

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد حطاب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme

Proposé par : Monsieur Said Nacer

Master en Electronique

Spécialité microélectronique

Année Universitaire 2020-2021
présenté par

Lahir Rayan

&

Ben Yahia Haciba

Etude et simulation d'une cellule solaire Schottky

" Celui qui ne remercie pas les gens ne remercie pas Dieu ".

En tout premier lieu, nous remercions le bon Dieu, tout puissant, de nous avoir donné la force pour mener à bien nos études, ainsi que les ressources nécessaires pour dépasser toutes les difficultés auxquelles nous avons du faire face. Avec nos plus belles expressions de respect, nous adressons nos remerciements les plus sincères à notre encadreur, monsieur Nacer pour avoir accepté de nous prendre en charge lors de la création de ce mémoire. Grâce à sa présence, ses conseils et ses remarques, nous avons pu réaliser ce travail dans les meilleures conditions. Nos remerciements vont également aux membres du jury qui nous font l'honneur d'examiner notre mémoire. ungenereux et sincère remerciement également à tous ceux ayant pu nous ont aidés de près ou de loin, à la réalisation de ce travail de recherche.

Dédicaces

A mon très cher père,

ce surhomme qui a toujours été et restera toujours mon mentor et mon exemple en toutes choses, à mon super-héro qui a sacrifié tous ce qu'il pouvait pour nous voir heureux, je te remercie pour les valeurs nobles que tu m'a inculqué par ton éducation. Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail soit pour toi, la concrétisation de ma gratitude et mon affection. Que Dieu prolonge sa vie

A ma très chère mère,

la source de ma force et de tout mes efforts. C'est l'être la plus chère et la plus précieuse qui soit à mes yeux, celle qui ma permis d'etre ce que je suis actuellement. Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été précieux pour affronter les différents obstacles. Ma chère mère que Dieu prolonge sa vie

A mon très chers frère Isslem et ma jolie sœur Imene Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite

A ma meilleure amie et ma binômelahrirrayanne pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet. A mon meilleur professeur monsieur SaidNacer

A ma famille (mes cousines et mes cousins mes tantes et mes oncles), mes proches (wassila, amira, chahra, rayane) qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime.

Merci !

Dedicace

A mon papa, qui a sacrifié tout ce qu'il pouvait pour nous voir heureux, je te remercie pour les valeurs nobles que tu m'a inculqué par ton éducation. Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail soit pour toi, la concrétisation de ma gratitude et mon affection. Que Dieu te garde

A ma très chère maman, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurais point te remercier comme il se doit. Ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été précieuse pour affronter les différents obstacles. Que Dieu prolonge ta vie

A mon très cher frère Amir et ma jolie sœur Aridj Puisse Dieu vous donner santé, bonheur, courage et surtout réussite

A ma meilleure amie et ma binôme Hassiba pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

A mon meilleur professeur monsieur Said Nacer Mercid'avoir été si patient avec moi et de m'avoir aidé dans les moments les plus difficiles. Vous êtes un excellent professeur que beaucoup d'étudiants aimeraient avoir.

A mon petit chat adoré Leo

A ma famille (mes cousines et mes cousins mes tantes et mes oncles), mes proches (Yasmine, Nihad, Nesrine, Amira Cham,) qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

ملخص:

ركز العمل المقدم في هذه المذكرة على دراسة و محاكاة الخلايا الشمسية من نوع Schottky القائمة على GaAs، بهدف تحسين أدائها الكهروضوئي. لقد قمنا بتحليل تأثيرات العديد من الإعدادات الهيكلية و هي العمل الناتج ، المنشطات و سمك الركيزة على الإعدادات الكهربائية للخلايا الشمسية مثل جهد الدائرة المفتوحة V_{co} ، تيار الدائرة القصيرة I_{cc} و مردود التحويل η .

وفقا لنتائج المحاكاة التي اجريناها، فان تحسين الإعدادات الهيكلية لخلية Schottky GaAs الشمسية يجعل من الممكن تحقيق مردود التحويل يبلغ حوالي 24.13 %، مما يدل على الإمكانيات الكبيرة لهذه الخلايا الشمسية من حيث تحسين المردود . التحويل مع تقليل تكاليف التصنيع.

كلمات المفاتيح: Schottky؛ الكهروضوئي ؛ المردود

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur l'étude et la simulation d'une cellule solaire type Schottky à base de GaAs, dans le but d'améliorer leurs performances photovoltaïques. Nous avons analysé les effets de plusieurs paramètres structuraux à savoir le travail de sortie, le dopage et l'épaisseur du substrat sur les paramètres électriques des cellules solaires tels que la tension de circuit ouvert V_{co} , le courant de court-circuit I_{cc} et le rendement de conversion η .

Selon nos résultats de simulation, l'optimisation des paramètres structuraux d'une cellule solaire Schottky GaAs permet d'atteindre un rendement de conversion de l'ordre de 24.13 % démontrant ainsi les potentialités importantes de ces cellules solaires en termes d'amélioration du rendement de conversion tout en réduisant les coûts de fabrication.

Mots clés : Schottky ; photovoltaïque; rendement .

Abstract:

The work described in this thesis was centered on the investigation and modeling of GaAs-based Schottky-type solar cells in attempt to improve their photovoltaic performance. We examined / studied the effects of numerous structural factors on electrical parameters of solar cells η .

According to our simulation/modeling results, optimizing the structural characteristics of a Schottky GaAs solar cell allows for a conversion efficiency of about 24.13 percent, highlighting the enormous potential of these solar cells for boosting conversion efficiency while lowering manufacturing costs.

Keywords: Schottky; photovoltaic; efficiency.

Listes des acronymes et abréviations

P_{in} La puissance lumineuse incidente

H Le rendement de conversion

R_{se} résistance en série

R_{sh} résistance en parallèle

FF Le facteur de forme

I_{ph} Le courant photogénéré

I_0 Le courant de saturation de la diode.

T La température absolue.

q La charge électrique

k La constante de Boltzmann

V_{co} La tension en circuit ouvert

G le taux de génération

L_n les longueurs de diffusion des électrons

L_p les longueurs de diffusion des trous

I_{cc} Le courant de court-circuit

P_m La puissance maximale

D Diode matérialisant

R_{sh} Résistance shunt

G_i Source de courant parfaite

A constante du matériau

h est la constante de Planck.

λ la longueur d'onde

n La concentration d'électron libre

P La concentration de trous libre

BV La bande de valence

BC La bande de conduction

C la Vitesse de la lumière

ν la fréquence

E énergie de photon

n_i La concentration intrinsèque des porteurs

I(V) caractéristique courant tension

ϕ_m travail de sortie du métal

Φ_s travail de sortie du semi-conducteur

E_{fm} niveau de Fermi du métal

E_{fs} niveau de Fermi du semi-conducteur

E_f niveau de Fermi

χ_s affinité électronique

NV niveau du vide

EC la bande de conduction

EV la bande de valence

J densité de courant d'émission

W Fonction de travail du métal

λ_R Facteur de correction spécifique au matériau.

$U_N E_0$ constante universelle

ΔW le champ électrique

V tension de diffusion

Φ_b barrière de potentiel

V_b le potentiel de barrière

ZCE zone de charge d'espace

HF haut fréquence

Eg la largeur de la bande interdite

V la tension appliquée (V)

Is le courant de saturation de la diode

A la constante de Richardson

h la constante de Planck

m la masse effective des électrons.

S la surface de la diode

ϵ_0 la permittivité du vide

ϵ_{sc} la permittivité relative du diamant

T température du metal

α_0 constante qui dépend du matériau

R coefficient de réflexion.

x la profondeur.

A le coefficient d'absorption

$\Delta_{n,p}$ densités des porteurs générés.

$\tau_{n,p}$ la durée de vie des porteurs.

N_A, N_D concentration des accepteurs et des 'donneurs ionisés.

ϵ permittivité diélectrique du semi-conducteur.

V le potentiel électrostatique

$\rho(x)$ la densité de charges

G le taux de génération.

R le taux de recombinaison

μ_n et μ_p mobilité des électrons et des trous.

D_n et D_p coefficient de diffusion des électrons et des trous.

AM masse d'air

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	1
<i>Chapitre 1 Notions fondamentales sur les semi-conducteurs et les cellules solaires</i> 3	
1.1 Introduction	3
1.2 Le rayonnement solaire	3
1.3 Le spectre solaire.....	5
1.4 Le corps noir	6
1.5 Matériaux semi-conducteurs.....	7
1.5.1 Semi-conducteur intrinsèque	8
1.5.2 Semi-conducteur dopé ou extrinsèque.....	9
1.6 L'absorption	10
1.7 Génération optique.....	11
1.8 Recombinaison.....	11
1.8.1 Par rapport au mécanisme de disparition.....	11
1.8.2 Par rapport aux échanges d'énergie	12
1.9 Equations de transport dans les semi-conducteurs.....	12
1.9.1 Equation de Poisson	12
1.9.2 Equation de continuité.....	12
1.9.3 Les densités de courant des électrons et des trous.....	13
1.10 La jonction PN.....	13
1.11 L'Effet Photovoltaïque.....	14
1.12 La cellule solaire.....	15
1.13 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque	16
1.14 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	17
1.15 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	18
1.16 Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire	19
1.16.1 Le courant de court-circuit I_{cc}	19
1.16.2 La tension de circuit ouvert V_{co}	19

1.16.3	Le facteur de forme FF	20
1.16.4	Le rendement de conversion η	20
1.17	Conclusion.....	20
Chapitre 2	<i>Etude du contact métal semiconducteur</i>	21
2.1	Introduction	21
2.2	La structure-métal-semiconducteur	21
2.3	Travail de sortie.....	22
2.4	Affinité électronique.....	22
2.5	Le contact métal semi-conducteur	23
2.5.1	Le contact redresseur	23
2.5.2	Semi-conducteur de type n	23
2.5.3	Cas où $q\Phi_m > q\Phi_{sc}$ et le semiconducteur de type N	24
2.5.4	Cas où $q\Phi_m < q\Phi_s$ et le semiconducteur est de type n	25
2.5.5	Cas où $q\Phi_m = q\Phi_s$	26
2.5.6	Cas ou $q\Phi_m > q\Phi_s$ et le semiconducteur est de type p.....	27
2.5.7	Cas ou $q\Phi_m < q\Phi_s$ et le semiconducteur est de type p.....	27
2.6	L'arséniure de Gallium (GaAs).....	28
2.7	Structure et propriétés de l'arséniure de gallium (GaAs).....	29
2.8	Conclusion.....	30
Chapitre 3	<i>Simulation, résultats et interprétations</i>	31
3.1	Introduction	31
3.2	Présentation de la cellule à étudier	31
3.3	Logiciel de Simulation des caractéristiques électriques	31
3.3.1	Logiciel Comsol Multiphysics	32
3.4	Simulations et Interprétations	32
3.5	Coefficient absorption.....	33
3.6	Effet du travail de sortie du métal (contact Schottky).....	33
3.6.1	Caractéristiques courant-tension J(V)	33
3.6.2	Caractéristiques puissance-tension P(V)	34

3.7 Influence de phi sur les paramètres photovoltaïques.....	35
3.8 Effet du dopage de la couche active.....	36
3.8.1 Caractéristiques courant-tension J(V)	36
3.8.2 Caractéristiques puissance-tension P(V)	37
3.9 Influence du dopage de la couche GaAs.....	38
3.10 Effet de l'épaisseur de la couche active	39
3.10.1 Caractéristiques courant tension J(V).....	39
3.10.2 Caractéristiques puissance-tension P(V)	40
3.11 Influence de l'épaisseur de la couche GaAs.....	41
3.12 Cellule optimisée.....	42
3.13 Conclusion.....	43
Conclusion Générale	44
<i>Bibliographie.....</i>	45

Liste des figures :

Figure 1.1 Composantes du rayonnement solaire qui arrivent au sol sous forme diffuse [5]	5
Figure 1.2 Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 [6].....	6
Figure 1.3 L'irradiation spectrale (AM0, AM1,5G, corps noir) en fonction de la longueur d'onde [7].....	7
Figure 1.4 Libération d'un électron par l'atome de phosphore et schéma des bandes.....	10
Figure 1.5. Libération d'un trou par l'atome de bore et schéma des bandes.[11].....	10
Figure 1.6. a-Jonction avant diffusion, b- jonction après diffusion.....	14
Figure 1.7 Jonction PN à l'équilibre thermodynamique. a) Charge d'espace, b) Champ électrique, c) Potentiel électrostatique.[17].....	15
Figure 1.8. Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire.....	16
Figure 1.9 Principe de la conversion photovoltaïque.....	17
Figure 1.10 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	18
Figure 1.11. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque[22].....	19
Figure 1.12. Les différentes zones de la caractéristique I(V).....	19
Figure 2.1 La structure métal-semiconducteur.....	22
Figure 2.2 Travail de sortie d'un métal [20].....	23
Figure 2.3. Affinité électronique [22].....	24
Figure 2.4. Polarisation du contact M/Sc (n).....	25
Figure 2.5. Contact métal-semiconducteur type N.....	26
Figure 2.6. Cas où $q\Phi_m < q\Phi_s$ et le semiconducteur est de type n	27
Figure 2.7. Cas où $q\Phi_m = q\Phi_s$ (régime des bandes plates).....	27
Figure 2.8. Cas où $q\Phi_m > q\Phi_s$ et le semiconducteur est de type P	28
Figure 2.9. Cas où $q\Phi_m < q\Phi_s$ et le semiconducteur est de type P	29

Figure 2 .10. Structure cristalline du GaAs (structure zinc blende) et (B) structure de bande du GaAs [24].....	30
Figure 3.1 Schéma de la cellule solaire Schottky à base de GaAs.....	32
Figure 3.2. Coefficient d'absorption du GaAs[28].....	33
Figure 3.3. Caractéristiques courant-tension pour différentesvaleurs du travail de sortie phi du métal	34
Figure 3.4. Caractéristiques puissance-tension pour différentesvaleurs du travail de sortie (phi) du métal.....	34
Figure 3.5. Variation des paramètresphotovoltaïquesenfonction du travail de sortie du métal contact Schottky (phi). (a) tension de circuit ouvertVco, (b) courant de court-circuit Jcc, (c) le rendement η	36
Figure 3.6. Caractéristiques courant-tension pour différentesvaleurs de ND de la couche GaAs.....	37
Figure 3.7. Caractéristiques puissance/ tension pour différentesvaleurs de ND de la couche Ga.....	37
Figure 3.8. Variation des paramètresphotovoltaïqueenfonction du dopage de la couche active. (a) Courant de court-circuit Jcc, (b) tension de circuit ouvertVco , (c) le rendement η	39
Figure 3.9. Caractéristiques courant/ tension pour différentesvaleurs de l'épaisseur de la couche GaAs	40
Figure 3.10. Caractéristiques puissance/ tension pour différentesvaleurs de l'épaisseur (d) de la couche GaAs.....	40
Figure 3.11. Variation des paramètresphotovoltaïquesenfonction de l'épaisseur de la couche active. (a) courant de court-circuit Jcc, (b) la tension de circuit ouvert VCO, (c) le rendement η	42
Figure 3.12. caractéristique courant tension de la cellule optimisé	43

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Différents types de contacts d'une structure M-Sc.....	29
Tableau 2.2 : Paramètres physiques et électriques du GaAs [26] [27].....	31
Tableau 3.1 resume les paramètres utilisés dans la simulation.....	32
Tableau 3.2 paramètres et valeurs d'optimisation.....	43

Introduction générale

Le développement scientifique et technologique que connaît le monde a généré des problèmes liés à la surconsommation de l'énergie qui se répercutent négativement sur l'environnement et l'équilibre de notre planète terre. La satisfaction des besoins énergétiques est un problème qui se pose avec acuité et suscite l'engouement des pays riches à prospecter de nouveaux sites d'énergies fossiles et à se donner les moyens matériels pour le développement des énergies renouvelables qui présentent l'unique alternative après épuisement des énergies fossiles.

Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir des sources ou des ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine. Les énergies renouvelables sont également désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres ».

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure.

Le module photovoltaïque est lui-même constitué de plusieurs cellules interconnectées électriquement en série ou en parallèle de manière à produire de l'électricité à une certaine tension. L'efficacité d'un module PV est évaluée par son rendement de conversion qui est le rapport entre l'énergie solaire arrivant sur le module et l'énergie électrique produite par celui-ci. Les rendements des modules dépendent en grande partie du type de cellules utilisées pendant la fabrication de celui-ci.

Une grande variété de cellules PV existe, on peut les distinguer en trois grandes familles

- 1^{ère} génération : cellules cristallines

- 2 èmegénération : couches minces ("thin films")
- 3 èmegénération : multijonction, cellules à concentration, ...etc

Dans le but d'améliorer le rendement des cellules solaires Schottky (1ère génération) plusieurs recherches au niveau des laboratoires leurs sont consacrées en utilisant la simulation numérique, c'est dans ce contexte que se situe notre travail, qui se divise en trois chapitres comme suit :

Le premier chapitre présente un rappel général sur le rayonnement solaire, quelques notions fondamentales des semi-conducteurs et de la jonction p-n ainsi que l'effet photovoltaïque et les cellules solaires.

Le deuxième chapitre portera sur l'étude d'une cellule solaire schottky. En premier lieu les notions de base concernant la structure physique du métal semi-conducteur y sont présentées. On insistera sur les grandeurs physiques du contact métal-semiconducteur. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée au matériau GaAs (structure et caractéristiques).

Le dernier chapitre présente la simulation numérique, par le logiciel COMSOL multiphysics, d'une cellule solaire Schottky à base de GaAs. Une interprétation des résultats.

Enfin, le mémoire se termine par une conclusion générale récapitulant les résultats obtenus au cours de la simulation et donne quelques critères s'inscrivant dans la perspective d'une meilleure efficacité des cellules solaires Schottky à base de GaAs.

Chapitre1 Notions fondamentales sur les semi-conducteurs et les cellules solaires

1.1 Introduction

L'énergie solaire est une ressource inépuisable à travers le temps et s'inscrit pleinement pour l'ensemble de l'humanité, dans une perspective environnementale viable et durable. L'énergie solaire apporte la solution au problème de l'épuisement des combustibles fossiles. Représentant un des plus grands défis du siècle auxquels l'Homme doit faire face. La cellule solaire est l'élément essentiel assurant la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, pour la fournir dans une charge adaptée de manière efficace. L'interaction entre la lumière et le semi-conducteur constituant la cellule solaire s'accompagne de différents phénomènes physiques tels que la génération et la recombinaison. Cette dernière dépend fortement du matériel semi-conducteur choisi. En conséquence, dans ce chapitre nous présenterons quelques notions générales sur le rayonnement solaire et sur les semi-conducteurs, puis dans la seconde partie nous présenterons quelques notions générales sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque.

1.2 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire se définit comme étant une source d'énergie constitué de flux d'ondes électromagnétique projeté en dehors du Soleil (atteignant notamment la Terre) et dont l'origine se trouve dans les réactions thermonucléaires produites au cœur du Soleil dans son noyau. Ces réactions libérant une très grande quantité d'énergie finissent littéralement par créer les rayonnements solaires. Les ondes électromagnétiques formant le rayonnement solaire se composent d'ultraviolets, de lumières visibles, d'ondes radio et autres rayons cosmiques.

Les rayons solaires dans l'espace allant en direction de la Terre sont généralement absorbés de manière partielle et seulement une partie finie peut atteindre notre planète.

Une fois que le rayonnement solaire eut atteint la Terre, une autre partie (les ondes) se voit réfléchir par l'ionosphère ainsi que l'atmosphère.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

L'énergie (ici le E) correspond à celles de chaque photon (particules composant le rayonnement solaire) liée à la longueur d'ondes comme explicité ci-dessus. Le h correspondant à la constante de Planck et c correspond à la vitesse de propagation du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire se distingue en plusieurs catégories,

- a) **Rayonnement solaire direct** : Celle-ci désigne les rayonnements solaires émanant directement du Soleil dans un flux uniforme sans avoir subi d'altérations de la part de l'environnement comme l'atmosphère.
- b) **Rayonnement solaire diffus** : Comme la précédente, elle désigne les rayonnements solaires émanant directement du Soleil à la différence que celles-ci ont été altérées par l'atmosphère notamment sur leur direction qui n'est plus uniforme. On parle de diffusion en une multitude de faisceaux allant sur une multitude de directions.
- c) **Rayonnement solaire réfléchi** : Celui-ci n'émane pas directement du Soleil mais émane d'une réflexion lumineuse à partir d'une surface terrestre comme le sol, la neige, l'eau ... etc[1-4]

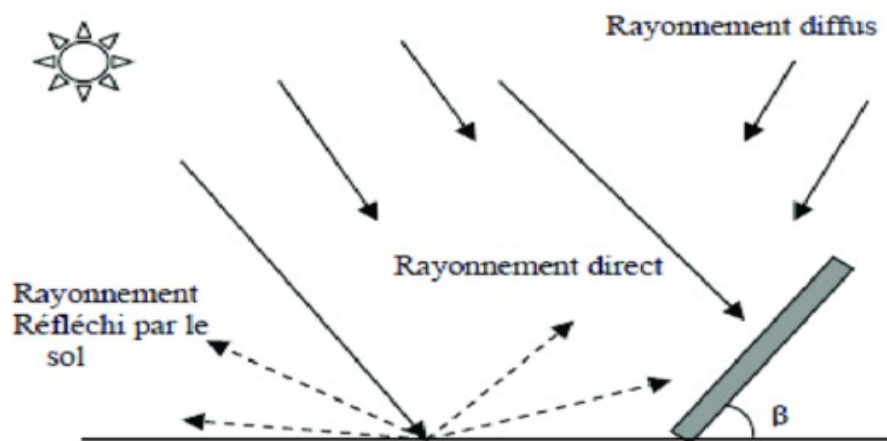


Figure 1.1. composantes du rayonnement solaire qui arrivent au sol sous forme diffuse [5]

1.3 Le spectre solaire

Le spectre du soleil c'est sa décomposition en longueurs d'onde. La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde.

Ce n'est qu'au XXe siècle que seront enfin réconciliées ces deux théories dites ondulatoire et corpusculaire de la lumière, grâce à la découverte du photon par Planck et Einstein. Car en pratique la lumière a bien une double nature :

C'est une onde électromagnétique, soit une oscillation périodique, caractérisée par sa longueur d'onde λ ou sa fréquence ν ; plus la fréquence est élevée plus la longueur d'onde est faible et inversement :

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1.2)$$

Où c 'est la célérité de la lumière.

C'est aussi un faisceau de photons qui sont comme des "grains de lumière" porteurs d'une quantité d'énergie, qui dépend de leur longueur d'onde. Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre $0.2\mu\text{m}$ (ultraviolet) et $4\mu\text{m}$ (infrarouge), avec un maximum d'énergie pour $0.5\mu\text{m}$. 97.5% de l'énergie solaire est comprise entre $0.2\mu\text{m}$ et $2.5\mu\text{m}$. De $0.4\mu\text{m}$ à $0.78\mu\text{m}$, le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes, pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

Comme nous avons cité auparavant, le soleil produit une énergie incommensurable, elle équivaut à plus de 7000 fois l'énergie consommée par l'humanité. Mais cette énergie n'est pas facile à capter, l'homme a développé des techniques pour utiliser l'énergie du soleil.

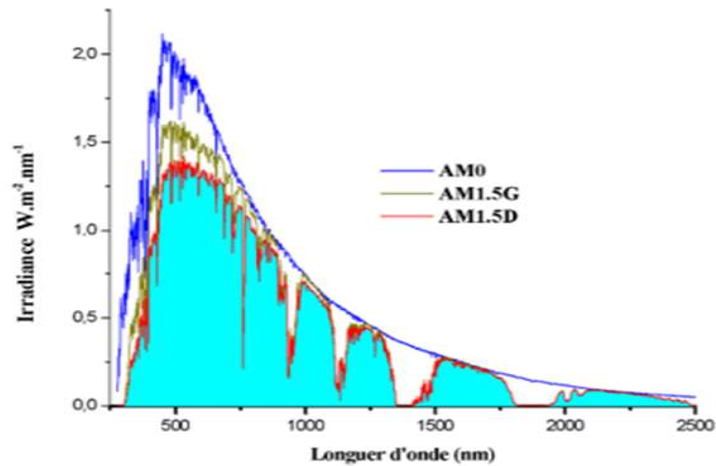


Figure 1.2. Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 [6]

- AM0 représente le spectre solaire en dehors de l'atmosphère, sa puissance est de 1350W/m^2 ,
- AM1 correspond au soleil à la verticale $\theta=0^\circ$ avec une puissance d'incidence de 925W/m^2 ,
- AM2 est obtenu pour un angle de 60° et à une puissance d'environ 691W/m^2 ,
- AM1.5 définis par l'angle 48.2° au-dessus de l'horizon, d'une intensité de 844W/m^2 est approprié pour les applications terrestres.
- La Figure 1.2 montre trois courbes liées à la radiation spectrale solaire qui est la puissance par unité de superficie par unité de longueur d'onde.
- AM1.5G ; G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, c'est le spectre standard le plus étudié qui donne une irradiance de 970W/m^2 , mais a été arrondi à 1kW/m^2 .
- AM1.5D ; qui ne tient compte que des radiations directes[6].

1.4 Le corps noir

Un corps noir est un corps qui absorbe, sans réfléchir ni diffuser, toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit. Ainsi, une boîte avec une toute petite ouverture est

généralement une bonne approximation d'un corps noir. Un tel "corps noir" reçoit de l'énergie, s'il n'en émettait pas, sa température augmenterait indéfiniment. Ceci est irréaliste, un corps noir réémet donc l'énergie qu'il a absorbée sous forme de rayonnements électromagnétiques. La quantité d'énergie réémise dépend de sa température. Ainsi, on a la loi de Stefan-Boltzmann qui donne la valeur de l'énergie émise en fonction de la température du corps noir

$$M_T = \sigma \cdot T^4 \quad (1.3)$$

Avec :

M_T , l'émittance totale d'un corps noir (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

T, la température du corps noir (en K)

σ , la constante de Stefan-Boltzmann

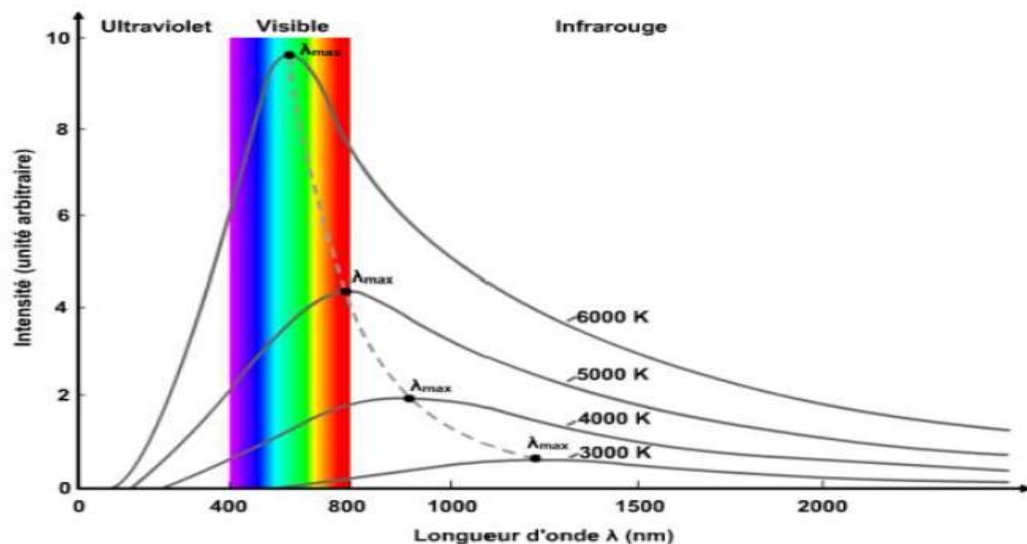


Figure 1.3. L'irradiation spectrale (AM0,AM1,5G, corps noir) en fonction de la longueur d'onde [7]

1.5 Matériaux semi-conducteurs

Les semi-conducteurs ont acquis une importance considérable dans notre société. Ils sont à la base de tous les composants électroniques et optoélectroniques qui entrent dans les dispositifs informatiques, de télécommunications, de télévisions, d'automobiles, d'appareils électroménagers et globalement tout dispositif électronique à minima complexe requérant l'utilisation de semi-conducteurs. Les semi-conducteurs sont des matériaux présentant une conductivité électrique intermédiaire entre les métaux (conducteurs) et les isolants. Un semi-conducteur est un isolant pour une température de 0K (zéro absolu), contrairement à un métal. Ils sont désignés comme étant les éléments de la colonne IV du tableau périodique comme (Si, Ge) ou les composés de

combinaison d'élément de groupe III-V (GaAs, GaN) ou II-IV (ZnS, CdTe). Il existe également d'autres semi-conducteurs composés de trois éléments ou plus.

Un semiconducteur peut être soit pur (intrinsèque), soit dopé par des impuretés (extrinsèques) qui permettent de contrôler sa résistivité.

1.5.1 Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur non dopé, c'est à dire qu'il contient peu d'impuretés (atomes étrangers), pour une température différente de 0K, des électrons peuvent devenir libres c'est-à-dire passer de la bande de valence à la bande de conduction (leur concentration notée n) ces électrons laissent des trous dans la BV (avec une concentration notée p) eux -aussi libres de se déplacer avec une égalité entre les concentrations n et p .

Pour ce cas particulier, nous définissons une concentration intrinsèque n_i (égal aux concentrations n et p) pour laquelle est donnée par la relation :

$$n = p = n_i = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (1.4)$$

A : constante du matériau

E_g : hauteur de la bande interdite (eV)

k : constante de Boltzmann

T : température absolue en K [8]

La conductivité intrinsèque d'un cristal semi-conducteur est liée à son nombre de porteurs de charge intrinsèques (électrons et trous). La libération d'un électron de conduction, c'est-à-dire son passage de la bande de valence à la bande de conduction laisse un trou dans la bande de valence, qui participe à la conduction électrique comme un électron de charge électrique positive.

La formation d'une paire électron-trou est d'autant plus facile que le gap, différence d'énergie entre la bande de conduction et la bande de valence, est faible. [9]

1.5.2 Semi-conducteur dopé ou extrinsèque

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques. L'introduction des dopants crée des états accessibles à l'intérieur de ces bandes et rend le gap plus adapté à l'utilisation du semi-conducteur. On classe ces semi-conducteurs suivant le type de dopage.

a) Dopage type N

Celui-ci consiste à augmenter la densité en électrons dans le semi-conducteur intrinsèque par insertion de traces d'atomes riches en électrons (atomes donneurs) dans le matériel. Dans le cas du silicium, les atomes de « si » ont quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome de « si » voisin par une liaison covalente. Pour doper le silicium en n, on inclut un atome ayant cinq électrons de valence comme ceux de la colonne V de la table périodique (généralement le phosphore). Cet atome incorporé dans le réseau cristallin présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre. Ce cinquième électron, qui n'est pas un électron de liaison n'est que faiblement lié à l'atome et se situe à un niveau d'énergie E_D proche de la bande de conduction (figure 1.4). Le niveau de Fermi se rapproche de la bande de conduction. Comme l'excitation de ces électrons ne conduit pas à la formation de trous. Le nombre d'électrons dépasse de loin le nombre de trous. Les électrons sont des porteurs majoritaires et les trous des porteurs minoritaires. Le silicium est alors dit de type n.

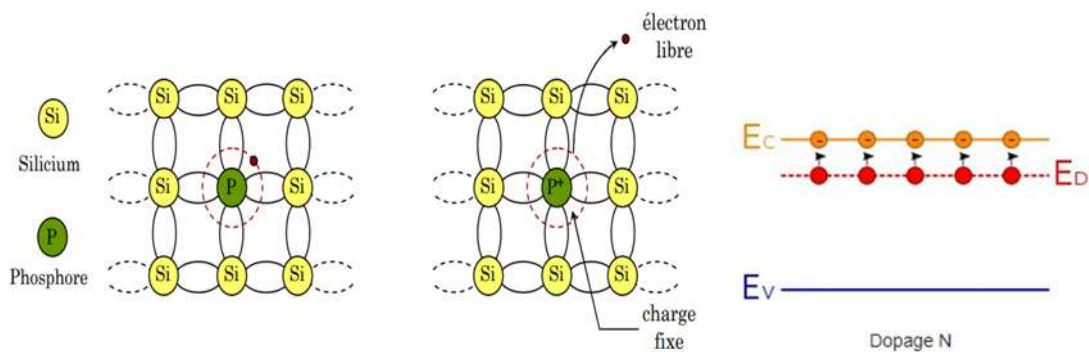


Figure 1.4 Libération d'un électron par l'atome de phosphore et schéma des bandes.

b) Dopage type P

Celui-ci consiste à augmenter la densité en trous dans le semi-conducteur intrinsèque en insérant un certain nombre d'atomes pauvres en électrons (atomes

accepteurs) dans le semi-conducteur afin de créer un excès de trous dans le silicium. Nous incluons un atome trivalent (colonne III du tableau périodique) généralement un atome de bore. Cet atome n'ayant que trois électrons de valence, il ne peut créer que trois liaisons covalentes avec ses quatre voisins créant ainsi un trou dans la structure. Trou qui pourra être rempli par un électron issu d'un atome de silicium voisin, déplaçant ainsi le trou quand le dopage est suffisant. Le nombre de trous dépasse de loin le nombre d'électrons. Les trous sont alors des porteurs majoritaires et les électrons sont des porteurs minoritaires. Le silicium est dit de type p. le niveau d'énergie E_a des électrons sur un atome accepteur est situé juste au-dessus de la bande de valence (figure 1.5). Dans ce cas, le niveau de Fermi a tendance à se rapprocher de la bande de valence [10].

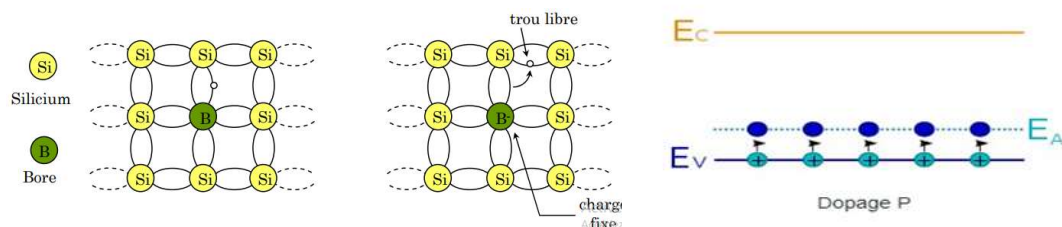


Figure 1.5. : Libération d'un trou par l'atome de bore et schéma des bandes.[11]

1.6 L'absorption

La lumière absorbée par le matériau photovoltaïque est transformée en énergie électrique. En effet les spectres solaires sont exploités différemment par le matériau avec une certaine efficacité par laquelle il transforme le rayonnement d'une longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau, l'une de ces caractéristiques est le coefficient d'absorption α . Il définit la quantité de lumière absorbée par le matériau et peut être exprimé par :

$$\alpha = \alpha_0 \sqrt{E - E_g} \quad (1.5)$$

Avec :

- α_0 : constante qui dépend du matériau.
- E : énergie du photon.
- E_g : énergie de gap.

1.7 Génération optique

Il existe deux types de générations: génération intrinsèque (bande à bande) et génération extrinsèque (par l'intermédiaire du niveau de dopage ou de piège). La génération band to band peut se produire quand un électron passe directement dans la bande de conduction. Ceci peut se produire par l'absorption de la lumière : photo génération. Les centres d'impuretés peuvent être utilisés pour la génération, l'électron n'aurait pas besoin d'autant d'énergie pour atteindre la bande de conduction comme le cas de génération bande à bande.

En général pour être efficace, l'excitation d'un électron du sommet de la bande de valence vers la bande de conduction exige une énergie lumineuse supérieure à la bande interdite.[12]

L'expression du taux de génération est :

$$G_{opt} = (1 - R). \alpha. e^{-\alpha x} (1.6)$$

Avec :

- R : coefficient de réflexion.
- x : la profondeur.
- α : le coefficient d'absorption.

1.8 Recombinaison

Le processus de génération de porteurs est équilibré par un processus de disparition appelé "recombinaison". Par définition la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou de la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que pour un temps faible ($t < 10^{-8}$ s)[13]

La recombinaison peut avoir plusieurs formes :[14]

1.8.1 Par rapport au mécanisme de disparition

- a) Directe (bande à bande) : l'électron passe directement de la BC à la BV.
- b) Indirecte : l'électron passe de la BC à un niveau d'énergie d'une impureté agissant comme "centre de recombinaison" et situé dans la bande interdite, puis il sera réémis vers la BV. Cette étape peut aussi être décrite, de façon équivalente, comme la capture par le centre recombinant d'un trou de la BV

1.8.2 Par rapport aux échanges d'énergie

- a) Radiative : l'énergie (de recombinaison) est cédée sous forme lumineuse (photon)
- b) Non radiative : l'énergie est cédée sous forme de phonons (vibrations du réseau) ou à un autre électron libre ("recombinaison Auger").

Comme pour la génération, on caractérise le processus de recombinaison par un "taux de recombinaison" R_n ($m^{-3}s^{-1}$) pour les électrons et R_p pour les trous :

$$R_{n,p} = \frac{\Delta n,p}{\tau_{n,p}} \quad (1.7)$$

Avec :

$\Delta_{n,p}$, densités des porteurs générés.

$\tau_{n,p}$ la durée de vie des porteurs.

1.9 Equations de transport dans les semi-conducteurs

Le comportement des porteurs dans un semiconducteur est régi par les équations : [15]

1.9.1 Equation de Poisson

$$\frac{dE}{dx} = \frac{-\rho(x)}{\epsilon} \quad (1.8)$$

Avec :

$$E = -\frac{\partial V}{\partial x} \quad (1.9)$$

$$\rho = p - n + N_D - N_A \quad (1.10)$$

N_A, N_D : concentration des accepteurs et des 'donneurs ionisés.

ϵ : permittivité diélectrique du semi-conducteur.

V : le potentiel électrostatique

$\rho(x)$: la densité de charges

1.9.2 Equation de continuité

Pour les électrons :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \frac{\partial J_n}{\partial x} + G_n + R_n \quad (1.11)$$

Pour les trous:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{e} \frac{\partial J_p}{\partial x} + G_p - R_p \quad (1.12)$$

Avec:

G: le taux de génération.

R : le taux de recombinaison.

1.9.3 Les densités de courant des électrons et des trous

$$J_n = -en\mu_n \frac{dV}{dx} + eD_n \frac{dn}{dx} \quad (1.13)$$

$$J_p = -ep\mu_p \frac{dV}{dx} - eD_p \frac{dp}{dx} \quad (1.14)$$

Avec :

μ_n et μ_p : mobilité des électrons et des trous.

n et p : concentration des électrons et des trous.

D_n et D_p : coefficient de diffusion des électrons et des trous.

k : constante de Boltzmann.

T : température.

1.10 La jonction PN

Une jonction représente la limite entre deux semi-conducteurs de types différents obtenus par diffusion ou par bombardement ionique sur un même substrat de semi-conducteur. En se limitant à une seule dimension (x), on présente sur (la figure 1.6) le principe d'une jonction PN. Après diffusion et au voisinage de la jonction se forme une zone qui ne contient que des ions fixes formés par les donneurs qui ont perdu un électron et par les accepteurs qui ont gagné un électron. Ce dipôle de charges est le siège d'un champ électrique qui après un certain nombre de diffusion prend une valeur suffisante pour arrêter le flux de particules qui diffusent. C'est ainsi que les électrons seront repoussés à la zone N, et les trous seront repoussés vers la zone P. N'oublions pas que le support de base de la jonction est un semiconducteur, donc le phénomène de

génération et de recombinaison ne s'arrête pas tant que l'énergie thermique le permet. Mais dès qu'une paire électron-trou apparaît dans la zone de charge, l'électron sera accéléré vers N et le trou sera accéléré vers P, d'où le nom de zone déserte ou de déplétion. Les diagrammes donnés sur (lafigure1.7) résument [16].

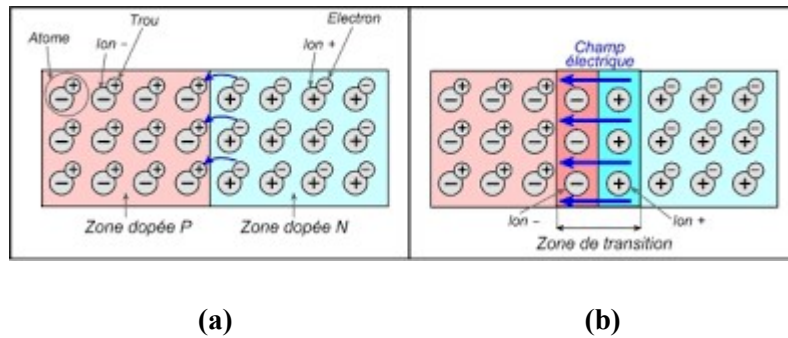


Figure 1.6.a-Jonction avant diffusion, b- jonction après diffusion

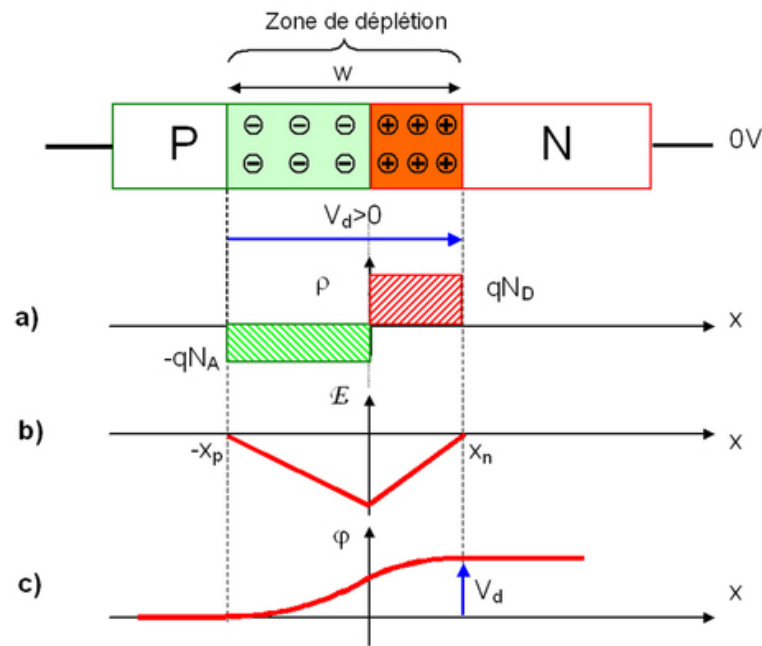


Figure 1.7. Jonction PN à l'équilibre thermodynamique. a) Charge d'espace, b) Champ électrique, c) Potentiel électrostatique. [17]

1.11 L'Effet Photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque » signifie Lumière en grecque. Il se compose en deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt. Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière

du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière, sous l'action de ce bombardement les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés". Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériel. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Cependant, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire. L'effet photovoltaïque c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière fut observée la première fois en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque[18].

1.12 La cellule solaire

La cellule solaire est un dispositif optoélectronique capable de capter et convertir directement l'énergie des rayons lumineux en électricité. Cette conversion est appelée la conversion photovoltaïque. Sa structure est illustrée dans la figure (1.8) ci-dessous. Elle montre un schéma simplifié d'une cellule solaire typique car l'architecture des dispositifs photovoltaïques modernes se révèle particulièrement complexe. La cellule photovoltaïque sera donc une plaquette du matériau semi-conducteur ; où la jonction P-N représente le cœur de la cellule photovoltaïque ; elle représente le vrai générateur dans le dispositif. Les contacts métalliques en face avant et en face arrière, constituent la structure de cheminement permettant de récupérer les porteurs photo générés, pour ça, deux électrodes sont élaborées sur la plaquette du semi-conducteur, l'une qui recouvre la totalité de la face arrière pour assurer le contact avec la zone p, et l'autre en forme de grille sur la face avant, la géométrie de cette grille étant un compromis entre une faible occultation du rayonnement et un bon contact électrique avec la zone n [19].

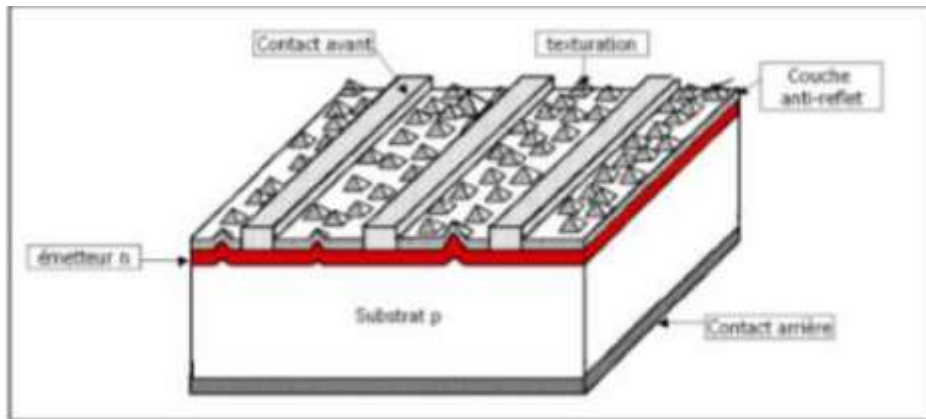


Figure 1.8. Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire

1.13 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériaux semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. 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.

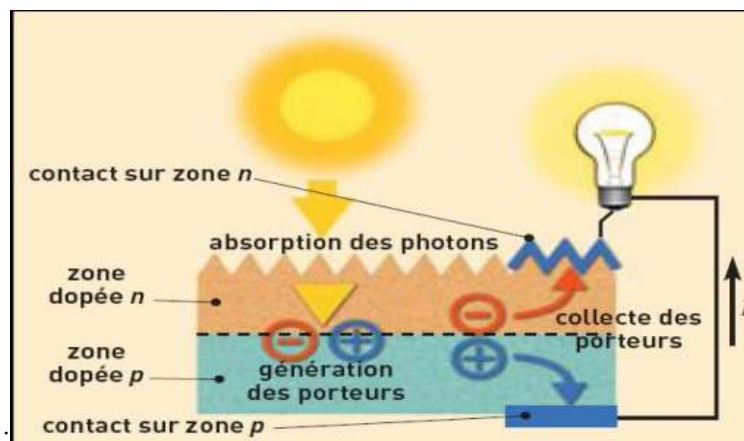


Figure 1.9. Principe de la conversion photovoltaïque

Il se crée donc entre eux, un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite PN) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule [20].

1.14 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairage et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistifs parasites dus à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances.

Avec : G_i : Source de courant parfaite :

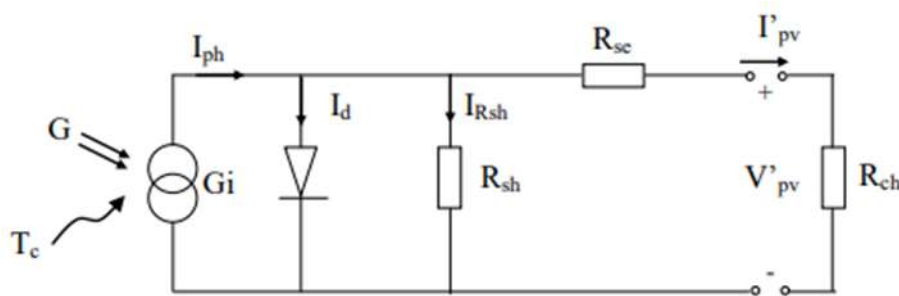


Figure 1.10. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

R_{sh} : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

R_{se} : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact)

D : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens.

R_{ch} : Résistance qui impose le point de fonctionnement sur la cellule en fonction de sa caractéristique courant-tension à l'éclairage considéré [21].

1.15 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

La cellule solaire est habituellement caractérisée par la caractéristique courant-tension $I(V)$ dans le noir et sous illumination, elle possède la caractéristique d'une diode. Sous éclairage, la caractéristique $I(V)$ (Figure 1.11) permet de déterminer quelques paramètres photovoltaïques de la cellule solaire tels que la tension de circuit ouvert (V_{co}), le courant de court-circuit (I_{cc}), le facteur de remplissage et le rendement de conversion η .

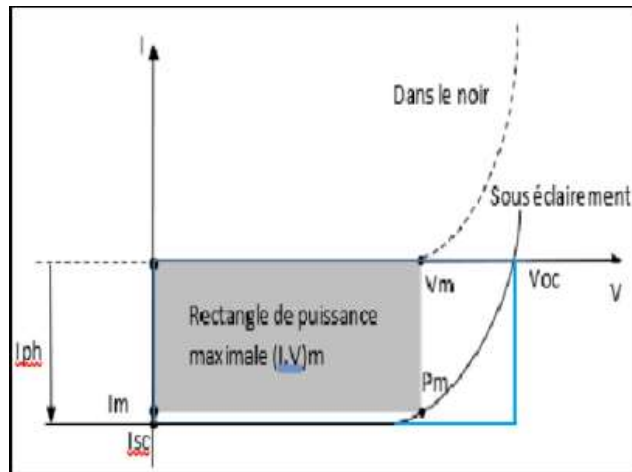


Figure 1.11. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque[22]

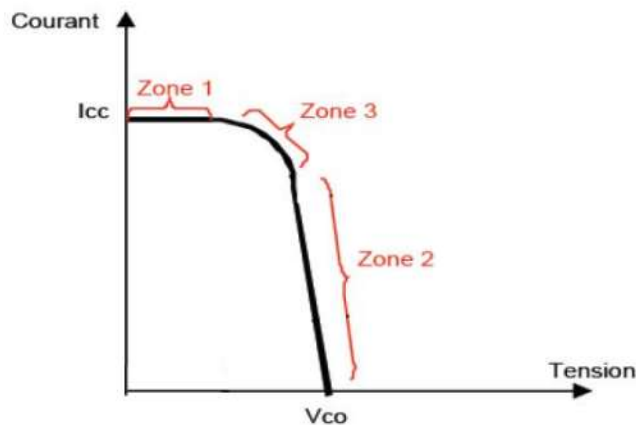


Figure 1.12. Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$

La caractéristique $I(V)$ se divise en trois parties (Figure 1.12) :

- La zone (1) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} Proportionnel à l'éclairement,
- La zone (2) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{co}
- La zone (3) où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

1.16 Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire

Les principaux paramètres photovoltaïques sont tout d'abord le courant de court-circuit, puis la tension en circuit ouvert, le facteur de forme, la réponse spectrale et enfin le rendement électrique. Des brèves définitions de ces paramètres, ainsi que leurs déterminations de la caractéristique sont données ci-après.

1.16.1 Le courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit exprimé en mA, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage et sans application de tension (en prenant $V=0$). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température.

$$I_{cc}(V = 0) = I_{ph} = qG(L_n + L_p) \quad (1.15)$$

L_n, L_p : les longueurs de diffusion des électrons et des trous respectivement.

G : le taux de génération.

q : Charge élémentaire

1.16.2 La tension de circuit ouvert V_{co}

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul ($I=0$), elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad (1.16)$$

Avec : k : La constante de Boltzmann.

q : La charge électrique.

T : La température absolue.

I_0 : Le courant de saturation de la diode.

I_{ph} : Le courant photogénéré.

1.16.3 Le facteur de forme FF

On appelle facteur de forme, le rapport de la puissance maximale au produit I_{cc} et V_{co} . Le facteur de forme indique la qualité de la cellule, il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_{se} et R_{sh}

$$FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (1.17)$$

1.16.4 Le rendement de conversion η

Une autre caractéristique importante à définir est le rendement de conversion photovoltaïque. Il exprime la capacité de la cellule à convertir efficacement les photons de la lumière incidente en courant électrique qui est le rapport entre la puissance électrique maximale pouvant être extraite à la puissance incidente [24] :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \quad (1.18)$$

P_{in} : La puissance lumineuse incidente

1.17 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques notions sur le rayonnement solaire et sur les semi-conducteurs, puis dans la seconde partie nous avons expliqué le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales.

Chapitre 2 Etude du contact métal semi-conducteur

2.1 Introduction

Dans cette partie nous allons présenter les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous aborderons ainsi, en premier lieu, quelques notions sur la structure métal semi-conducteur et les phénomènes physiques du contact métal semi-conducteur. Nous présentons ensuite les grandeurs physiques et mécanismes de transport du courant qui permettant d'évaluer les performances et la caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque de type Schottky. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée au matériau GaAs.

2.2 La structure-métal-semi-conducteur

Une hétérojonction est formée d'un contact entre deux semi-conducteurs de gap différents ou entre un métal et un semi-conducteur. A l'équilibre thermodynamique les niveaux de Fermi des deux matériaux s'alignent. Dans un dispositif électronique l'hétérostructure peut être soit un élément actif cas d'une diode Schottky (contact redresseur) soit passif cas d'un contact ohmique. Le type de contact qui résulte d'une hétérojonction dépend des travaux de sortie des matériaux.

Elle est constituée de:

- Un métal en contact avec un morceau de semi-conducteur
- Un contact ohmique idéal de l'autre côté du semi-conducteur.

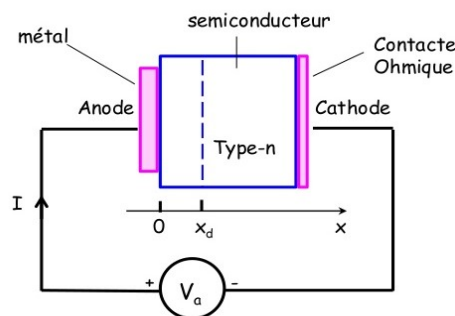


Figure 2.1. La structure métal-semi-conducteur

2.3 Travail de sortie

Dans un métal le niveau E_{fm} représente l'énergie maximale que peut avoir un électron à l'équilibre. Pour extraire un électron il faut qu'il atteigne le niveau d'énergie NV (niveau du vide). Le travail de sortie ϕ_m est défini comme l'énergie minimale qu'il faut fournir à un électron pour l'arracher du métal (électron sans vitesse à la sortie du métal). Les valeurs usuelles de ϕ_m sont comprises entre 2 et 5,5 eV.

$$\phi_m = NV - E_{fm} \quad (2.1)$$

Pour un semi-conducteur, on peut aussi définir un travail de sortie ϕ_{sc} comme la différence entre le niveau du vide et le niveau de Fermi dans le semi-conducteur[25].

$$\phi_{sc} = NV - E_{Fsc} \quad (2.2)$$

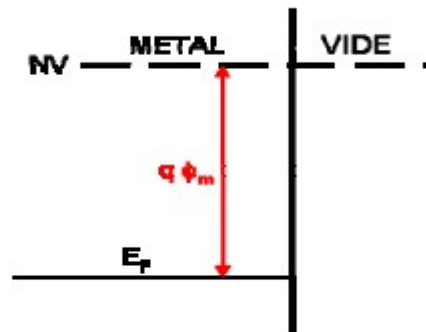


Figure 2.2 Travail de sortie d'un métal [26]

2.4 Affinité électronique

Dans les semi-conducteurs et les isolants, le travail de sortie $q\Phi_s$ est défini de la même manière. Cependant, pour les semi-conducteurs, la position du niveau de Fermi dépend du dopage et $q\Phi_s$ n'est pas une constante physique du matériau. Sauf pour les semi-conducteurs dégénérés, il n'y a pas d'électron au niveau de Fermi. On définit alors l'affinité χ électronique comme l'énergie qu'il faut fournir à un électron situé au bas de la

bande de conduction pour l'amener au niveau du vide. Cette grandeur est une constante physique du semi-conducteur : et est donnée par l'expression :[26]

$$q\chi = NV - E_c \quad (2.3)$$

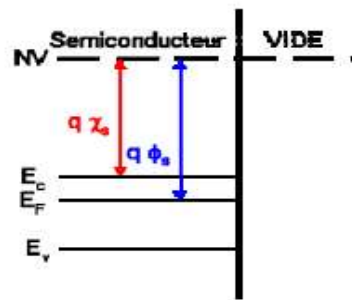


Figure2.3.Affinité électronique [28].

2.5 Le contact métal semi-conducteur

Quand un métal et un semi-conducteur sont en contact, la structure des bandes d'énergie à l'interface est conditionnée par la différence d'énergie entre le travail de sortie du métal ($q\Phi_m$) et le travail de sortie du semi-conducteur ($q\Phi_s$). Le type du contact est en fonction des travaux de sorties des matériaux ainsi que le dopage du semi-conducteur.

2.5.1 Le contact redresseur

Lorsque $q\phi_m > q\phi_{sc}$ travail de sortie du SC, les électrons passent du SC. vers le métal, le système se stabilise à un régime d'équilibre défini par l'alignement des niveaux de Fermi .

2.5.2 Semi-conducteur de type n

Les électrons qui passent du Sc vers le métal, entraînent des modifications énergétiques dans chacun des matériaux : Dans le Sc, une zone de déplétion sera créée, les ions donneurs ionisés ne sont plus compensés par les électrons, il apparaît une zone de charge d'espace positive. Le niveau de Fermi étant horizontal, il en résulte une courbure des bandes vers le haut, dans le métal il apparaît une accumulation d'électrons

à l'interface. A cette double charge d'espace sont associés un champ électrique et une tension de diffusion V_d qui comme dans le cas de la jonction pn, équilibre les forces de diffusion et détermine l'état d'équilibre. Si on Polarise la structure par une tension métal-Sc V positive comme le montre la figure 2.5 la bande de conduction du Sc s'élève de eV la courbure diminue. Ainsi la barrière (Sc / métal) diminue alors que la barrière (métal / Sc) reste inchangée. L'équilibre est rompu, les électrons diffusent du Sc vers le métal et créent un courant I [27].

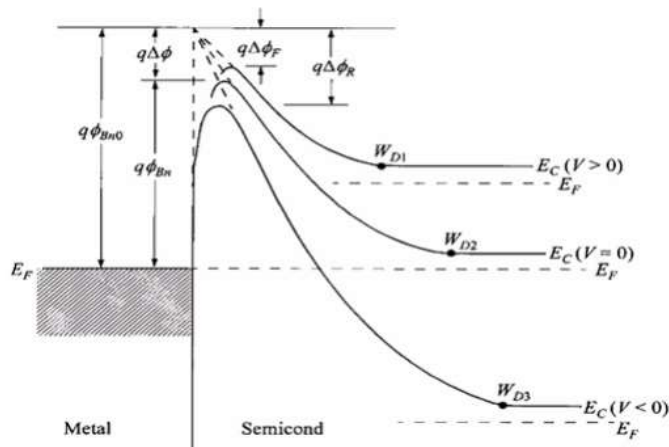


Figure 2.4. Polarisation du contact M/Sc (n)

2.5.3 Cas où $q\Phi_m > q\Phi_{sc}$ et le semiconducteur de type N

Soit le cas où le travail de sortie du métal $q\Phi_m$ est supérieur au travail de sortie du semiconducteur $q\Phi_{sc}$. Lors de la mise en contact du métal et du semiconducteur, les électrons du semiconducteur situés près de l'interface possèdent une plus grande énergie que ceux du métal. Ils vont passer vers le métal en laissant derrière eux des ions positifs fixes. Ce phénomène s'arrête lorsque l'alignement des niveaux de FERMI est réalisé. Une zone désertée (ZCE) apparaît dans le semiconducteur. En faisant l'hypothèse de SHOCKLEY, on supposera que cette zone est entièrement dépourvue de porteurs majoritaires sur une épaisseur d . Au-delà, la densité des porteurs majoritaire est égale au dopage n du semiconducteur.[28]

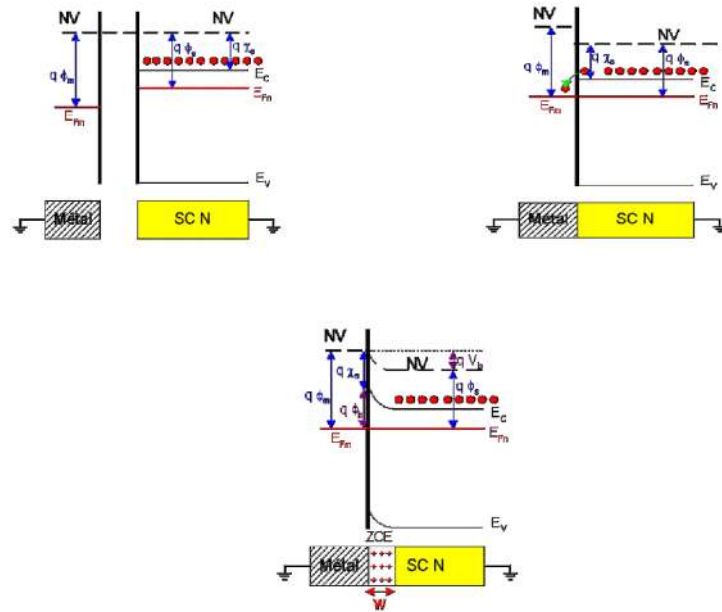


Figure 2.5.Contact métal-semiconducteur type N

Du côté métal, le surplus d'électrons se concentre sur une zone infiniment mince car la densité d'états d'énergie disponibles est de l'ordre de 10^{22} cm^{-3} . Il en résulte une courbure des bandes d'énergies vers le haut, puisque le niveau de Fermi reste horizontal à l'équilibre thermodynamique.

La hauteur de la barrière qui s'oppose au passage des électrons du semiconducteur vers le métal est donnée par :

$$qV_b = q\Phi_m - q\Phi_s(\text{ev}) \quad (2.4)$$

V_b est le potentiel de barrière de la ZCE qui apparait dans le semiconducteur.

2.5.4 Cas où $q\Phi_m < q\Phi_s$ et le semiconducteur est de type n

Lors de la mise en contact du métal et du semiconducteur, les électrons du métal situés près de l'interface possèdent une plus grande énergie que ceux du semiconducteur. Ils vont donc passer vers le semiconducteur. Il apparaît une zone de déficit de porteurs négatifs dans le métal et une accumulation de porteurs majoritaires (électrons) dans le semiconducteur. Il y a donc une accumulation de porteurs majoritaires dans le semiconducteur. Il n'existe donc aucune zone dépourvue de porteurs majoritaires dans la structure. Cette dernière conduira l'électricité dès qu'une tension sera appliquée. Le contact est ohmique.[28]

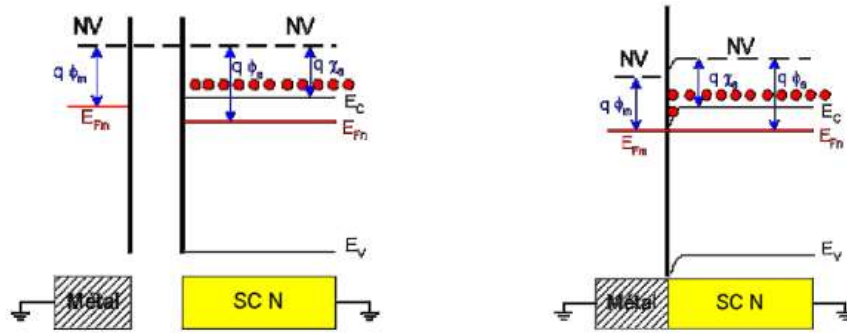


Figure 2.6 Cas où $q\Phi_m < q\Phi_s$ et le semiconducteur est de type n

2.5.5 Cas où $q\Phi_m = q\Phi_s$

Envisageons le cas où le travail de sortie du métal $q\Phi_m$ est égal au travail de sortie du semiconducteur : $q\Phi_s$. Les niveaux de FERMIE du métal E_{Fm} et du semiconducteur E_{Fn} sont alignés en l'absence de contact car leur distance au niveau du vide est la même. Lorsque le contact est réalisé, les niveaux de FERMIE étant déjà alignés, l'équilibre thermodynamique peut se réaliser sans échange de porteurs de charges. Dans le semiconducteur, la densité des électrons reste constante et la BC (et la BV) reste plates. C'est ce que l'on appelle le régime de bandes plates.[28]

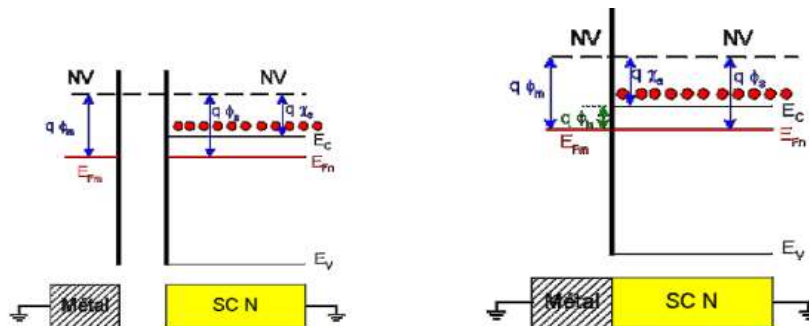


Figure 2.7. Cas où $q\Phi_m = q\Phi_s$ (régime des bandes plates)

La barrière de potentiel présentée aux électrons qui veulent transiter du métal vers le semiconducteur Φ_b est donnée par

$$q\Phi_b = q\Phi_m - q\chi_s \text{ (eV)} \quad (2.5)$$

Dans le cas d'un contact métal-semiconducteur de type P, les conditions entre les travaux de sorties ($q\Phi_m$ et $q\Phi_s$) sont inversées.

2.5.6 Cas où $q\Phi_m > q\Phi_s$ et le semiconducteur est de type p

Les électrons passent du semiconducteur vers le métal. À l'équilibre thermodynamique les niveaux de FERMI s'alignent, il apparaît :

- a- Une charge d'espace négative côté métal.
- b- Une charge positive à l'interface de semiconducteur (courbure vers le haut).

Il n'y a pas de zone vide de porteurs majoritaires. Au niveau du contact, l'arrivée ou le départ d'un trou dans le semiconducteur se compense immédiatement par l'arrivée ou le départ d'un électron dans le métal. Le courant circule librement dans les deux sens, c'est un contact Ohmique.

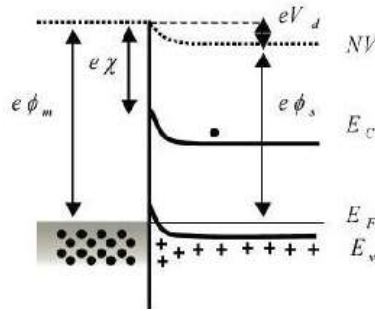


Figure 2.8. Cas où $q\Phi_m > q\Phi_s$ et le semiconducteur est de type P

2.5.7 Cas où $q\Phi_m < q\Phi_s$ et le semiconducteur est de type p

Les électrons passent du métal vers le semiconducteur et se recombinent avec les trous majoritaires (apparition d'une zone désertée). Le système évolue jusqu'à ce qu'un champ électrique apparait et arrête la diffusion des électrons. Il apparait dans le semiconducteur une charge d'espace négative. Les bandes d'énergie se courbent vers le bas et une barrière de diffusion apparait entre le semiconducteur et le métal. Son expression est donnée par

$$\phi_b = (E_g - \phi_m + X_s) \quad (2.6)$$

- a- Si le métal est porté à un potentiel positif par rapport au semiconducteur

La courbure des bandes augmente, la barrière de potentiel s'est accrue, le courant ne circule pas. La barrière est polarisée en inverse.

b- Si le métal est porté à un potentiel négatif par rapport au semiconducteur

La courbure des bandes d'énergie diminue, la barrière de potentiel est affaiblie, les électrons peuvent repasser du métal vers le semiconducteur, il apparaît un courant électrique. La barrière est polarisée en direct [28].

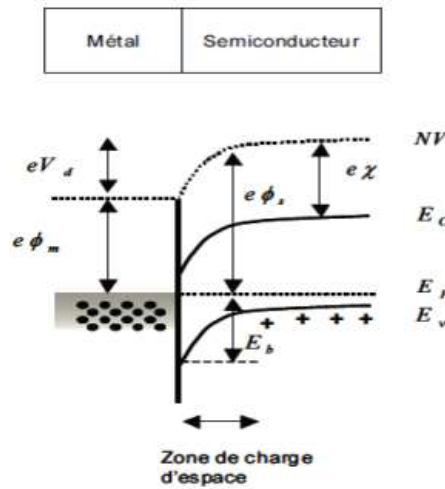


Figure 2.9. Cas où $q\Phi_m < q\Phi_s$ et le semiconducteur est de type P

Le tableau 2.1 résume les différents types de contacts qui se créent entre le semiconducteur et le métal.

Tableau 2.1. Différents types de contacts d'une structure M-Sc.

Contacts	Semiconducteur type n	Semiconducteur type p
Redresseur	$q\Phi_m > q\Phi_s$	$q\Phi_m < q\Phi_s$
Ohmique	$q\Phi_m < q\Phi_s$	$q\Phi_m > q\Phi_s$

2.6 L'arséniure de Gallium (GaAs)

Structure cristalline : Le semi-conducteur GaAs (arséniure de gallium) a une structure cristallographique de type blende de zinc. Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant (Si, Ge, etc....), est constituée de deux sous réseaux cubique à face

centrées, l'un d'éléments III, l'autre d'élément V, décalé l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale (figure 2.10.(A)), l'atome en rouge représente un élément V. La maille élémentaire comporte deux atomes, le premier (Ga) à l'origine et l'autre (As) à $(aa/4,aa/4,aa/4)$, où a représente le paramètre de maille du matériau.[29]

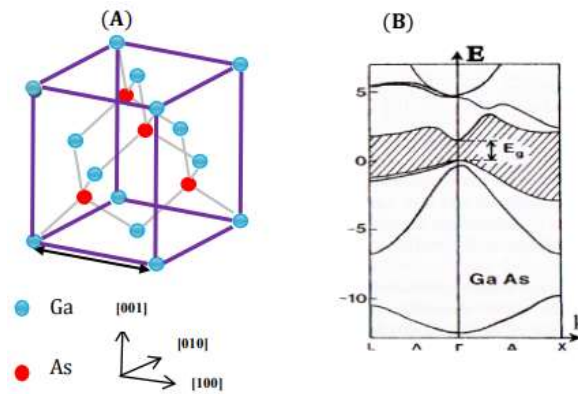


Figure 2 .10 Structure cristalline du GaAs (structure zinc blende) et (B) structure de bande du GaAs [30]

2.7 Structure et propriétés de l'arséniure de gallium (GaAs)

Le gallium est un métal liquide à 30 C° avec l'aspect du mercure. Il réagit avec la vapeur d'arsenic à 1240 C° pour donner l'arséniure de gallium fondu. Il est refroidi lentement, puis purifié. Lors de ce traitement il est particulièrement instable ; l'arsenic a tendance à se vaporiser et il faut opérer sous pression pour maintenir l'équilibre des deux composants [31].

L'arséniure de gallium présente de nombreux avantages dans les différents domaines de recherches grâce à sa structure de bande qui lui confère des propriétés électroniques importantes en optoélectronique, il se prête mieux que le silicium, à la réalisation de circuits très rapides. Le GaAs se prête facilement à la réalisation de diodes Schottky à hauteur de barrière élevée obtenues à l'aide de différents métaux (Au, Al...).les jonctions Schottky réalisées présentent d'excellents facteurs d'idéalité et de très faibles courants inverses. On conçoit que son prix de revient soit particulièrement élevé [31].

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

Tableau 2.2 :Paramètres physiques et électriques du GaAs [32] [33].

Propriétés du GaAs	Valeurs	Unités
Structure cristalline	Zinc blende	
Type de la bande interdite	Directe	/
Energie de la bande interdite	$E_g = 1.43$	eV
Permittivité relative	11.6	
Mobilité des électrons	8500	$\text{cm}^2/\text{V.s}$
Mobilité des trous	250	$\text{cm}^2/\text{V.s}$
La vitesse maximale des électrons	$2,1 \cdot 10^7$	cm/s
Le champ électrique de saturation	10	K.V /cm
Densité d'états dans la bande de conduction	$5,1 \cdot 10^{17}$	cm^{-3}
Durée de vie des porteurs minoritaires	$\sim 10^{-8}$	S
Hauteur de barrière de Schottky	0,7-0,8	V

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la physique de la structure Métal Semi-conducteur (M-SC) avec ses deux configurations ohmiques et Schottky. Ensuite, nous avons présenté la structure et les propriétés physiques du matériau GaAs.

Chapitre 3 Simulation, résultat et interprétations

3.1 Introduction

Dans cette partie on va présenter un résumé sur le logiciel COMSOL Multiphysics, faire la simulation des cellules solaires Schottky GaAs, et interpréter les résultats trouvés

Nous avons d'abord étudié la variation des paramètres physiques et électriques (courant de court-circuit J_{cc} , tension de circuit ouvert V_{co} , et le rendement η) en fonction du travail de sortie ϕ , du dopage ND et de l'épaisseur d .

3.2 Présentation de la cellule à étudier

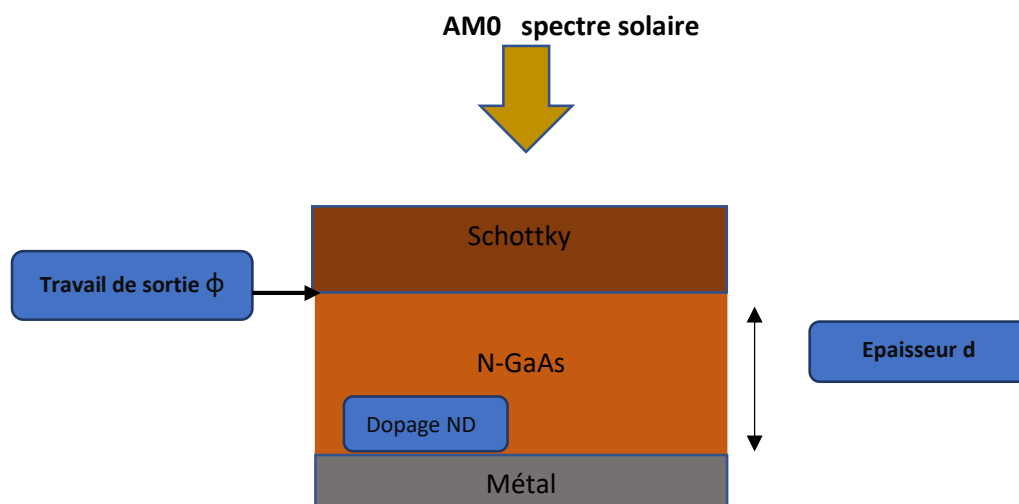


Figure 3.1. Schéma de la cellule solaire Schottky à base de GaAs

La cellule modélisée est basée sur une structure Schottky (contact métal/semi-conducteur). Elle est composée d'une fine couche métallique déposée sur une couche de GaAs. Les simulations ont toutes été réalisées sous éclairage AM0 et une température de 300 K. La structure étudiée est montrée sur Figure III.1.

3.3 Logiciel de Simulation des caractéristiques électriques

Avec l'augmentation de la complexité dans tous les dispositifs électroniques, il est devenu nécessaire pour les ingénieurs de conception, de prédire le comportement de ces systèmes avec des modèles rigoureux. La simulation a donc été largement utilisée dans

le domaine photovoltaïque afin de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires, de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximum. La difficulté majeure réside dans le grand nombre de paramètres influençant le rendement. Les logiciels les plus utilisés pour la simulation numérique sont Comsol, Silvaco et Afors-het. Nous avons utilisé le premier pour la simulation de notre cellule.

3.3.1 Logiciel Comsol Multiphysics

C'est un logiciel de simulation numérique qui englobe toutes les étapes du processus de modélisation : de la définition des géométries, des propriétés des matériaux et de la physique, décrivant des phénomènes spécifiques, à la résolution et au post-traitement de modèles tout en assurant des résultats précis et fiables. Basé sur la méthode des éléments finis, le logiciel COMSOL Multiphysics® est recommandé pour la création de modèles utilisés dans les domaines d'applications spécialisés ou les domaines d'ingénieries. Pour ce faire, il est possible d'étendre le logiciel par des modules complémentaires de la suite de produits.

3.4 Simulations et Interprétations

Notre objectif est d'entreprendre l'optimisation de l'efficacité du rendement de conversion η de la cellule, en fonction du travail de sortie du métal, concentration du dopage et l'épaisseur de la couche GaAs. Le travail de sortie ϕ est entre 4.9 et 5.7 eV

L'étendue du dopage Nd de la couche GaAs est choisie entre 10^{22} et 10^{23} cm^{-3}

Le dernier paramètre pour lequel nous devons définir des limites est l'épaisseur de la couche GaAs. Nous avons choisi de fixer sa valeur entre $0.2 \mu\text{m}$ et $3 \mu\text{m}$

Le tableau 3.1 résume les paramètres utilisés dans la simulation.

Nom	Valeur
Épaisseur de GaAs d (μm)	0,2 – 3
Gap E_g (eV)	1,424
Durée de vie τ (ns)	10

Dopage ND (cm ⁻³)	10 ¹⁵ - 10 ¹⁷
Travail de sortie Phi (eV)	4,9 – 5,7
Mobilité des électrons (cm ² /V.s)	8500[cm ² /(V*s)]
Mobilité des trous (cm ² /V.s)	400[cm ² /(V*s)]
Densité d'états de bande de conduction N _C (cm ⁻³)	5,1.10 ¹⁷
Densité d'états de bande de valence N _V (cm ⁻³)	7x10 ¹⁸
Affinité électronique [V]	4.07
Permittivité relative	12.9

3.5 Coefficient absorption

La figure 3.2 représente le coefficient de réflexion du GaAs utilisé dans la simulation

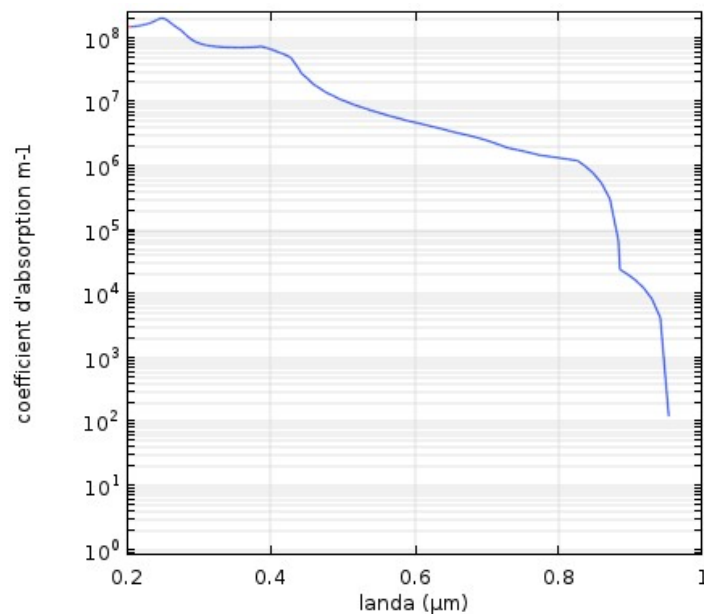


Figure 3.2. Coefficient d'absorption du GaAs[28].

La figure (3.2) représente le coefficient d'absorption du GaAs en fonction de la longueur d'onde λ . On voit que sa valeur maximale est 10^8 m^{-1} . Il s'annule pour une longueur d'onde de $0.97 \text{ }\mu\text{m}$.

3.6 Effet du travail de sortie du métal (contact Schottky)

3.6.1 Caractéristiques courant-tension J(V)

La figure (3.3) représente les caractéristiques J(V) pour différentes valeurs du travail de sortie ϕ du métal. On voit que le courant augmente avec l'augmentation de ϕ

jusqu'à une valeur égale à 5,6 eV, la variation devient de plus en plus faible. Quant à la tension de circuit ouvert, elle augmente et se sature vers $\phi = 5.6$ eV.

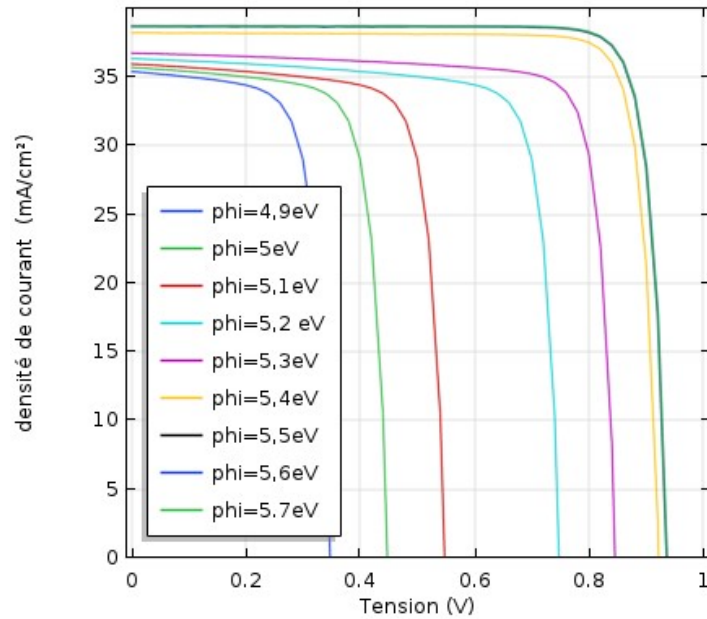


Figure 3.3. Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs du travail de sortie ϕ du métal

3.6.2 Caractéristiques puissance-tension P(V)

La figure (3.4) présente les caractéristiques P(V) pour différentes valeurs du travail de sortie (ϕ) du métal. On remarque que la puissance augmente avec l'augmentation du travail de sortie (ϕ), la variation devient très faible à partir de 5,5 eV. Quant à la tension de circuit ouvert, elle augmente très faiblement.

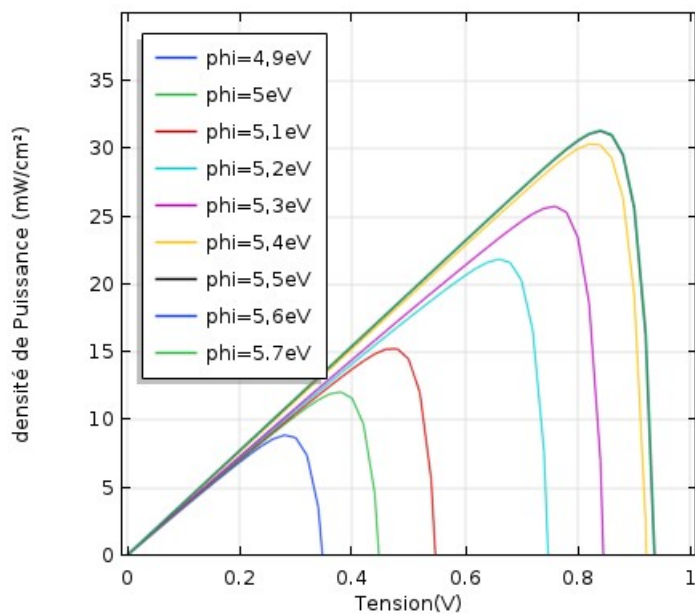
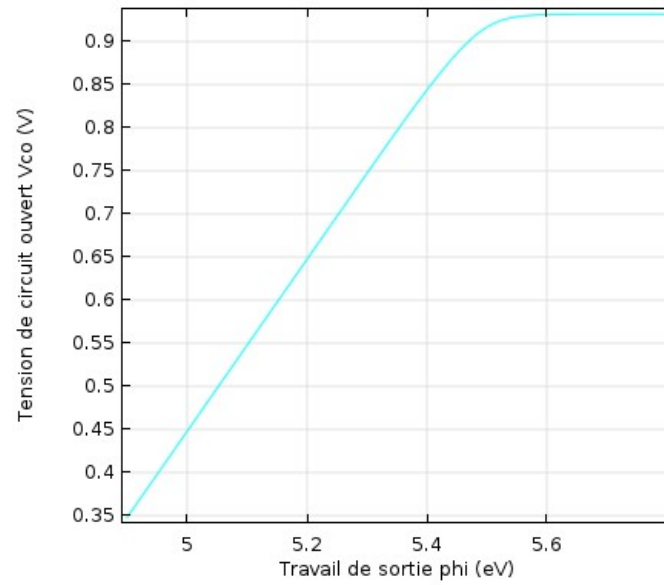
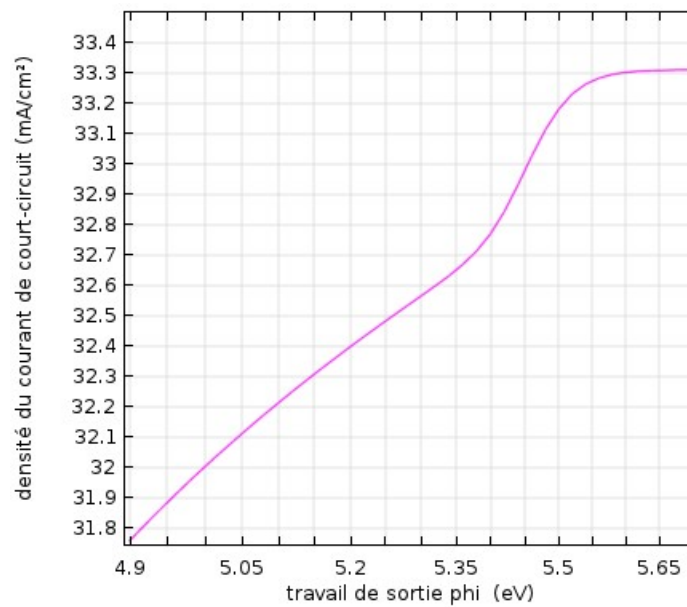


Figure 3.4. Caractéristiques puissance-tension pour différentes valeurs du travail de sortie (ϕ) du métal

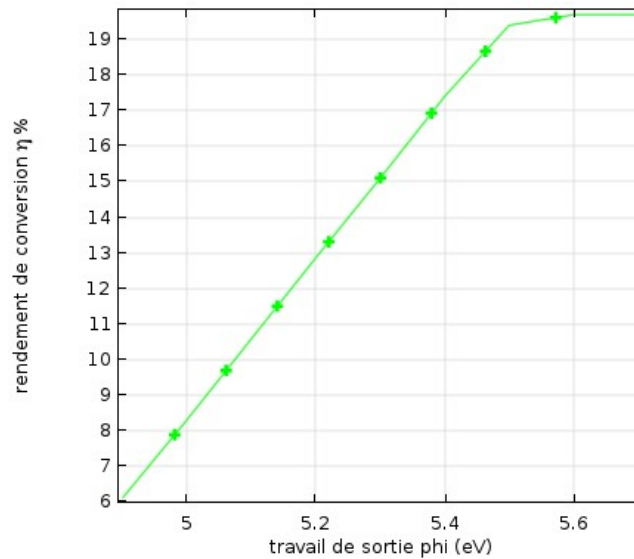
3.7 Influence de ϕ sur les paramètres photovoltaïques



(a)



(b)



(c)

Figure 3.5. Variation des paramètres photovoltaïques en fonction du travail de sortie du métal (ϕ). (a) tension de circuit ouvert V_{co} , (b) courant de court-circuit J_{cc} , (c) le rendement η .

La figure (III.5) montre la variation des paramètres photovoltaïques en fonction du travail de sortie du métal. Dans cette étude, on a fixé l'épaisseur de la couche GaAs $d=1\mu\text{m}$, et le dopage $N_D=10^{16}\text{cm}^{-3}$.

Nous observons sur la figure (III.5) que la tension de circuit ouvert V_{co} et le rendement η augmentent avec le travail de sortie du métal (ϕ) pour des valeurs de (ϕ) $[4,9 ; 5,5]$ eV. Pour les valeurs supérieures de ϕ , ces deux paramètres restent constants.

Il est également observé, une augmentation du courant de court-circuit J_{cc} sur toute la plage de variation de ϕ .

Le meilleur rendement est obtenu pour ϕ $[5,5 ; 5,7]$ eV. Dans notre prochaine étude, nous allons fixer le travail de sortie du métal à $\phi = 5,5$ eV.

3.8 Effet du dopage de la couche active

3.8.1 Caractéristiques courant-tension $J(V)$

La figure (3.6) représente les caractéristiques $J(V)$ pour différentes valeurs du dopage N_D de la couche GaAs. On voit que le courant diminue avec l'augmentation du dopage N_D . Quant à la tension de circuit ouvert, elle augmente faiblement.

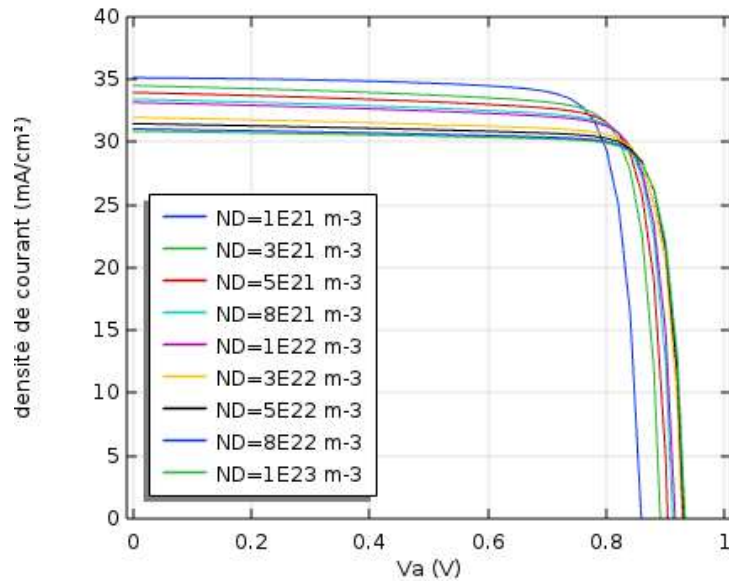


Figure 3.6. Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de ND de la couche GaAs

3.8.2 Caractéristiques puissance-tension P(V)

La figure (3.7) présente les caractéristiques P(V) pour différentes valeurs du dopage ND de la couche GaAs. On remarque que la puissance diminue avec l'augmentation du dopage ND. Quant à la tension de circuit ouvert elle augmente faiblement.

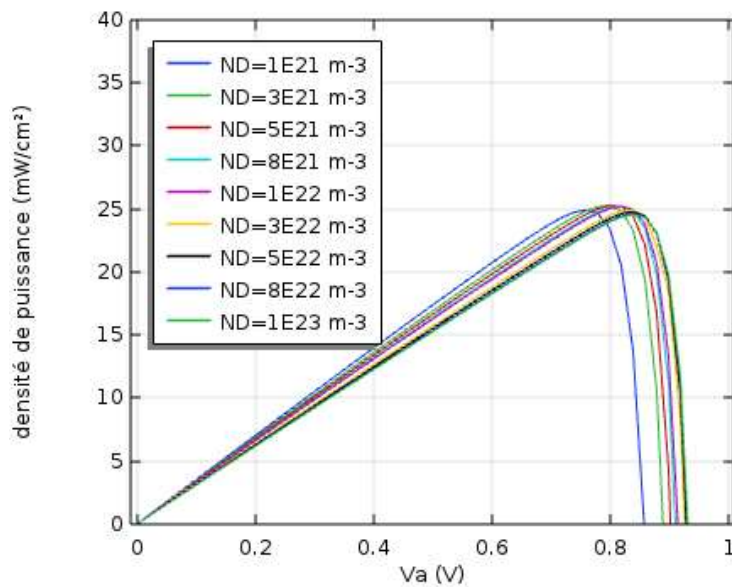
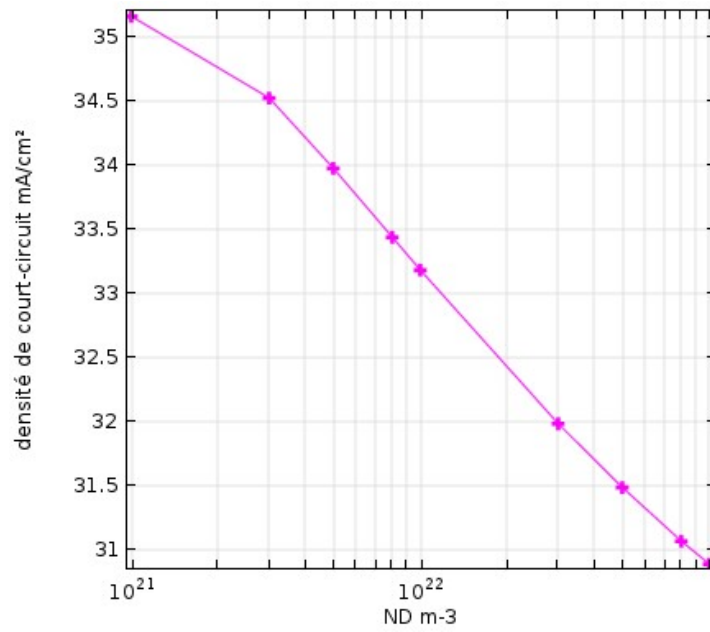
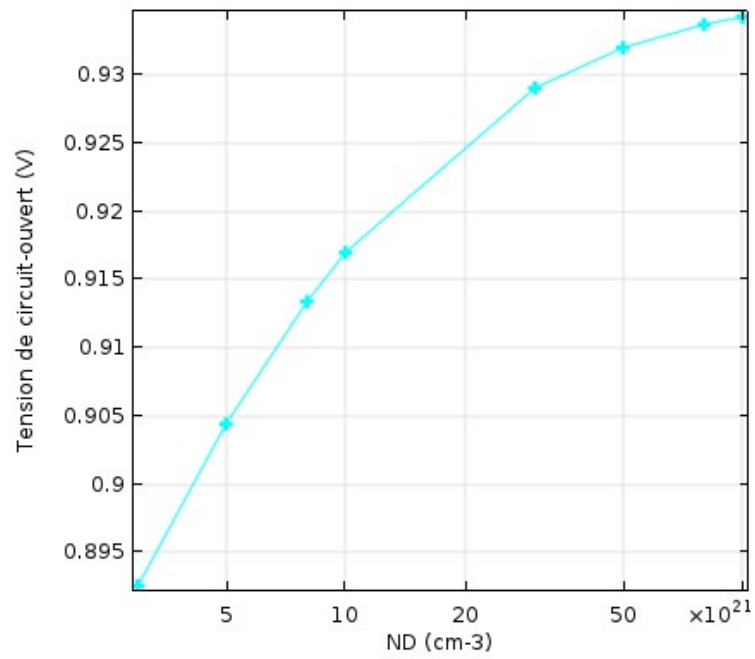


Figure 3.7. Caractéristiques puissance/ tension pour différentes valeurs de ND de la couche Ga

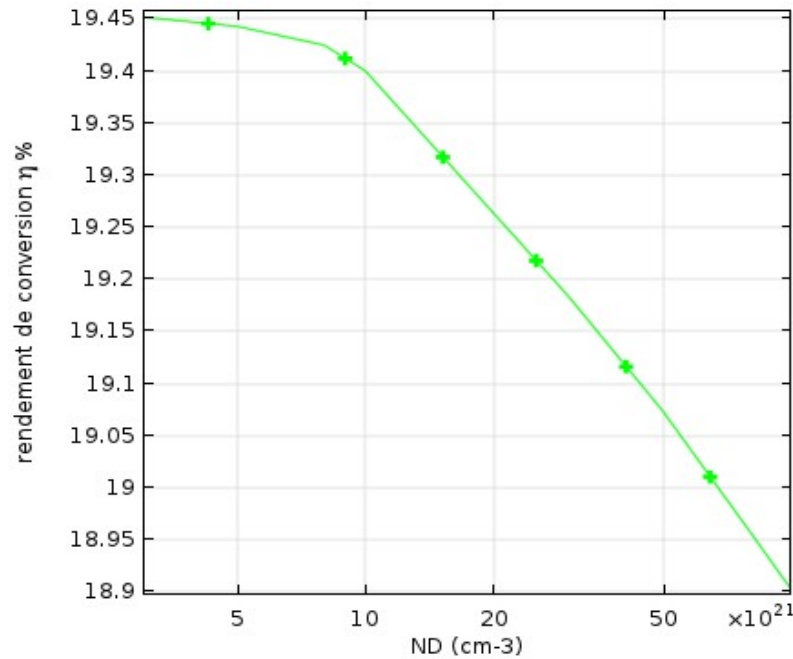
3.9 Influence du dopage de la couche GaAs



(a)



(b)



(c)

Figure 3.8. Variation des paramètres photovoltaïque en fonction du dopage de la couche active. (a) Courant de court-circuit J_{cc} , (b) tension de circuit ouvert V_{co} , (c) le rendement η .

La figure (3.8) montre la variation des paramètres photovoltaïques en fonction du dopage de la couche active. Dans cette étude, nous avons fixé l'épaisseur $d=1\mu\text{m}$ et $\phi_i=5,5\text{eV}$.

Le courant de court-circuit J_{cc} et le rendement η diminuent avec le dopage de la couche active. La tension de circuit ouvert V_{co} augmente avec le dopage de la couche ND. Dans notre prochaine étude, nous allons fixer le dopage ND à 10^{22} m^{-3} .

3.10 Effet de l'épaisseur de la couche active

3.10.1 Caractéristiques courant tension J(V)

La figure (3.9) représente les caractéristiques $J(V)$ pour différentes valeurs de l'épaisseur d de la couche GaAs. On voit que le courant augmente avec l'augmentation de l'épaisseur d jusqu'à une valeur égale à $3\mu\text{m}$, puis la variation devient de plus en plus faible. Quant à la tension de circuit ouvert, elle augmente faiblement.

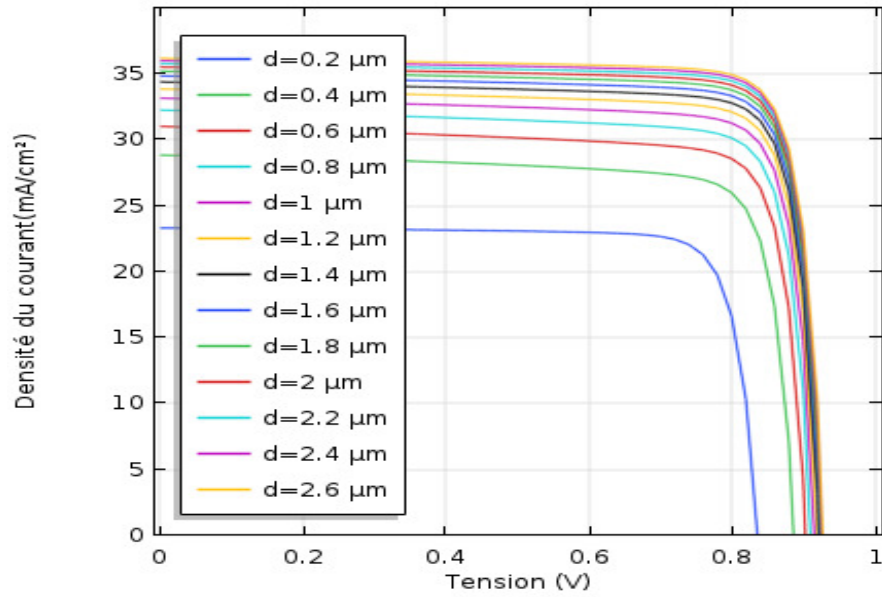


Figure 3.9. Caractéristiques courant/ tension pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche GaAs

3.10.2 Caractéristiques puissance-tension P(V)

La figure (3.10) présente les caractéristiques P(V) pour différentes valeurs de l'épaisseur (d) de la couche GaAs. On remarque que la puissance augmente avec l'augmentation de l'épaisseur (d), la variation devient très faible à partir de 2.5μm. Quant à la tension de circuit ouvert elle augmente faiblement.

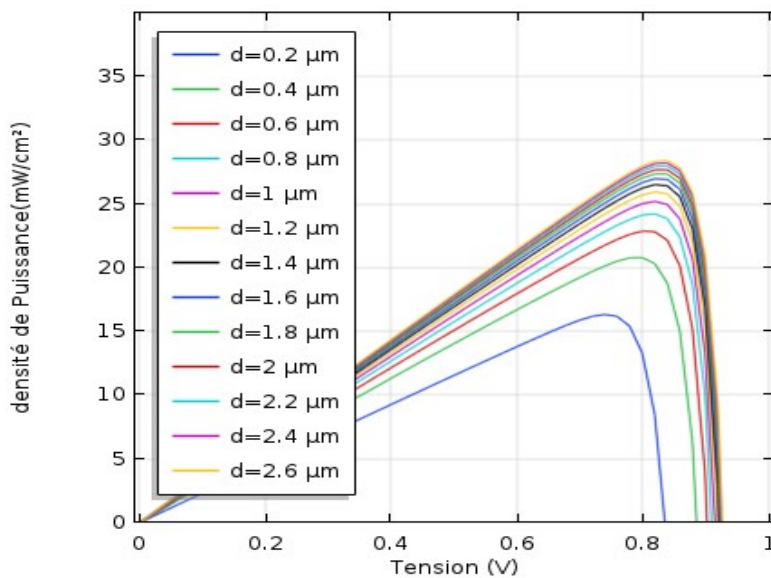
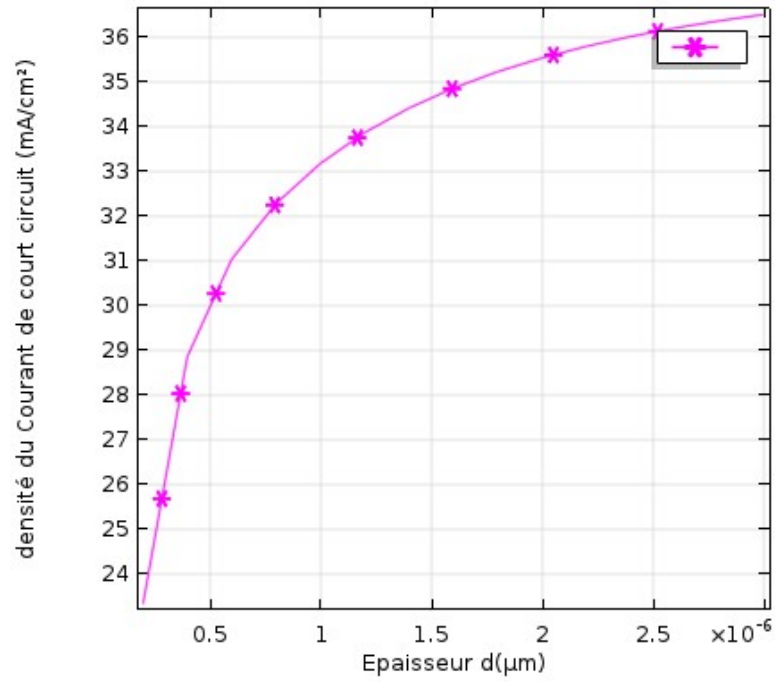
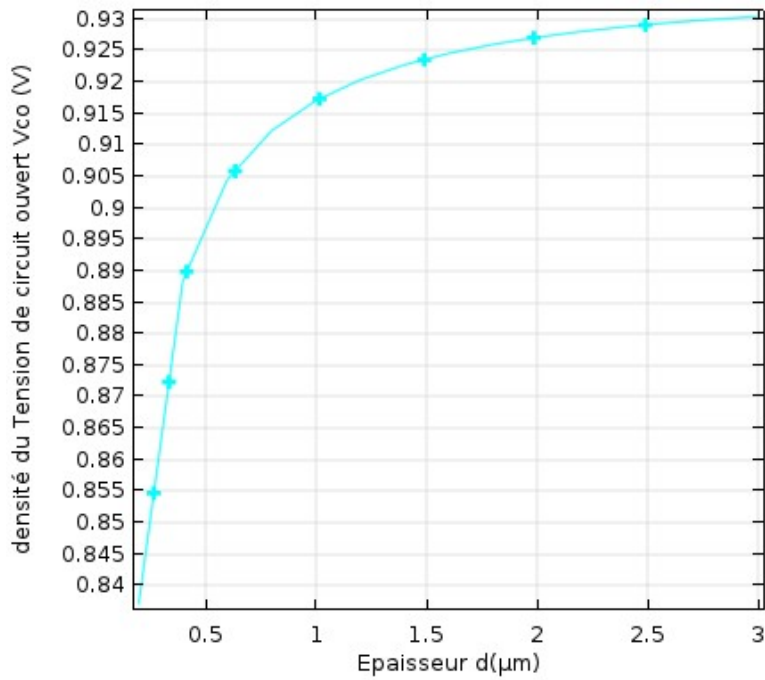


Figure 3.10. Caractéristiques puissance/ tension pour différentes valeurs de l'épaisseur (d) de la couche GaAs.

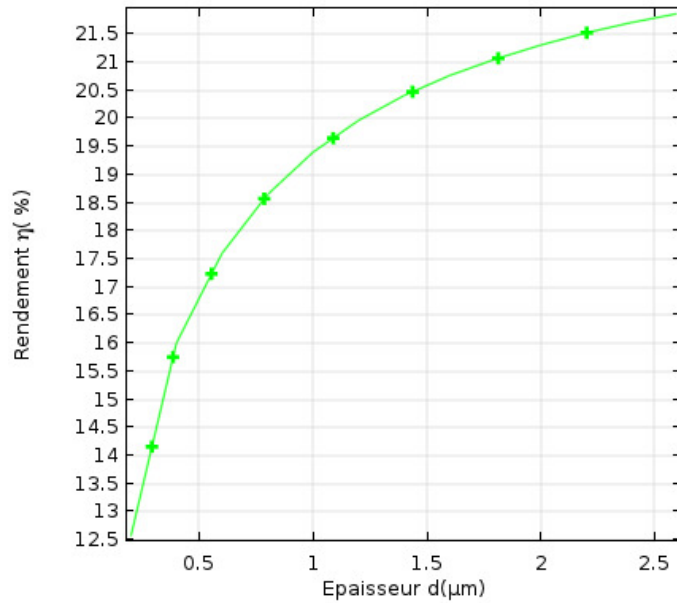
3.11 Influence de l'épaisseur de la couche GaAs



(a)



(b)



(c)

Figure 3.11. Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de la couche active. (a) courant de court-circuit J_{cc} , (b) la tension de circuit ouvert V_{CO} , (c) le rendement η

La figure (3.11) montre la variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de la couche active. Dans ce cas, nous avons pris $\phi=5,5\text{eV}$ et $N_D=10^{22}\text{m}^{-3}$. La tension de circuit ouvert V_{CO} et le courant de court-circuit J_{cc} augmentent avec l'épaisseur de la couche active jusqu'à $d=2,5\mu\text{m}$ ensuite ils se stabilisent. Le rendement η augmente avec l'épaisseur de la couche active.

3.12 Cellule optimisée

La figure 3.12 représente les caractéristiques courant tension et puissance tension de la cellule optimisée. On obtient une densité du courant de court-circuit égale à 37 (mA/cm^2) une tension de circuit ouvert à 0.95 (V) et un rendement optimal de 24.13 %

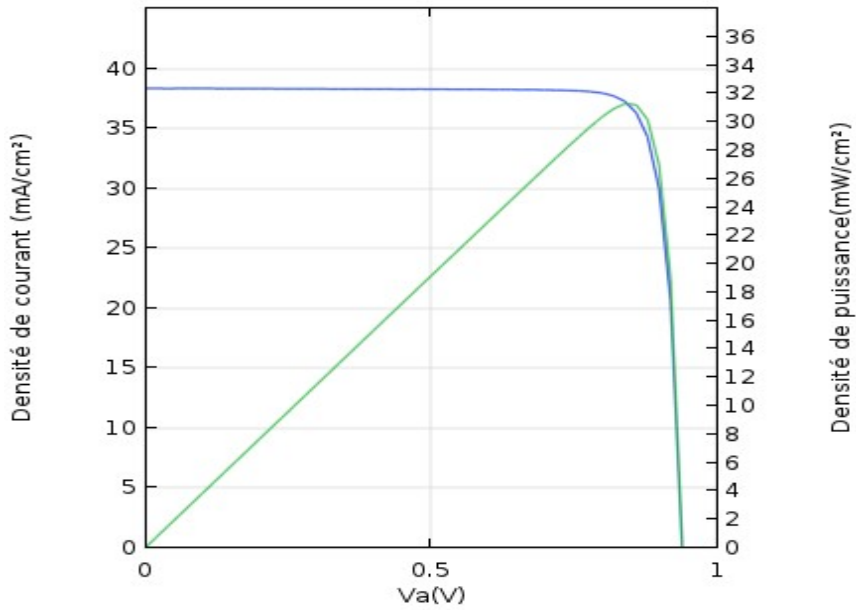


Figure 3.12.caractéristique courant tension de la cellule optimisé

Tableau 3.2 montre les paramètres et les valeurs d’optimisation de la cellule

Paramètres d’optimisation	Valeurs Optimales
Epaisseur de la couche GaAs (μm)	2,5
Le dopage ND (cm^{-3})	5.10^{22}
Travail de sortie du métal (eV)	5,5

Tableau 3.2 paramètres et valeurs d’optimisation

3.13 Conclusion

Ce travail a pour but de présenter les résultats de la simulation numérique par consol multiphysiques d’une cellule solaire Schottky à base de GaAs. Dans un premier temps, nous avons simulé la cellule et donné les caractéristiques (J-V). Après cela, nous avons fait une étude sur l’influence de la variation des paramètres physiques (travail de sortie du métal, concentration du dopage ND et l’épaisseur de la couche active) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule. Les résultats obtenus montrent que pour être efficace, il faut :

- Choisir un métal qui peut avoir une hauteur de barrière élevée.
- Réduire la concentration de dopage de la couche active GaAs.
- Augmenter l’épaisseur de la couche active GaAs.

Nous avons trouvé un rendement optimal de 24.13%

En résumé, le développement de cellule solaire Schottky à base de GaAs avec haute hauteur de barrière permet d’avoir une cellule solaire à haut rendement en contrôlant le dopage et l’épaisseur de la couche active.

Conclusion Générale

L'intérêt scientifique aussi bien que le potentiel commercial ont conduit à une recherche accrue dans le domaine du photovoltaïque qui s'est considérablement développé durant ces vingt dernières années.

Dans le premier chapitre, nous avons tout d'abord rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la physique de la structure Métal Semi-conducteur (M-SC) avec ses deux configurations ohmiques et Schottky. Ensuite, nous avons présenté la structure et les propriétés physiques du matériau GaAs.

Dans ce mémoire Nous avons étudié une structure de cellule solaire basée sur un contact Schottky entre une fine couche métallique et l'arséniure de Gallium (GaAs). Le spectre du soleil utilisé est (AM0) à une température de 300K à l'aide du logiciel COMSOL multyphysique.

Nous avons optimisé le rendement de la cellule solaire en optimisant simultanément l'influence de certains paramètres de la cellule solaire, Nous avons obtenu un rendement de conversion maximal de 24.13%.

En perspective, on peut envisager l'utilisation d'autres matériaux tel que GaAsN afin d'améliorer les performances.

Bibliographie

- [1]– M.Capderou,Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U,1985, Alger.
- [2] - Claude Delorme, Gisement solaire ,Review of Sorbonne Université,1987, G.D.T.A
- [3] -C .Wyard,X.Fettweis, A. Belleflamme,S .Doutreloup, &M .Epicum,
RECONSTRUCTION DE L'ÉVOLUTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE REÇU EN SURFACE EN EUROPE OCCIDENTALE SUR LA PÉRIODE 1900-2014 À L'AIDE DU MODÈLE ATMOSPHERIQUE RÉGIONAL MAR [archive], 2017,Association International de Climatologie.
- [4]- Pr. Robert H Reed, The inactivation of microbes by sunlight: solar disinfection as a water treatment process *Adv Appl Microbiol*, 2004,
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15251286/>
- [5] https://www.researchgate.net/figure/Composantes-du-rayonnement-solaire-Le-rayonnement-solaire-arrive-au-sol-directement-et_fig23_285322379
- [6] BOUANANI BOUALEM ,Simulation et Optimisation des Cellules Solaires Monolithiques à Double Hétérojonction, à Base de CIGS, Utilisant le Logiciel Atlas-Silvaco, THESE Pour l'obtention du grade de DOCTEUR EN SCIENCES , 2019/2020
- [7] R sekuler : perception, 1985,New York.
- [8]<https://www.dunod.com/sciences-techniques/physique-semi-conducteurs>
- [9]<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/matiere-semi-conducteur-3875/>
- [10] Sabrina Sam,complexesbioinorganiques de silicium poreux fonctionnalisés avec des métaux de transition , Thèse, 2010, Université des sciences et de la technologie houari Boumediene .
- [11]<http://industrielectronique.blogspot.com/2017/06/semi-conducteur-intrinseque.html>
- [12] OUBOUCHOU Amina, Etude et simulation d'une cellule solaire à base couches minces CZTS,mémoire de fin d'études en master , 2019.

- [13] A.Laugier, "Les photopilessolaires du matériau du dispositif aux applications", 1981,Institut National des sciences appliquées-lyon.
- [14] A.Chovet, P.Masson,"Physique des semi-conducteurs", 2004/2005, école polytechnique de Marseille.
- [15] Y.SAYAD, "détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le siliciumcristallin par interaction lumière-matière", thèse de doctorat,2009.
- [16] Henry Mathieu Hervé Fanet « physique des semi-conducteurs et des composants Électroniques», http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/louchene_ahmed/files/semi-conducteurs.pdf
- [17] <http://boudemagh.o.b.f.unblog.fr/files/2009/12/chapitre-5.pdf>
- [18]A.Niemegeers, M. burgelman, K. Decock, J. Verchraegen, S. Degrave “SCAPS 3201 Manual, September (2013) ,ELIS.
- [19] S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [20] Dr. BelaidLalouni Sofia «Cours Energie Solaire Photovoltaïque»,2015, Université de Bejaia » <http://elearning.univ-bejaia.dz/>
- [21]Lalouni. « Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batterie » Mémoire de magister, 2005, Université de Bejaia.
- [22]OUSSIDHOUM Samira : ‘Etude comparative des performances des cellules solaire à jonctions simple et multiple’ , Mémoire de magister,2015, Université MOULOUD MAMMERI Tizi-Ouzou.
- [23] R.P. Mukund, «Wind and solar Power Systems », CRC Press LLC,1999, New York.
- [24] W.C. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga, “Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin”, Revue des Energies Renouvelables, (2007) 301 – 306
- [25] S. Li.Sheng,Semiconductor Physical Electronics ,Second Edition Springer Science+Business Media, NY 10013, 2006, USA.

- [26] <http://eprints.univ-batna2.dz/1184/1/elec%20LAKEHAL%20BRAHIM.pdf>
- [27] <https://www.univsetif.dz/MMAGISTER/images/facultes/sciences/2010/bouroubaFarid.pdf>
- [28]- <https://dl.ummtto.dz/handle/ummtto/6574>
- [29]-Bouneb, “ Contribution à la modélisation D’une structure nanométrique : application aux transistors HEMTS et pseudomorphiques”, mémoire Magistère, 2009, Université de Mentori Constantine.
- [30]- F. Moutier, “ Modélisation et évaluation des Performances des Phototransistors Bipolaires à Hétérojonction SiGe/Si pour les Applications Optique-microondes Courtes Distances”, Thèse Doctorat,, 2009, Université de Marne-la-Vallée.
- [31] R. Besson, ”Technologie des composants électroniques diodes, transistor, circuit intégrés, opto-électronique ”, Tome 2, 5ème édition radio, 1981, Paris.
- [32] R. Soares, J. Graffeul et J. Obregon, ”Application des Transistors à effet de champ en arséniure de Gallium ”, Eyrolles et CENT –ENST, 1984, Paris.
- [33] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices , John Wiley & sons, 1969, New York. London. Sydney. Toronto.
- [34] D. E. Aspnes, S. M. Kelso, R. A. Logan and R. Bhat. Optical properties of $Al_xGa_{1-x}As$, *J. Appl. Phys.* **60**, 754-767 (1986)

