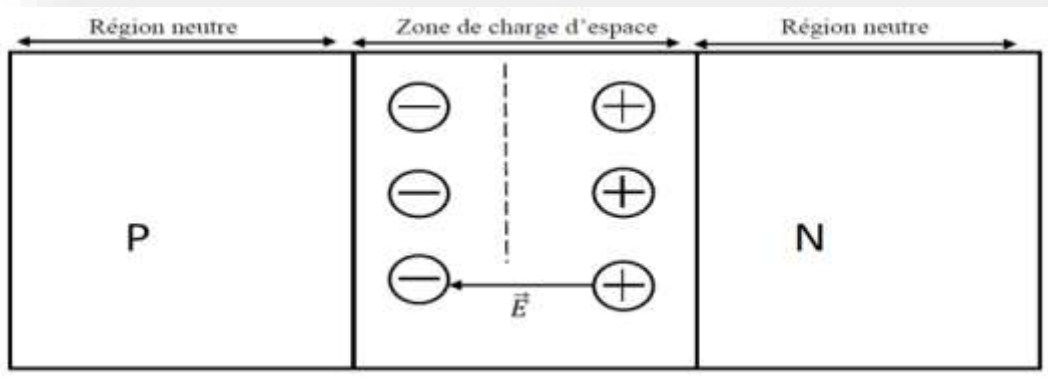
**Figure II.5 :** Structure du GaAs, elle se compose de deux sous réseaux cubiques à faces centrées, décalés d'un quart de la grande diagonale du cube, et occupés l'un par l'anion (As), et l'autre par le cation (Al,Ga) [35].

### II.5 La jonction P-N :

Parmi tous les dispositifs à semi conducteur, la jonction P-N est un composant essentiel à la fois pour ses applications directes et parce que la compréhension de sa physique permet la compréhension de nombreux autres dispositifs. Une jonction P-N est constituée par un cristal semiconducteur dont la concentration en impuretés profondes varie avec  $x$  pour passer d'une région de type P à une région de type N. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée

donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction (dite P-N) a été formée. la zone où la charge n'est pas nulle porte le nom de zone de charge d'espace (ZCE) (Figure.II.6).

En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue La structure de la jonction P-N peut être [36] :

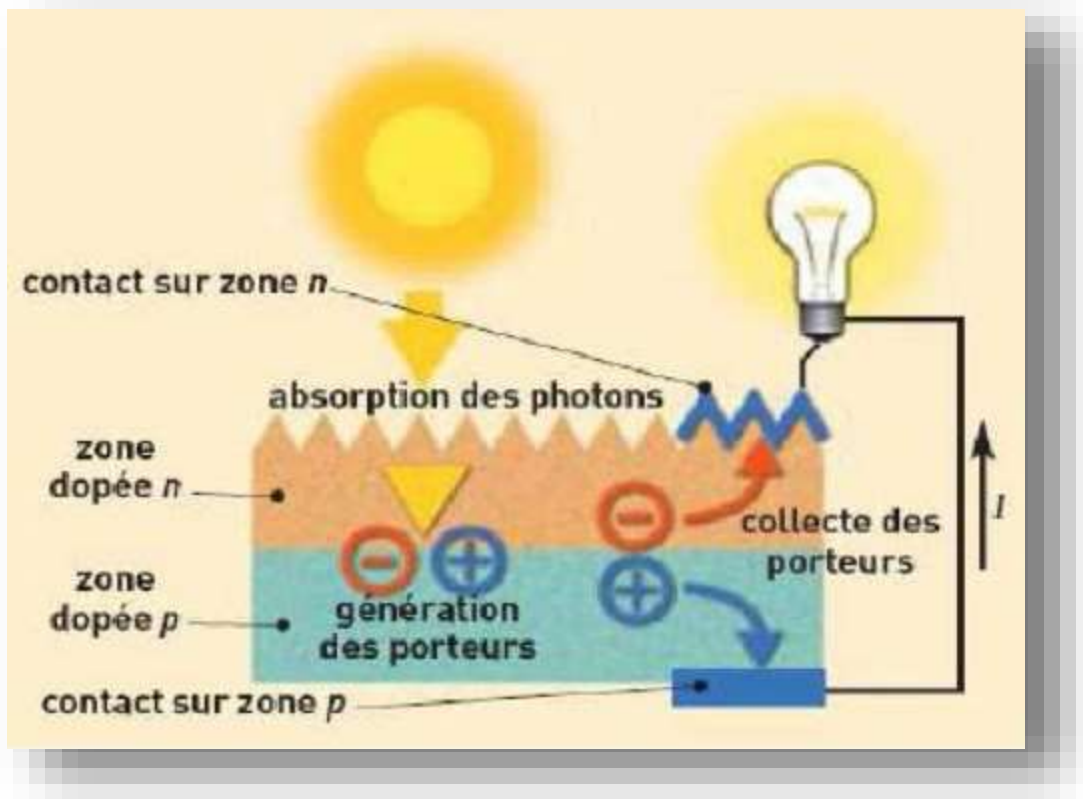


**Figure II.6 :** Structure de la jonction P-N.

### II.6 Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque :

La cellule solaire est un composant semi-conducteur qui convertit l'éclairement incident en puissance électrique. Le phénomène mis en jeu, l'effet photoélectrique, consiste à l'apparition d'une différence de potentiel produite par la génération de porteurs de charge par excitation lumineuse au voisinage d'une jonction. La cellule solaire est une jonction **P-N** dont le fonctionnement est basé sur l'absorption du flux lumineux solaire (voir figure II.7).

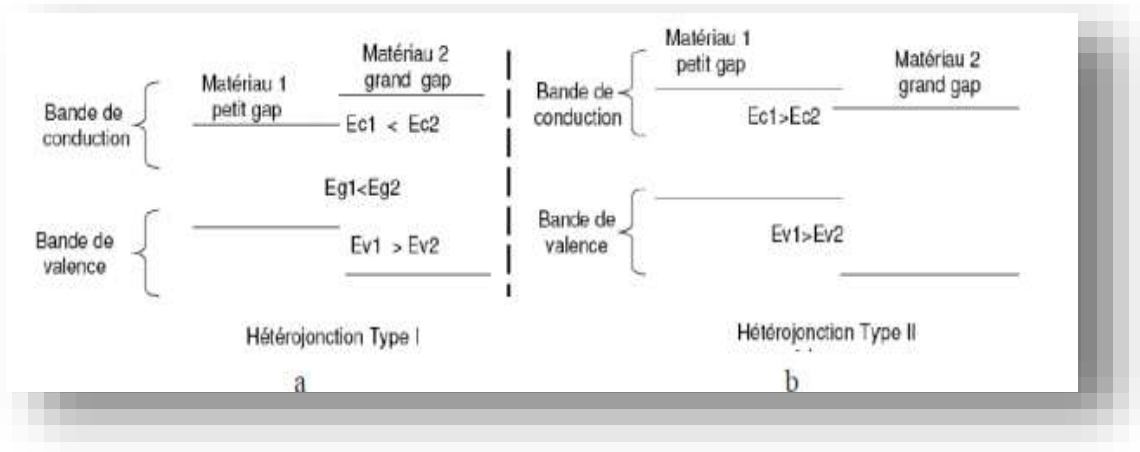




**Figure II.7 :** Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [37].

### II.7 Hétérojonctions :

Les jonctions constituées par la mise en contact de deux régions différemment dopées d'un même semi-conducteur, sont appelées homojonctions. Par contre, les jonctions réalisées par la juxtaposition de deux matériaux différents sont appelées hétérojonctions [38]. La réalisation d'hétérojonction s'effectue par la croissance cristalline d'un matériau sur l'autre et nécessite l'utilisation de semi-conducteurs ayant des propriétés cristallines voisines (la taille des atomes doit être notamment assez proche). Selon les matériaux utilisés pour les semiconducteurs, on peut distinguer deux types d'hétérojonctions. Le schéma de la figure II.8 donne une description schématique des décalages de bandes de conduction et de valence pour deux types d'hétérojonction.

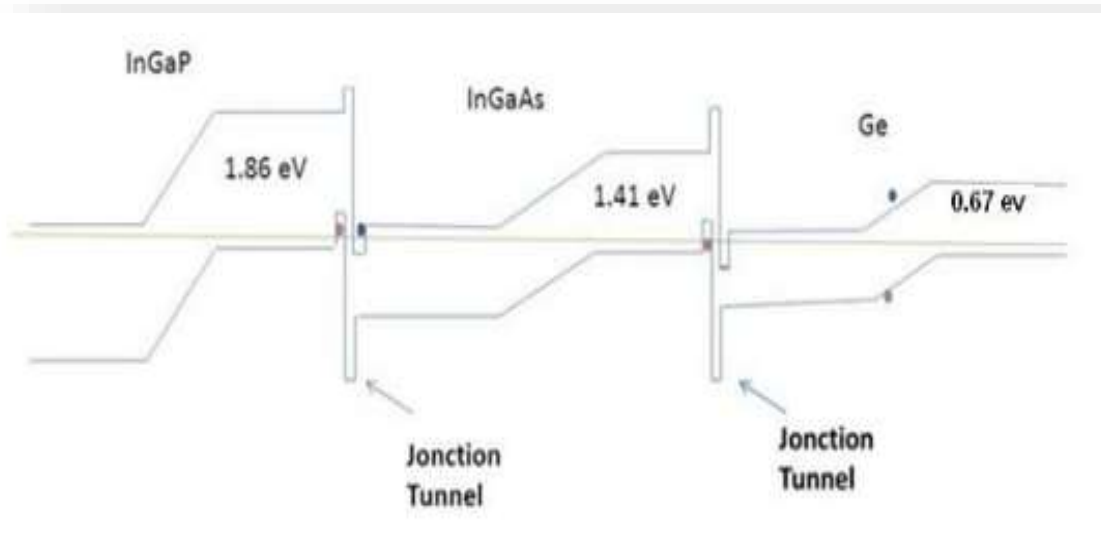


**Figure II.8 :** Diagrammes schématiques montrant deux types différents d'hétérojonction [39].

Pour l'hétérojonction de type I (figure II.8.a), les offsets de bande pour la bande de conduction et de valence agissent comme des barrières de potentiel et gardent les électrons et les trous dans le matériau de plus petite bande interdite. Une énergie est donc nécessaire pour faire déplacer les porteurs du matériau petite bande interdite au matériau grande bande interdite. Les hétérojonctions (GaAs-AlGaAs, InP-InGaAs, Si-SiGe) sont des hétérojonctions de type I. Les hétérojonctions de type II (figure II.8.b)) dites à bande interdite décalée favorisent le déplacement d'un seul type de porteurs. Selon le type de dopage utilisé pour les semi-conducteurs, deux hétérojonctions se distinguent : L'hétérojonctions iso-types, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont de même type de dopage [40], les porteurs qui diffusent dans la zone de charge d'espace sont majoritaires, donc le courant total est celui des porteurs majoritaires [38], et l'hétérojonctions aniso-types, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont dopés différemment [40], les porteurs qui sont émis thermiquement à l'interface d'un semiconducteur, deviennent dans l'autre des porteurs minoritaires [38].

## II.8 Structure de bande et mécanisme de transport des porteurs d'une cellule solaire tri-jonction

Un schéma simplifié de la structure de bandes des différentes couches d'une structure cellule solaire tri-jonction est illustré à la figure II.9 suivante. Le niveau de Fermi à l'équilibre est constant dans toute la structure. Sous illumination, il faut bien comprendre que la jonction sera polarisée suite au courant traversant la résistance de charge. Les électrons passent par effet tunnel de la bande de conduction d'une photodiode à la bande de valence de la photodiode adjacente. Cependant, afin que ce transfert de charges soit assuré, des trous doivent être présents dans la bande de valence de la photodiode en dessous pour permettre aux électrons d'occuper les états libres de cette bande. Le nombre de photoporteurs (électrons et trous) traversant les différentes jonctions est dans ce cas le même, par conséquent le courant est constant à travers toute la structure [41].



**Figure II.9 :** Diagramme de bandes d'énergie simplifié d'une cellule solaire tri-jonction [39].

**II.9 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous venons de présenté des notions générales sur les semi-conducteurs (Semi-conducteur intrinsèque, Semi-conducteur extrinsèque, Semi-conducteur dopé n, Semi-conducteur dopé p). à prés ça nous avons défini le germanium (Ge), structure cristalline diamant de germanium (Ge) , structure de bande d'énergie de germanium (Ge) , les composés binaires GaAs ( l'Arsenic de Gallium (GaAs) ), structure cristalline de GaAs , structure de bande d'énergie de GaAs et les composés ternaires  $Al_xGa_{1-x}As$  et en suite la jonction P-N et les cellules solaires photovoltaïque. Enfin les Hétérojonctions et tri-jonction.

*Chapitre III : Simulation numérique de la  
cellule solaire  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$  par logiciel  
SCAPS*

### III.1 Introduction

Ces dernières années, en raison des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se sont orientés vers la simulation. La simulation par le logiciel SCAPS est disponible gratuitement pour la communauté de la recherche de photovoltaïques (établissements et Instituts de recherche). Il fonctionne sur PC sous Windows 95,98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, et occupe environ 50 Mo d'espace disque. Le logiciel peut être téléchargé gratuitement. Il faut rapporter à la connaissance de Marc Burgelman le téléchargé d'une version de SCAPS (le nom et le nom et l'adresse d'institution, et le nom du promoteur pour les étudiants de doctorat). SCAPS est développé à l'origine pour des structures des cellules de  $CuInSe_2$  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). Et le logiciel SCAPS calcule 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 V et / ou f), la réponse spectrale (également avec polarisation lumière ou tension).

Dans le travail qui suit nous allons étudier l'effet d'irradiation par des protons pour déterminer les caractéristiques électriques des cellules solaires à base de  $AlGaAs/GaAs/Ge$  comme les caractéristiques densité de courant – tension ( $J-V$ ) sous éclairement  $AM_0$ , et par la suite les paramètres photovoltaïques liés à ces caractéristiques tels que la densité du courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ), la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le facteur de forme ( $FF$ ) et le rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ). Une autre caractéristique essentielle qui peut être déterminée est la réponse spectrale de la cellule en fonction de la longueur d'onde du spectre  $AM_0$ .

### III.2 Utilisation de SCAPS

#### III.2.1 Notion de base

SCAPS est un programme conçu pour fonctionner sous le système Windows, développé par LabWindows/CVI de la national Instruments. SCAPS s'ouvre avec l'icône 'Action Panel'. La fenêtre qui s'ouvre est présentée dans la figure III.1.

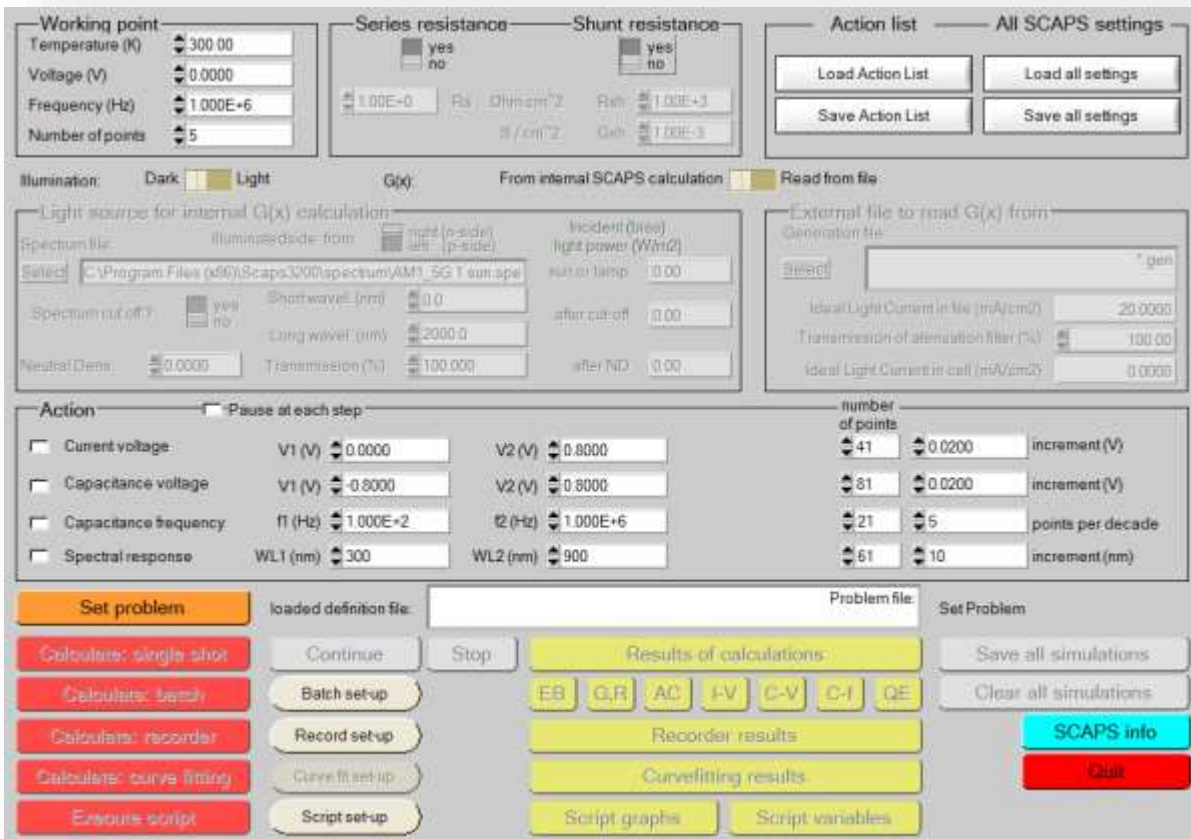


Figure III.1 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal [42].

- Il y a des panneaux dédiés pour les actions de base :
  1. Lancer SCAPS.
  2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
  3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).
  4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
  5. Commencer le(s) calcul(s).
  6. Afficher les courbes de simulation (voir la section 6).
- Ces étapes sont plus détaillées dans ce qui suit.

### III.2.2 Définir le problème :

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 'SET PROBLEM' dans le panneau d'action [42].

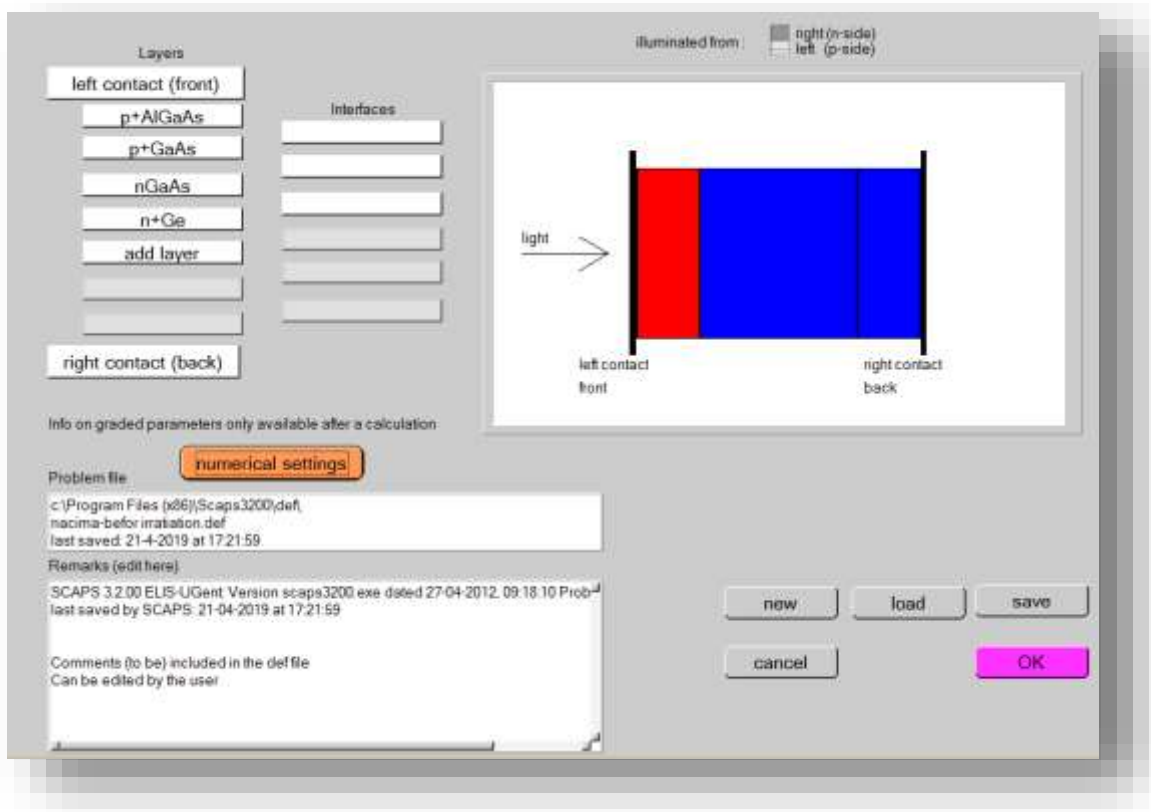


Figure III.2 : Définir le problème.



### **III.2.3 Ajout de défaut :**

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 l'utilisateur doit spécifier la recombinaison certains ou, moins à un endroit (dans une couche, à un contact ou à une interface) [42]. Si (s), il ne le fait pas, un échec de la convergence entrainera dans des condition de non – équilibre (non nul la tension et / ou d'illumination) [42].

Dans la majeure partie d'une couche semi-conductrice, trois types différents de procédés de recombinaison peuvent être introduits : par défauts, radiatifs et Auger [42].

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

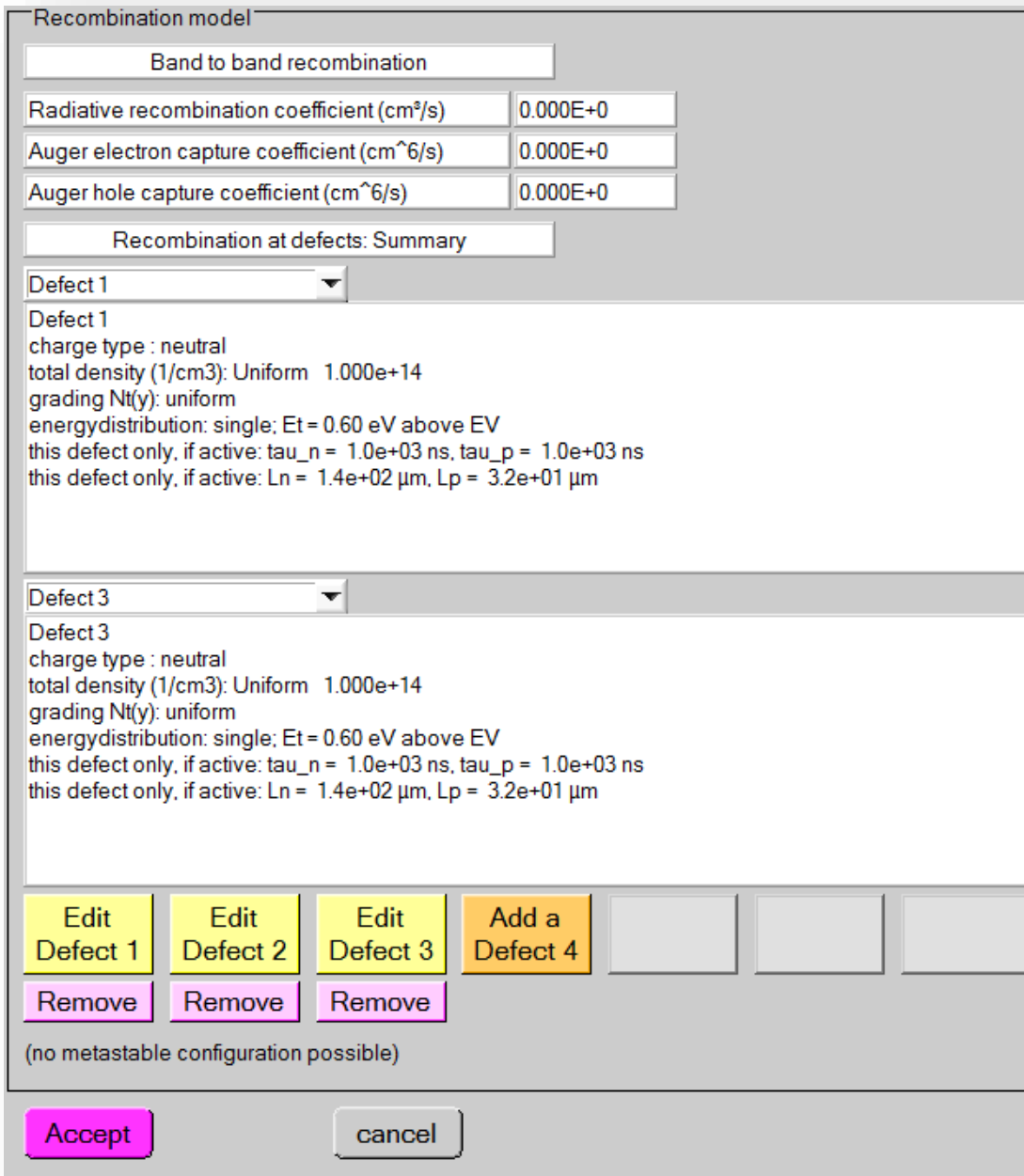


Figure III.3 : Ajout des défauts.

Defect 1 of nGaAs

defect type	Neutral
capture cross section electrons (cm <sup>2</sup> )	1.000E-15
capture cross section holes (cm <sup>2</sup> )	1.000E-15
energetic distribution	Single
reference for defect energy level Et	Above EV (SCAPS < 2.7)
energy level with respect to Reference (eV)	0.600
characteristic energy (eV)	0.100

no Nt grading (uniform)

Nt total (1/cm<sup>3</sup>)    uniform Nt    1.000E+14

Optical capture of electrons  From model  
From file

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:

Optical capture of holes  From model  
From file

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:

Figure III.4 Le panneau de propriétés de défauts.

### III.2.4 Les courbes (I-V) sous éclairciment :

Le panneau d'affichage des courbes I-V sous éclairciment (figure III.5). 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. 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.

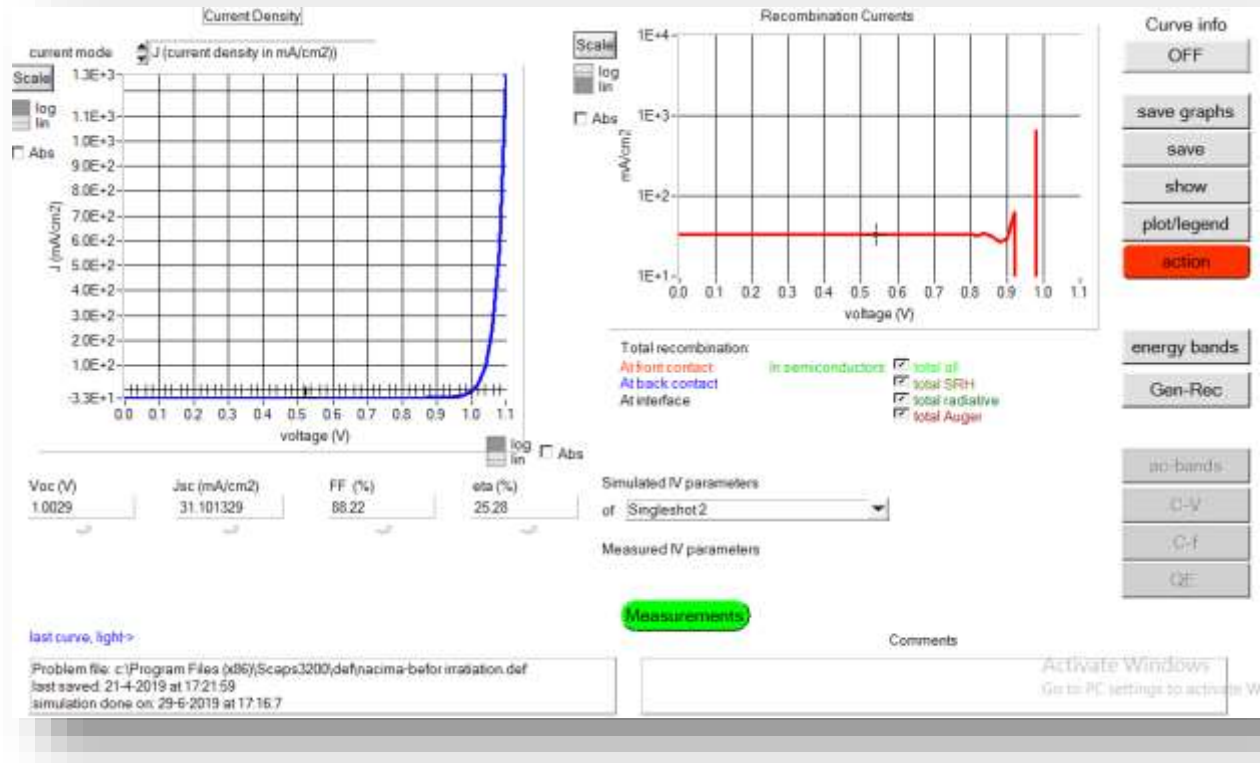


Figure III.5 : Panneau d'affichage des courbes I-V sous éclairciment.

### III.3 La cellule solaire $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$ :

#### III.3.1 La structure de la cellule solaire $p^+ Al_xGa_{1-x}As/n GaAs/n^+ Ge$ :

La cellule solaire étudiée à base de  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$  est une jonction  $p^+/n/n^+$  dont la structure est présentée dans la figure III.6. Le diagramme d'énergie de cette structure est présentée dans la figure III.7. La caractéristique spéciale de cette cellule est qu'elle contient une fenêtre  $Al_xGa_{1-x}As$  ( $p^+$ ), ce qui améliore l'absorption des photons de longueurs d'onde courtes tel que  $x = 0.31$ . La caractéristique I-V et le rendement quantique de la cellule à l'état initial (avant l'irradiation) ont présentés dans la figure III.8 (a) et la figure III.8 (b) respectivement. Les paramètres d'entrés introduits dans le logiciel de simulation par SCAPS sont les paramètres du matériau (tableau III.1) et ceux de la cellule (tableau III.2).

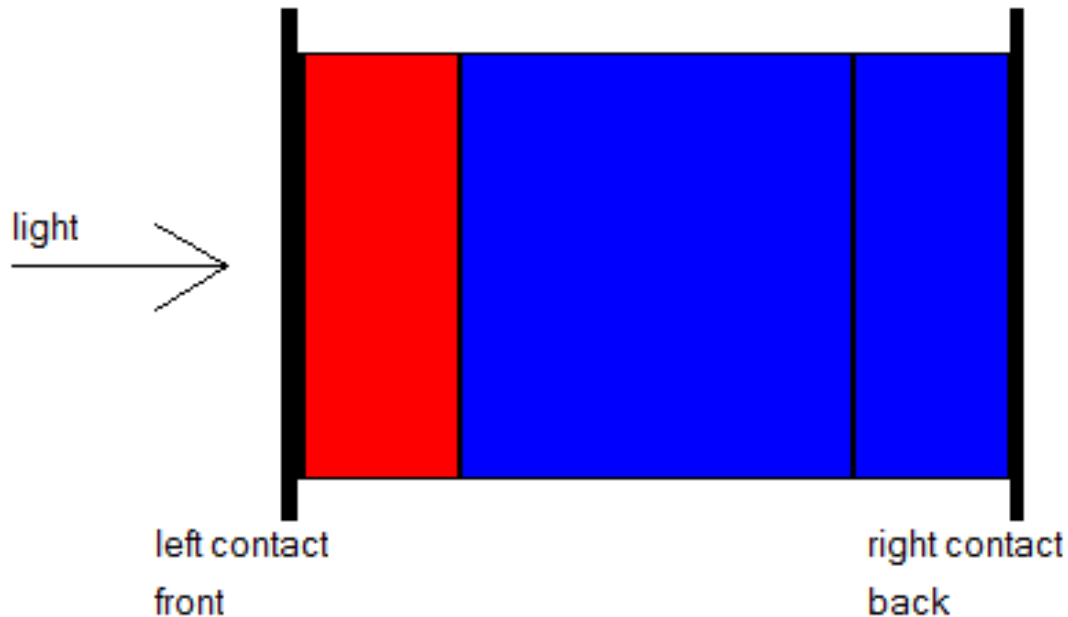


Figure III.6 : La structure de la cellule solaire  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$  ( $p^+/n/n^+$ ).

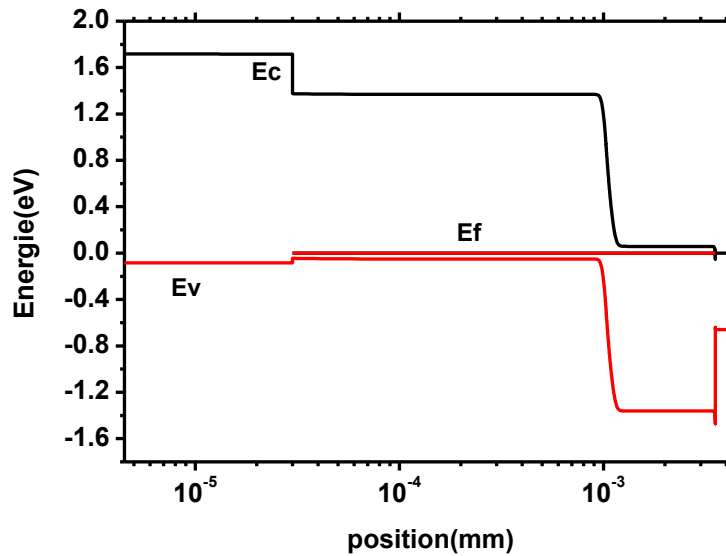


Figure III.7: Diagramme d'énergie de la cellule solaire  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$  ( $p^+/n/n^+$ ) à l'équilibre thermodynamique.

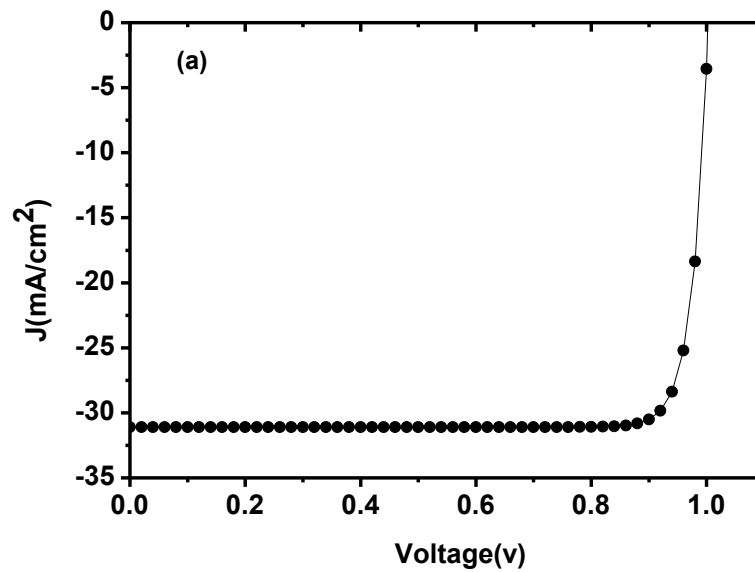
Tableau III.1 : Paramètres d'entrée du matériau dans le logiciel de simulation SCAPS.

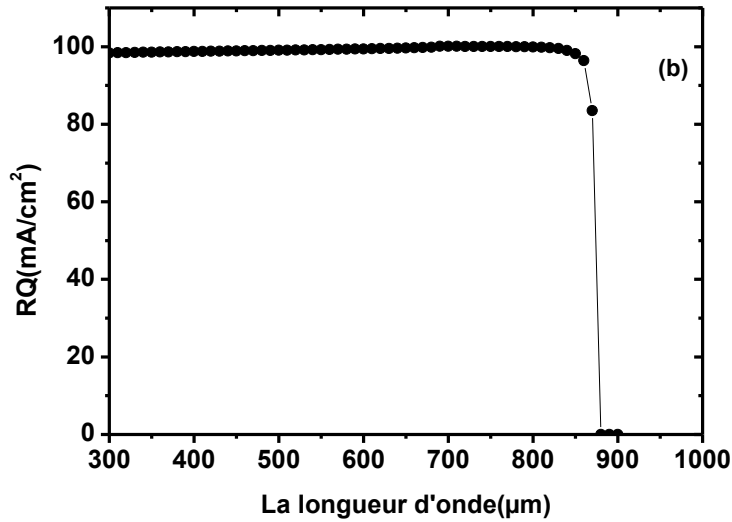
Paramètre	Définition	$Al_{0.31}Ga_{0.69}As$	GaAs	Ge
$E_g$ (ev)	la largeur de la bande interdite en eV	1.8	1.42	0.66
$\chi$	Affinité électronique (eV)	4.07	4.07	4
$\epsilon_r$	Constante diélectrique relative ( $F.cm^{-1}$ )	12.9	12.9	16
$N_c$	la densité effective d'états des électrons	$4.7 \times 10^{17}$	$4.7 \times 10^{17}$	$10^{19}$
$N_v$	la densité effective d'états des trous	$7 \times 10^{18}$	$7 \times 10^{18}$	$5 \times 10^{18}$
$\mu_n$	mobilité des électrons	$8 \times 10^3$	$8 \times 10^3$	$4 \times 10^3$
$\mu_p$	mobilité des trous	$4 \times 10^2$	$4 \times 10^2$	$1.2 \times 10^3$

**Tableau III.2** Dopage et épaisseurs des régions de la cellule solaire  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$  ( $p^+/n/n^+$ ) dont l'épaisseur totale est  $4.53 \mu m$ .

	Fenêtre ( $p^+$ )	Émetteur ( $p^+$ )	Base (n)	Collecteur ( $n^+$ )
	$Al_{0.31}Ga_{0.69} As$	GaAs	GaAs	Ge
<b>Dopage (<math>cm^{-3}</math>)</b>	$1 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{17}$	$5 \times 10^{16}$	$1 \times 10^{19}$
<b>Épaisseur (<math>\mu m</math>)</b>	0.03	1.00	2.50	1.00

D'après la figure III.8 (a), les paramètres de sortie de la cellule sont :  $V_{co} = 1.0 V$ ,  $J_{cc} = 30.10 mA/cm^2$ ,  $FF = 0.88$  et  $\eta = 25.19 \%$ . Ces valeurs obtenues par simulation sont mieux que les valeurs obtenues par expérimentale (voir Tableau III.3) [36].





**Figure III.8 :** (a) Caractéristique courant-tension, (b) Rendement quantique de la cellule solaire  $p^+/n/n^+$  en  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$  avant l’irradiation.

**Tableau III.3 :** Grandeurs photovoltaïques des cellules solaires à base de GaAs [36].

(a) National Renewable Energy Laboratory (USA).

(b) Fraunhofer Institute for Solar Energy System (Allemagne).

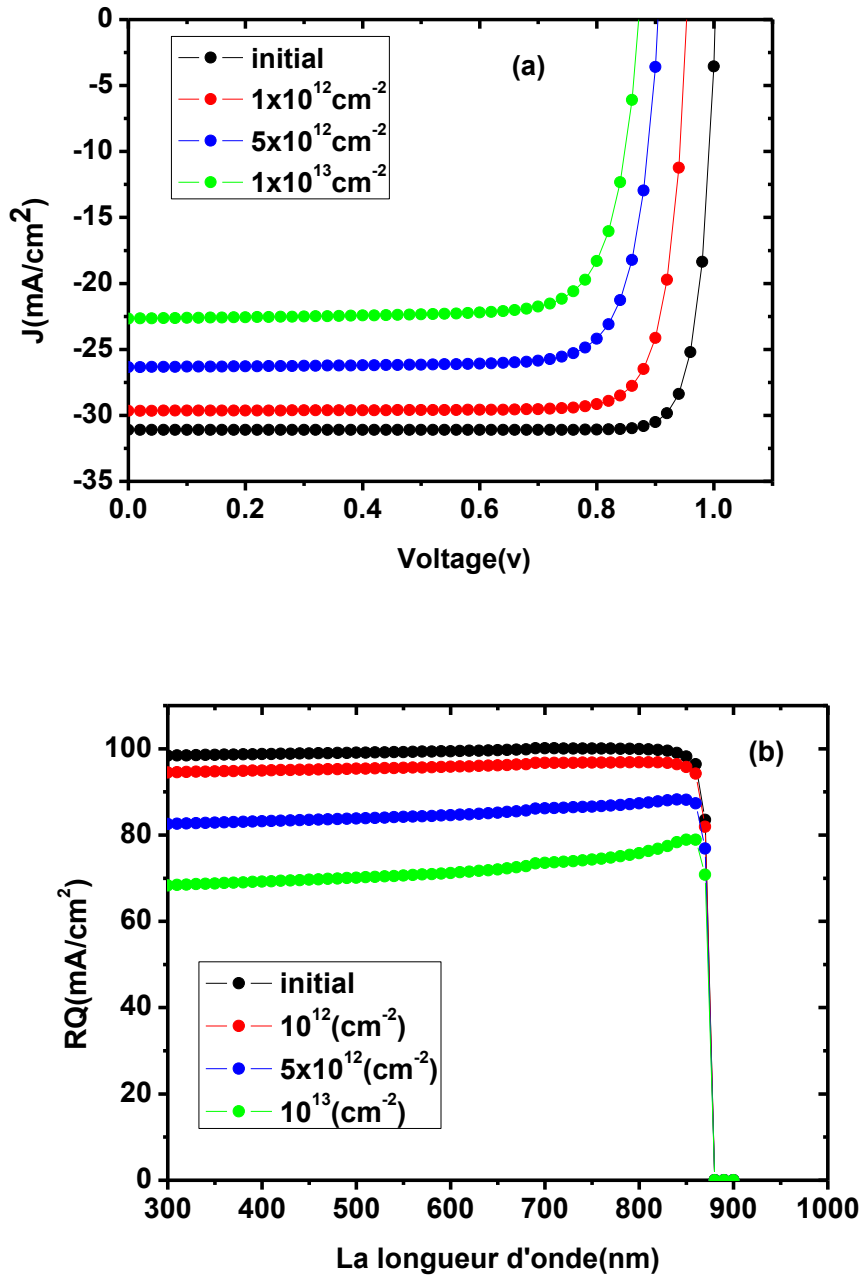
Structure	Aire( $cm^2$ )	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ ( $mA/cm^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)	Centre de test
Hétérojonction -PPN	1	1.021	27.8	83.7	23.7	-
GaAs(AlGaAs)	3.91	1.022	28.2	87.1	25.1	NREL <sup>(a)</sup>
GaAs-Couche mince	4	1.011	27.6	83.8	23.3	NREL
PN-GaAs(AlGaAs)	1	1.036	27.5	85.1	24.2	ISE <sup>(b)</sup>
PN-GaAs(AlGaAs)	8	1.038	26.9	83.5	23.4	ISE
PIN-GaAs(AlGaAs)	8	1.038	27.1	82.9	23.3	ISE
GaAs(AlGaAs)	4	1.022	28.2	87.1	25.1	ISE

### III.3.2 Effet de la fluence des protons :

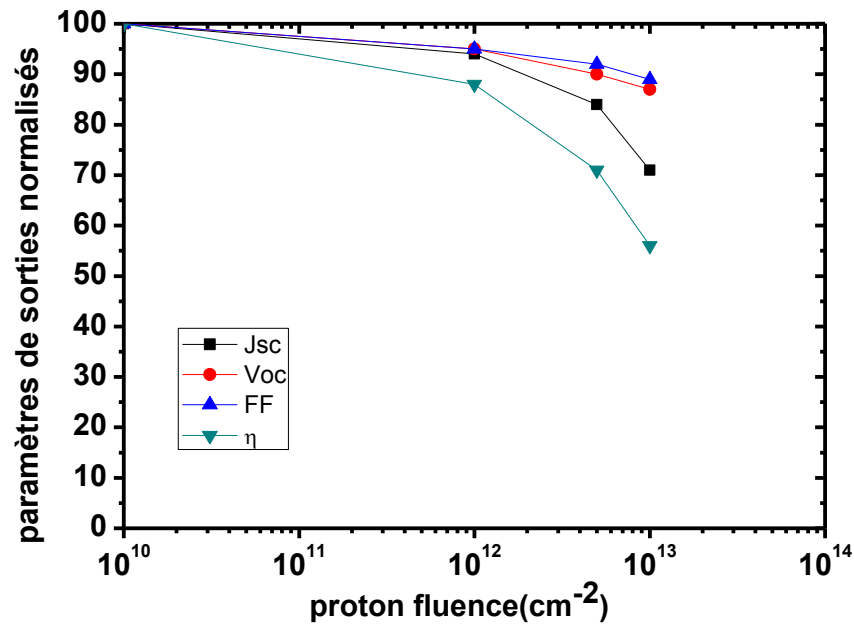
L'effet d'irradiation par des protons énergétiques avec différentes fluences ( $cm^{-2}$ ) sur la caractéristique (J-V) et la réponse spectrale de la cellule sont présentés,



respectivement dans la figure III.9 (a) et la figure III.9 (b). L'effet d'irradiation sur les paramètres de sortie de la cellule (outputs) extraits des caractéristiques (J-V) est résumé dans le tableau III.4 et présenté dans la figure III.10.



**Figure III.9 :** (a) Caractéristique courant-tension, (b) Rendements quantiques de la cellule solaire  $p^+/n/n^+$  en  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$  sous éclaircment AM0 pour différentes fluence des protons.



**Figure III.10** : Effet de la fluence des protons sur les paramètres de sortie de la cellule solaire  $p^+/n/n^+$  en  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$ .

**Tableau III.4** : Paramètres photovoltaïques de la cellule ( $p^+-Al_xGa_{1-x}As/n^-GaAs/n^+-Ge$ ) pour différentes fluence des protons.

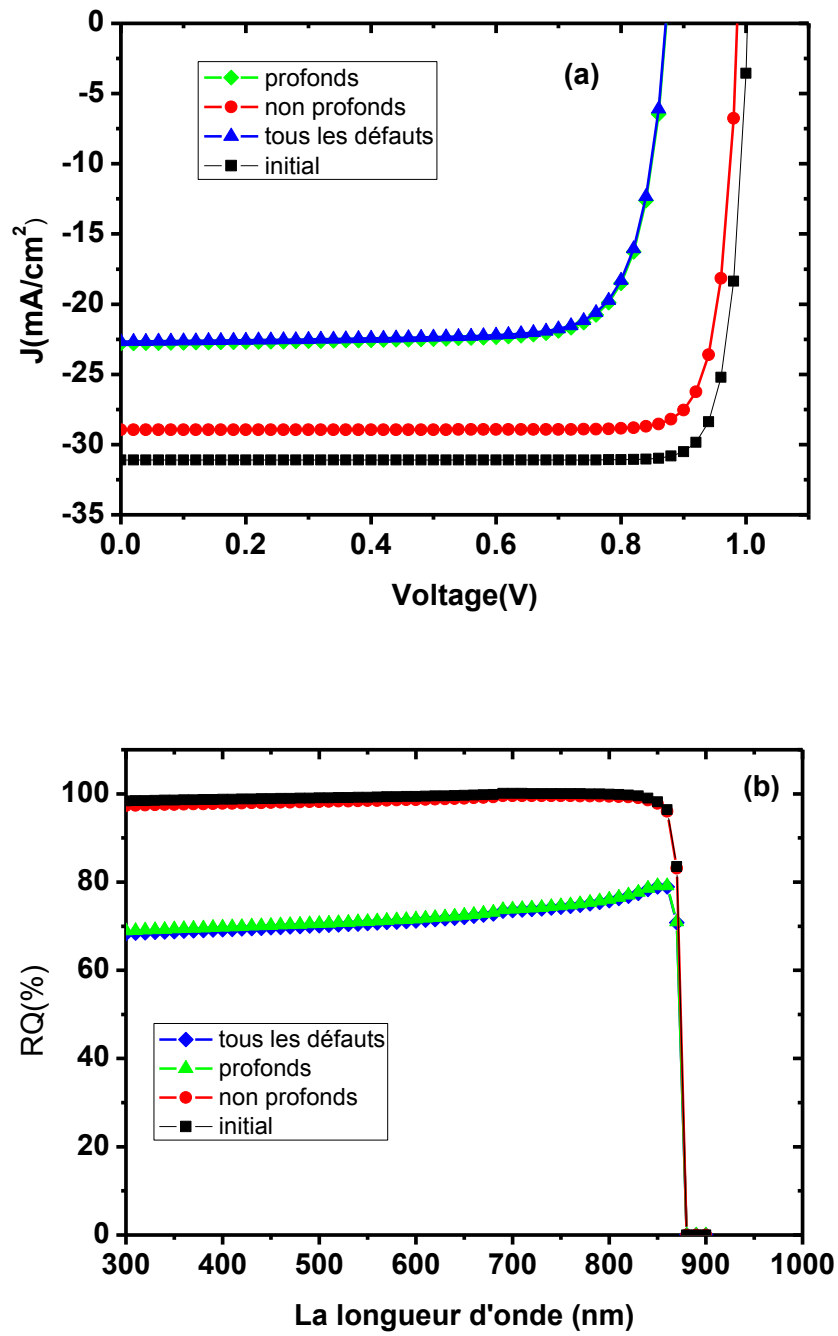
Fluence (cm <sup>-2</sup> )	Jsc(mA/cm2)	Voc(V)	FF	η(%)
Avant l'irradiation	30.10	1.00	0.88	25.19
10 <sup>12</sup>	29.65	0.95	0.84	22.29
5x10 <sup>12</sup>	26.34	0.90	0.81	18.06
10 <sup>13</sup>	22.66	0.87	0.79	14.40

D'après les résultats, on remarque qu'avec l'augmentation de la fluence des protons, les paramètres de la cellule externes diminuent, la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ), le facteur de forme ( $FF$ ) et le rendement de conversion ( $\eta$ ). Le rendement de conversion est le paramètre le plus sensible, alors que le  $FF$  est le moins sensible.  $J_{sc}$  présente un rapport de dégradation de presque 0.71,  $V_{oc}$  un rapport de presque 0.87. La diminution du courant

de court-circuit de  $30.10 \text{ mA/cm}^2$  à  $22.66 \text{ mA/cm}^2$  puisque la densité du courant est proportionnelle à la différence entre le taux de génération et le taux de recombinaison  $J \propto \int (G - U) dx$ . Le paramètre qui montre la moindre sensibilité à l'irradiation par les protons est le  $FF$ . Le rendement de conversion  $\eta$  de la cellule diminue de  $25.19 \%$  à  $14.40 \%$  est le paramètre le plus sensible. En ce qui est pour la réponse spectrale (figure III.9 (b)), on remarque que sa sensibilité aux petites doses est toujours limitée dans la gamme des longueurs d'ondes grandes. En augmentant la dose jusqu'à  $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  -  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , l'effet de l'irradiation s'étale sur toute l'intervalle ( $0.3$ -  $0.9 \mu\text{m}$ ).

### **III.3.3 L'effet d'énergie d'activation :**

Les défauts induits par l'irradiation des protons peuvent être classés en deux types ; des pièges profonds qui peuvent être considérés comme étant des centres de recombinaison et des pièges peu profonds. Pour connaître l'effet de type des défauts, on simule l'effet des pièges profonds et non profonds. La figure III.11(a), présente la caractéristique J-V et (b) la réponse spectrale pour différentes d'énergie d'activation. L'effet de l'irradiation par des protons (la fluence est égale à  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ) sur les paramètres de sortie de cellule est résumé dans le tableau III.5.



**Figure III.11 :** (a) Caractéristique courant-tension, (b) Rendements quantiques de la cellule solaire  $p^+/n/n^+$  en  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$  sous éclaircment AM0 pour différentes énergies d'activation.

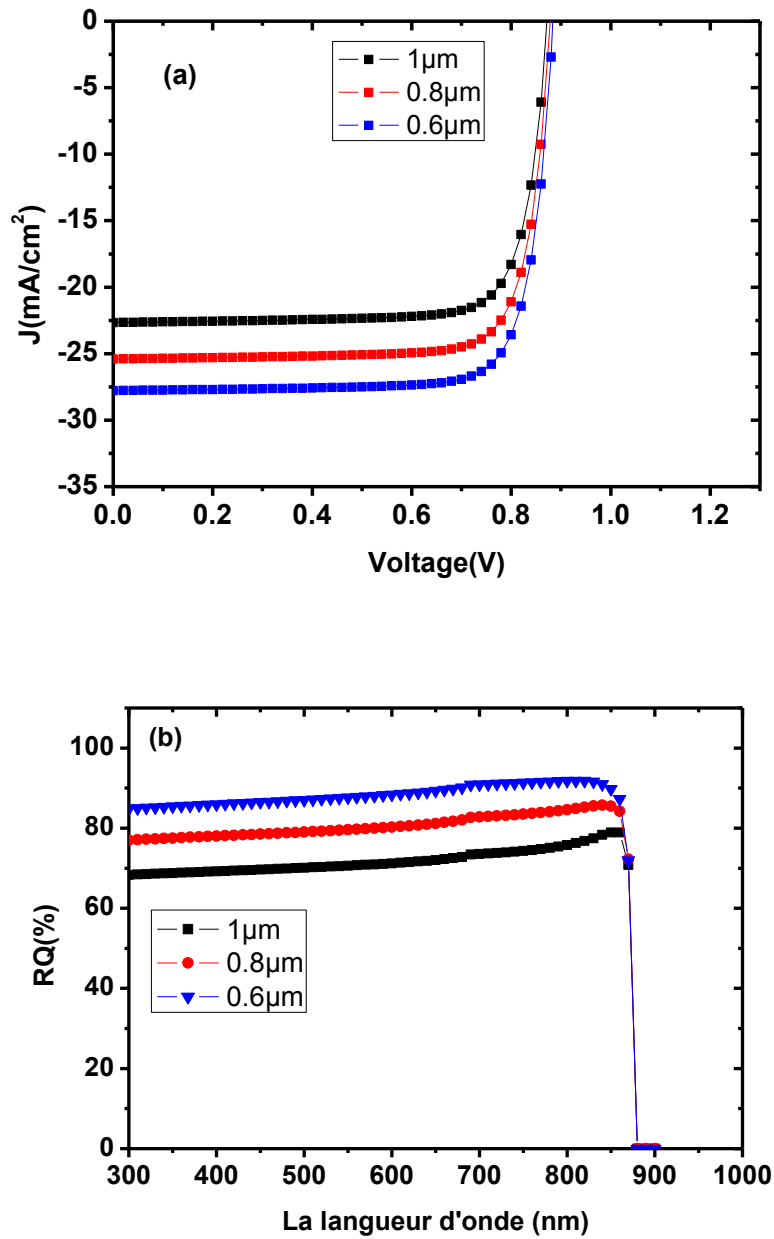
**Tableau III.5** : Paramètres photovoltaïques de la cellule ( $p^+-Al_xGa_{1-x}As/n-GaAs/n^+-Ge$ ) pour différentes énergies d'activation.

	<b>Jsc(mA/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Voc(V)</b>	<b>FF</b>	<b>η(%)</b>
<b>Avant l'irradiation</b>	30.10	1.00	0.88	25.19
<b>Tous les défauts</b>	22.66	0.87	0.79	14.40
<b>Défauts profonds</b>	22.79	0.87	0.79	14.52
<b>Défauts non profonds</b>	28.94	0.98	0.87	24.36

Les résultats obtenus dans le tableau III.5 présente la diminution des paramètres externes de la cellule dans le cas des défauts profonds. La densité de courant et la tension de circuit ouvert diminuent jusqu'à  $J_{sc} = 22.79 \text{ mA/cm}^2$  et  $V_{oc} = 0.87 \text{ V}$  pour la fluence  $\Phi = 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ .  $FF$  est le paramètre le moins sensible présentant une légère diminution de 0.88 à 0.79. Le rendement de conversion de la cellule diminue de 25.19 à 14.40 %. Selon les résultats du tableau III.5 on remarque que la diminution des paramètres de sortie de la cellule solaire est toujours moins intense en comparaison avec le cas de présence uniquement des pièges profonds. Puisque les pièges non profonds sont très proche de la bande de valence ou de la bande de conduction, des transitions au bord de bande sont possible. L'allure dégradée de la réponse spectrale dans le cas de la présence uniquement des pièges profonds est semblable aux cas de présence de tous les pièges. Donc on estime que l'effet de la dégradation des performances de la cellule est dominé par la présence des pièges profonds à électrons considérés comme centres de recombinaison.

### III.3.4 L'effet de l'épaisseur de l'émetteur (région $p^+-GaAs$ ) :

On choisit comme épaisseur de la fenêtre ( $p^+-AlGaAs$ ) à  $0.03 \mu m$  et on fait varier l'épaisseur de l'émetteur, les paramètres externes de la cellule solaire obtenus à prés l'irradiation par des protons (la fluence est égale à  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ) sont résumés dans le tableau III.6. La figure III.12 (a) présente la caractéristique (J-V) de la cellule solaire  $AlGaAs/GaAs/Ge$  et La figure III.12 (b) présente le rendement quantique pour les différentes valeurs de l'épaisseur. Le tableau III.6 présente l'effet de l'épaisseur sur les paramètres externes de la cellule solaire.



**Figure III.12 :** (a) Caractéristique courant-tension, (b) Rendements quantiques de la cellule solaire  $p^+/n/n^+$  en  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$  sous éclairement AM0 pour différentes valeurs de l'épaisseur de la région  $p^+-GaAs$

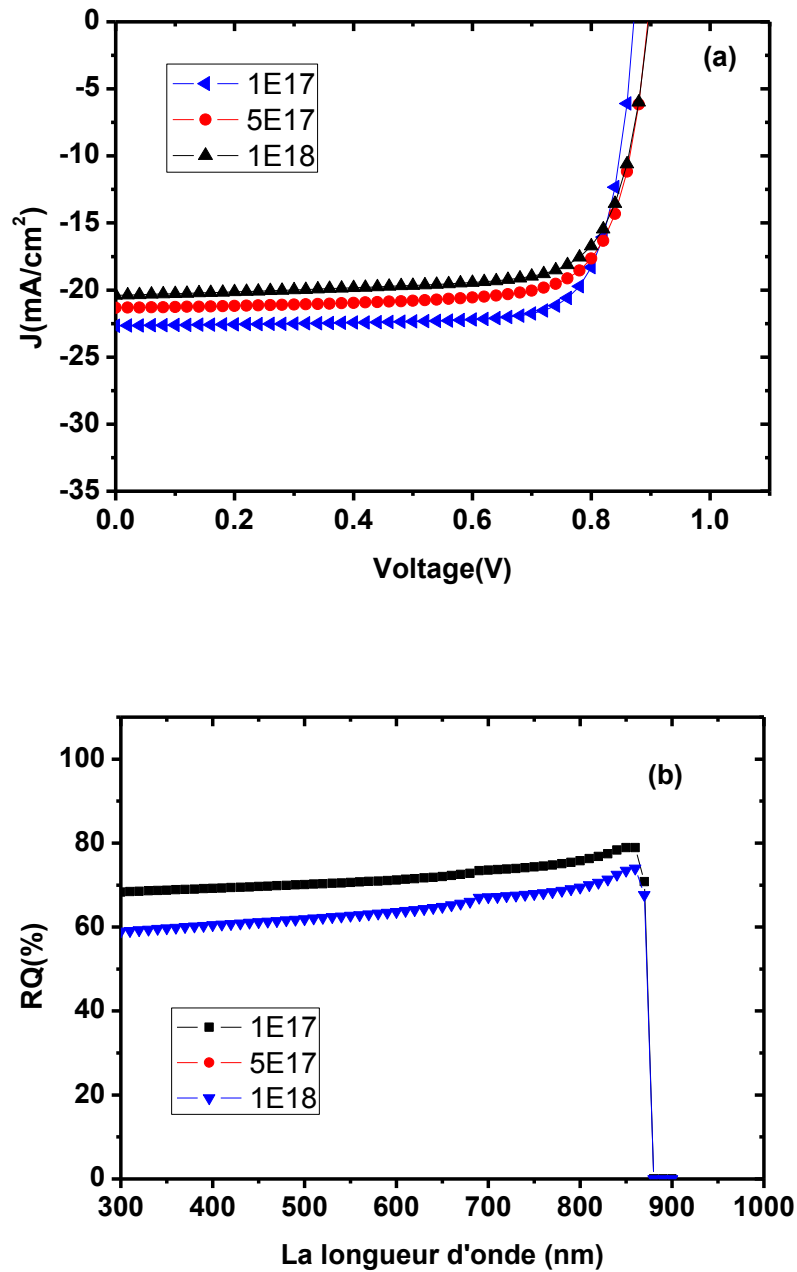
**Tableau III.6 :** Paramètres photovoltaïques de la cellule ( $p^+-Al_xGa_{1-x}As/n-GaAs/n^+-Ge$ ) pour différentes valeurs de l'épaisseur de la région  $p^+-GaAs$ .

<b>P<sup>+</sup>-GaAs épaisseur (μm)</b>	<b>J<sub>sc</sub>(mA/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>V<sub>oc</sub>(V)</b>	<b>FF</b>	<b>η(%)</b>
<b>Avant l'irradiation</b>	30.10	1.00	0.88	25.19
<b>1.00</b>	22.66	0.87	0.79	14.40
<b>0.8</b>	25.40	0.87	0.79	16.31
<b>0.6</b>	27.78	0.88	0.79	18.01

Les résultats obtenus dans le tableau III.6 présentent une augmentation des deux paramètres de la cellule, le  $J_{sc}$  et  $\eta$  avec la diminution de l'épaisseur de la région de l'émetteur  $p^+-GaAs$  de 1  $\mu m$  jusqu'à 0.6  $\mu m$ . Le courant augmente de  $J_{sc} = 22.66 mA/cm^2$  jusqu'à  $J_{sc} = 27.78 mA/cm^2$  et le rendement de 14.4 % à 18.01 %. Par contre le  $V_{oc}$  et le FF ne présentent pas de variation notable.

### III.3.4 L'effet du dopage de l'émetteur (région $p^+-GaAs$ ) :

La figure III.13 présente la caractéristique (J-V) de la cellule solaire après l'irradiation par des protons (la fluence est égale à  $10^{13} cm^{-2}$ ) pour différentes valeurs de dopage de la région émetteur ( $p^+-GaAs$ ). Le tableau III.7 résume l'effet du dopage de la région  $p^+-GaAs$  sur les paramètres externes de la cellule.



**Figure III.13 :** (a) Caractéristique courant-tension, (b) Rendements quantiques de la cellule solaire  $p^+/n/n^+$  en  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Ge$  sous éclairage AM0 pour différentes valeurs de dopage de la région  $p^+-GaAs$ .



**Tableau III.7 :** Paramètres photovoltaïques de la cellule ( $p^+-Al_xGa_{1-x}As/n-GaAs/n^+-Ge$ ) pour différentes valeurs de dopage de la région  $p^+-GaAs$ .

	<b>Jsc(mA/cm2)</b>	<b>Voc(V)</b>	<b>FF</b>	<b>η(%)</b>
<b>Avant l'irradiation</b>	30.10	1.00	0.88	25.19
<b>1x10<sup>17</sup></b>	22.66	0.87	0.79	14.40
<b>5x10<sup>17</sup></b>	21.32	0.89	0.76	13.36
<b>1x10<sup>18</sup></b>	20.39	0.89	0.75	12.66

Les résultats obtenus dans le tableau III.7 indiquent qu'il y a une faible diminution des paramètres de sorties de la cellule lorsqu'on augmente le dopage de la région  $p^+-GaAs$ . La densité de courant et le rendement diminuent de  $J_{sc} = 22.66 \text{ mA/cm}^2$  jusqu'à  $J_{sc} = 20.39 \text{ mA/cm}^2$  et  $\eta = 14.40 \%$  jusqu'à  $\eta = 12.66 \%$  respectivement. La valeur de dopage de la région  $p^+-GaAs$  qui permet de diminuer l'effet d'irradiation par des protons est  $N_a = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

### III.4 Conclusion

Nous avons étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction ( $AlGaAs / GaAs / Ge$ ) de structure  $p^+nn^+$  par le logiciel de simulation Scaps. Nous avons présenté les résultats de la simulation aux conditions sous éclairage AM0 pour la cellule solaire ( $p^+-Al_xGa_{1-x}As / n-GaAs / n^+-Ge$ ) nous avons présenté, l'effet de la fluence d'irradiation par des protons, l'effet d'énergie d'activation des défauts, l'effet de la section efficace de capteur, l'effet de l'épaisseur de l'émetteur (région  $p^+-GaAs$ ) et l'effet du dopage de l'émetteur (région  $p^+-GaAs$ ). nous avons constaté une générale amélioration dans les caractéristiques photovoltaïques de la cellule ( $p^+-Al_xGa_{1-x}As / n-GaAs / n^+-Ge$ ) avec la diminution de l'épaisseur de l'émetteur, notamment dans la densité de courant de court circuit ( $J_{sc}$ ), et le rendement de conversion photovoltaïque  $\eta$ . La densité de courant de court circuit ( $J_{sc}$ ) s'améliore de  $22.66 \text{ mA/cm}^2$  à  $27.78 \text{ mA/cm}^2$  et le rendement de conversion photovoltaïque  $\eta$  s'améliore de  $14.40 \%$  à  $18.02 \%$ .

## *Conclusion générale*

## Conclusion générale

Nous avons étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire à base de (AlGaAs / GaAs/ Ge) de structure  $p^+nn^+$  sous éclairement AM0 par le logiciel de simulation SCAPS. En raison des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se penchent de plus en plus vers l'outil de simulation numérique comme un moyen complémentaire essentiel dans la prédiction, l'analyse et l'interprétation des résultats. Le logiciel SCAPS compte parmi les outils de simulation les plus développés dans l'étude des dispositifs électroniques et optoélectroniques.

Nous avons présenté les résultats de l'étude pour la cellule solaire ( $p^+ - Al_xGa_{1-x}As / p-GaAs / n^+ - Ge$ ), les paramètres de la cellule externes diminuent, la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ), le facteur de forme ( $FF$ ) et le rendement de conversion ( $\eta$ ). Le rendement de conversion est le paramètre le plus sensible, alors que le  $FF$  est le moins sensible avec l'augmentation de la fluence des protons. Le courant de court-circuit diminue de  $30.10 \text{ mA/cm}^2$  à  $22.66 \text{ mA/cm}^2$ . Le paramètre qui montre la moindre sensibilité à l'irradiation par les protons est le  $FF$ . Le rendement de conversion  $\eta$  de la cellule diminue de 25.19 % à 14.40 % est le paramètre le plus sensible. Pour la réponse spectrale sa sensibilité aux petites doses est toujours limitée dans la gamme des longueurs d'ondes grandes.

L'allure dégradée de la réponse spectrale dans le cas de la présence uniquement des pièges profonds est semblable aux cas de présence de tous les pièges. Donc on estime que l'effet de la dégradation des performances de la cellule est dominé par la présence des pièges profonds à électrons considérés comme centres de recombinaison.

D'après les résultats, nous avons constaté une générale amélioration dans les caractéristiques photovoltaïques de la cellule avec avec la diminution de l'épaisseur de la région de l'émetteur  $p^+ - GaAs$  de  $1 \mu m$  jusqu'à  $0.6 \mu m$ , notamment dans la densité de courant de court circuit ( $J_{sc}$ ), et le rendement de conversion photovoltaïque  $\eta$ . la densité de courant de court circuit  $J_{sc}$  s'améliore de  $J_{sc} = 22.66 \text{ mA/cm}^2$  à  $J_{sc} = 27.78 \text{ mA/cm}^2$  et le rendement de conversion photovoltaïque  $\eta$  s'améliore de 14.4 % à 18.01 %. Enfin la valeur de dopage de la région  $p^+ - GaAs$  qui permet de diminuer l'effet d'irradiation par des protons est  $Na = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

# *Références*

## *Références*

## *Références*

- [1] G, Adam. R, “ Modeling heterogeneous carbon nanotube networks for photovoltaic application using silvaco atlas software”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012
- [2] H. Beatrice Honsberg, “Design and Fabrication of Thin Light-Trapped GaAs Solar Cell”, University of Delaware. 1992.
- [3] S. Khlifi, “Modélisation d’une Cellule Solaire  $Ga_{1-x}Al_xAs(n)-GaAs(i)-GaAs(p)$ ”, Mémoire magistère, Universitaire de Béchar. 2003.
- [4] Cohen, J. D, “Semiconductors and Semimetals”, Pankove, J. I. ed. (Academic Press, Orlando), Vol. 21C, Chapter 2. (1984).
- [5] F. Therez, “ Les Cellules Photovoltaïques au Silicium et à l’Arséniure de Galium : Modèles de Fonctionnement, Expérimentation et Application aux Générateurs sous Concentration”, Thèse de Doctorat, Toulouse 1984.
- [6] H. Amar, “ Propriétés électriques de cellule solaire à base de Séléniure de Cuivre Indium Galium  $CuIn(1-x)Ga_xSe_2$  (CIGS) ”, Mémoire de magister, Biskra, 2014.
- [7] G. Bentoumi, “ Simulation et caractérisation d’un détecteur à neutron à base d’un scintillateur liquide linear alkyl benzene (LAB) chargé en bore”, Diplôme de maitrise ès sciences appliquées, Université de montréal, Aout, 2011.
- [8] Daniel Blanc, “ Les rayonnements ionisants”, Elsevier, Masson, 1999.
- [9] A .Labouret, M. Viloz, “énergie solaire photovoltaïque (le manuel du professionnel) ”, Dunod, 2003.
- [10] M.Orgeret, “ Les piles solaires le composant et ses applications ”. Masson, 1985.
- [11] P. Würfel, “ Physics of solar cells from principles to new concepts”, Wiley-VCH, 2005.
- [12] H. Amar, “ Propriétés électriques de cellule solaire à base de Séléniure de Cuivre Indium Galium  $CuIn(1-x)Ga_xSe_2$  (CIGS) ”, Mémoire de magister, Biskra, 2014.
- [13] D. Said, “Étude de lasers à base des composés semi-conducteurs (InP, GaAs, GaP)”, Mémoire magistère, Université El-Hadj Lakhder-Batna. 2011.

## **Références**

- [14] P. Wiirfel, "Physics of Solar Cells", Book, Université Karlsruhe, ©2005 WILEYVCH Verlag GmbH & CO, KGaA, Weinheim.
- [15] M. Boutillier, "Approche méthodologique de l'impact de l'environnement radiatif spatial sur les propriétés intrinsèques d'une diode laser", PH.D thèse, Université de Toulouse Paul Sabatier.
- [16] S. S. Li, R. Y. Loo, "Deep-level defects and numerical simulation of radiation damage in GaAs solar cells, Solar Cells", 31 (1991) 349-377.
- [17] M. Yamaguchi, "Radiation-resistant solar cells for space use, Solar Energy Materials & Solar Cells", 68 (2001) 31-53.
- [18] R. Loo et al, "High energy proton radiation damage to (AlGa)As-GaAs solar cells", Contract NAS1-14727, Final Rep., June 1979.
- [19] R. Y. Loo et al, "Medium energy proton radiation damage to (AlGa)As- GaAs solar cells ", Contract NAS1-15926, IEEE, 1984.
- [20] M. Gassoumi, " Etude des défauts électriquement actifs dans les composants hyperfréquences de puissance dans les filières SiC et GaN ", Thèse de Doctorat, Université de Monastir, 2006.
- [21] I. Sari-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled, " Etude de la jonction PN d'un semiconducteur a l'équilibre thermodynamique", Journal of Electron Devices, Vol. 5, 2007, pp. 122-126.
- [22] B. Vanderheyden, " Diodes `a jonction pn", cour, l'Université de Liège.
- [23] S. Alaa, " Caractérisation en impulsions étroites et modélisation de transistors bipolaires à hétérojonction en technologie InP", Thèse de Doctorat, Université de Limoges. 2009.
- [24] Attia, John Okyere. " Semiconductor Physics", Electronics and Circuit Analysis using MATLAB. Ed. John Okyere Attia Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- [25] A. Hamroun, " Transistor bipolaire à hétérojonction (HBT) AlGaIn/GaN : Modélisation et simulation des performances", Mémoire magistère, Université Abou bekr belkaid-Telemcen. 2011.

## **Références**

- [26] R. QUERE, S. VERDEYME, “ Méthodes d'analyses couplées pour la modélisation globale de composants et modules millimétriques de forte puissance”, Thèse Doctorat, Université de Limoges. 2002.
- [27] J. Lavery, “ Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2008.
- [28] M. AMARA, “ Propriétés Electroniques des Conducteurs et des Semi-Conducteurs”, rappels théoriques Plate-forme Matière Condensée et Cristallographie (MCC) C.E.S.I.R.E. Université J.Fourier Grenoble.
- [9] L. LASNE, “ Physique et technologie des composants de puissance”, université de Bordeaux 1, 2003.
- [30] O. Bonnaud, “ Physique des solides, des Semiconducteurs et Dispositif”, Université de Rennes 1, 2003.
- [31] A. BECHIRI, “ Effects du Desordre et du Substrate sur la Structure Electronique dans les Alliages Semi-Conducteurs III-V”, Thèse Doctorat D'état, Université Mentouri- Constantine UMC (ALGERIE). 2006.
- [32] T. DESRUES, “ Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière”, Thèse Doctorat, Ecole Doctorale Matériaux de Lyon. 2009.
- [33] K. Lagha-menouer, “ Etude et réalisation d'une cellule solaire multicouches du type Si-SiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub>-ZnO par APCVD”, Thèse Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 2011.
- [34] D. Said, “ Etude de lasers à base des composés semi-conducteurs (InP, GaAs, GaP)”, Mémoire magistère, Université El- Hadj Lakhder-Batna. 2011.
- [35] A. Bechiri, “ Effects du Desordre et du Substrate sur la Structure Electronique dans les Alliages Semi-Conducteurs III-V”, Thèse Doctorat D'état, Université Mentouri- Constantine UMC (ALGERIE). 2006.
- [36] H. Mathieu. «Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques», Dunod, Paris, 2009.

## ***Références***

[37] Le photovoltaïque–Module 3 – Fonctionnement et Technologies Novembre 2010 page 3, 4, 5, 6, 10.

[38] S. Khlifi, “ Modélisation d’une Cellule Solaire Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As(n)-GaAs(i)-GaAs(p)”, Mémoire magistère, Universitaire de Béchar. 2003.

[39] S. Alaa, “ Caractérisation en impulsions étroites et modélisation de transistors bipolaires à hétérojonction en technologie InP”, Thèse docteur, Université de Limoges. 2009.

[40] A. Hamroun, “ Transistor bipolaire à hétérojonction (HBT) AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> : Modélisation et simulation des performances”, Mémoire magistère, Université Abou bekr belkaid Telemcen. 2011.

[41] A. Moussa Diallo, “ Caractérisations optiques de structures photovoltaïques tri-jonction”, PH, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, Décembre 2011.

[42] Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Stefaan Degrave, Johan Verschraegen, Koen Decock, “ SCAPS manual ”, Version 24 April 2012.



## ملخص

قمنا بدراسة الخصائص الكهربائية للخلاية الشمسية من نوع ( $Al_xGa_{1-x}As / GaAs / Ge$ ) ذات البنية  $p^+nn^+$  تحت إضاءة AM0 بواسطة برنامج محاكاة SCAPS. قدمت نتائج دراسة الخلايا الشمسية ( $p^+ - Al_xGa_{1-x}As / p-GaAs / n^+ - Ge$ ) ، انخفاض في الوسائط الخارجية للخلاية ، جهد الدائرة المفتوحة ( $V_{oc}$ ) ، تيار الدائرة القصيرة -دائرة ( $J_{sc}$ ) ، عامل الشكل ( $FF$ ) وكفاءة التحويل ( $\eta$ ). كفاءة التحويل هو الوسيط الأكثر حساسية والاكثر تائرا، في حين أن  $FF$  هو الأقل حساسية. مع زيادة اشعاع البروتونات ينخفض تيار الدائرة القصيرة من  $30 mA / cm^2$  إلى  $22.66 mA / cm^2$ . تقل كفاءة التحويل  $\eta$  للخلاية من 25.19% إلى 14.40%. الاستجابة الطيفية ، يكون تأثيرها محدود دائما في مدى الطول الموجي الطويل. كما ان التدهور في حالة وجود مصائد عميقة فقط هو نفسه في حالة وجود جميع المصائد و ذلك لأن المسؤول عن التدهور هو المصائد العميقة التي تعتبر مراكز إلتحام. ووفقا للنتائج ، لاحظنا تحسنا عاما في الوسائط الخارجية للخلاية مع تناقص سماكة منطقة  $p$  من  $1.0 \mu m$  إلى  $0.6 \mu m$  ، خاصة في الكثافة تيار الدائرة القصيرة ( $J_{sc}$ ) ، وكفاءة التحويل  $\eta$ . تتحسن كثافة تيار الدائرة القصيرة من  $J_{sc} = 22.66 mA / cm^2$  إلى  $J_{sc} = 27.78 mA / cm^2$  وتتحسن كفاءة التحويل  $\eta$  من 14.4% إلى 18.01%. إضافة الى ان احسن قيمة للتطعيم للمنطقة  $p^+ - GaAs$  التي تجعل من الممكن تقليل تأثير اشعاع البروتونات هي  $Na = 1 \times 10^{17} cm^{-3}$  لتحسين الوسائط الخارجية للخلاية.

## Résumé

Nous avons étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire à base de ( $AlGaAs / GaAs / Ge$ ) de structure  $p^+nn^+$  sous éclairage AM0 par le logiciel de simulation SCAPS. Nous avons présenté les résultats de l'étude pour la cellule solaire ( $p^+ - Al_xGa_{1-x}As / p-GaAs / n^+ - Ge$ ), les paramètres de la cellule externes diminuent, la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ), le facteur de forme ( $FF$ ) et le rendement de conversion ( $\eta$ ). Le rendement de conversion est le paramètre le plus sensible, alors que le  $FF$  est le moins sensible avec l'augmentation de la fluence des protons. Le courant de court-circuit diminue de  $30.10 mA/cm^2$  à  $22.66 mA/cm^2$ . Le rendement de conversion  $\eta$  de la cellule diminue de 25.19 % à 14.40 % est le paramètre le plus sensible. Pour la réponse spectrale sa sensibilité aux petites doses est toujours limitée dans la gamme des longueurs d'ondes grandes. L'allure dégradée de la réponse spectrale dans le cas de la présence uniquement des pièges profonds est semblable aux cas de présence de tous les pièges. Donc on estime que l'effet de la dégradation des performances de la cellule est dominé par la présence des pièges profonds à électrons considérés comme centres de recombinaison. D'après les résultats, nous avons constaté une générale amélioration dans les caractéristiques photovoltaïques de la cellule avec avec la diminution de l'épaisseur de la région de l'émetteur  $p^+ - GaAs$  de  $1 \mu m$  jusqu'à  $0.6 \mu m$ , notamment dans la densité de courant de court circuit ( $J_{sc}$ ), et le rendement de conversion photovoltaïque  $\eta$ . la densité de courant de court circuit  $J_{sc}$  s'améliore de  $J_{sc} = 22.66 mA/cm^2$  à  $J_{sc} = 27.78 mA/cm^2$  et le rendement de conversion photovoltaïque  $\eta$  s'améliore de 14.4 % à 18.01 %. La valeur de dopage de la région  $p^+ - GaAs$  qui permet de diminuer l'effet d'irradiation par des protons est  $Na = 1 \times 10^{17} cm^{-3}$  pour améliorer les caractéristiques photovoltaïques de la cellule