



Revue des Matériaux & Energies Renouvelable

Journal home : www.cu-relizane.dz

ISSN : 2507-7554

E- ISSN : 2661-7595



Simulation et optimisation de l'épaisseur de l'émetteur d'une cellule solaire mono-jonction à base de GaAs



H.Charane^{1,*}, A.Mahran², A.Mesrane³ et H.Mazouz⁴

¹Laboratoire de Traitement de Surface et de Matériaux (LTSM), Département de Mécanique, Faculté de technologie Université de Blida (USDB 1), Route de Soumaa, BP 270, Blida, 09000 Blida

²Unité de Développement des Équipements Solaires, UDES/Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), Route Nle n°11, BP386, 42415, Bou Ismail, Algeria

³Département Matériels et Équipements Intendance, Centre de Recherche-Développement de l'Intendance (CRD-INT), 09000 Blida, Algérie

⁴Département des Energies Renouvelables, Faculté de Technologie, Université de Blida (USDB 1), Route de Soumaa, BP 270, Blida, 09000 Blida

RESUME

Ce travail consiste en la simulation et l'optimisation de l'épaisseur de l'émetteur de type N d'une cellule solaire mono-jonction à base de GaAs à l'aide de l'outil de simulation Silvaco TCAD. L'objectif principal de cette étude est l'amélioration du rendement des cellules solaires mono-jonction GaAs. Les propriétés physiques, optiques et électriques du matériau GaAs ainsi que les différents phénomènes physiques pouvant avoir lieu dans la structure de la cellule solaire GaAs ont été tenus en considération lors des simulations. La structure optimale de la cellule solaire mono-jonction GaAs obtenue présente, dans les conditions de fonctionnement standard (AM 1.5, 1000W/m² et 300K), un rendement élevé de 28.56%. Par ailleurs, l'effet de la variation de l'épaisseur de l'émetteur sur les paramètres électriques de la cellule solaire a aussi été étudié.

Article history:

Received march 22, 2020

Received in revised form ...31 march 2020...

Accepted 09 July 2020

Keys word: cellule solaire mono-jonction, GaAs, épaisseur de l'émetteur, rendement .

Copyright © 2020 - All rights reserved

1. Introduction

Les semi-conducteurs III-V sont considérés comme les matériaux les plus adaptés pour la fabrication des cellules solaires à haut rendement en raison de leurs propriétés attractives pour le photovoltaïque notamment une large plage de couverture du spectre solaire [1], ainsi qu'une excellente résistance aux radiations solaires et aux températures élevées [2].

Il est à noter que pour les cellules solaires mono-jonction, la valeur optimale de l'énergie de gap la plus adaptée au spectre solaire AM1.5G est 1.39eV [3 ,4]. Le matériau ayant l'énergie de gap la plus proche de cet optimum est l'arséniure de gallium GaAs (1.42eV) qui est un semi-conducteur III-V à gap direct, composé de deux semi-conducteurs de la colonne III et V. L'arséniure de gallium (GaAs) est un matériau attrayant pour le photovoltaïque grâce à son fort coefficient d'absorption lui permettant de réaliser des cellules solaires ultra-minces pouvant absorber jusqu'à 90% des photons incidents dans une épaisseur de 3µm [5], une forte mobilité des électrons [6-7], une forte résistance aux radiations solaire et une bonne stabilité face aux températures élevées. De plus, la possibilité de transformer facilement l'arséniure de gallium en un semi-conducteur ternaire [7], a favorisé aussi son utilisation dans les cellules solaires multi-jonctions.

Depuis plusieurs années, les cellules solaires à base du GaAs suscitent l'intérêt des chercheurs et cela s'est traduit par de nombreux travaux de recherche [8-12]. En 1979, J.C.C. Fan et al. [8] ont fabriqué une cellule mono-jonction à base du GaAs sur un substrat de Germanium (Ge), présentant un rendement de 21%. En 2009, G.J. Bauhuis et al. [9] ont conçu une cellule solaire mono-jonction à base de GaAs pouvant présenter un rendement de 26.1%. La cellule solaire GaAs réalisée par Lin et al. [10] a pu atteindre un rendement de 18.9% en utilisant des puits quantiques à base de CdS.

* hamidcharane@gmail.com

En 2013, M. Abderrezek et al. [11] ont caractérisé et optimisé une cellule solaire mono-jonction GaAs en utilisant le logiciel PC1D, pouvant présenter un rendement de 25.8%. Récemment, la cellule solaire à triple-jonction à base de GaInP/GaAs/Ge simulée par J.W. Leem et al. [12] en utilisant le logiciel TCAD-Silvaco, a présenté un rendement de 30.72%.

Dans l'optique de concevoir une cellule solaire multi-jonction pour application terrestre, nous nous sommes d'abord intéressés à étudier à l'aide de l'outil de simulation TCAD-Silvaco une cellule solaire mono-jonction à base du matériau GaAs. L'objectif de ce travail est d'optimiser l'épaisseur de l'émetteur de la cellule solaire mono-jonction à base de GaAs afin d'atteindre un rendement maximal et d'en minimiser le coût de fabrication. Lors de ce travail, l'effet de la variation de l'épaisseur de l'émetteur sur les paramètres électriques de la cellule solaire sera aussi étudié.

II. Modélisation Et Simulation

II.1. Modélisation électrique de la cellule solaire photovoltaïque

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque, représentée par la figure 1, comporte une source de courant, une diode montée en parallèle, une résistance série R_s , et une résistance parallèle R_p pour modéliser respectivement, les pertes ohmiques et les courants de fuite dus aux recombinaisons [13].

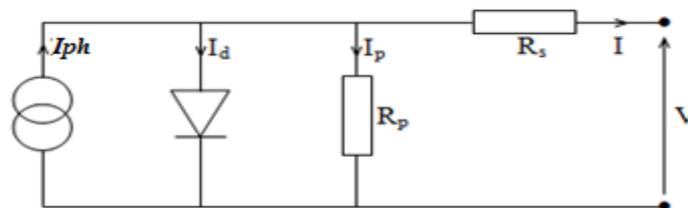


Figure 1– Schéma équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque

Le courant délivré par une cellule solaire photovoltaïque est donné par [13] :

$$I = I_{ph} - I_s \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - \frac{V}{R_p} - IR_s \quad (1)$$

Où I_{ph} est le courant photo-généré, I_s le courant de saturation, V la tension aux bornes de la cellule solaire et n le facteur d'idéalité de la diode, K la constante de Planck et T la température.

Les cellules solaires photovoltaïques sont caractérisées principalement par cinq paramètres électriques : le courant électrique de court-circuit, la tension de circuit ouvert, la puissance maximale débitée, le facteur de forme et le rendement de conversion photovoltaïque.

Le courant de court-circuit est obtenu lorsque la tension aux bornes de la cellule solaire est nulle [14] :

$$V = 0 \Rightarrow I_{cc} = I_{ph} \quad (2)$$

La Tension de circuit-ouvert (V_{oc}) est obtenue aux bornes de la cellule solaire lorsque le courant électrique est nul comme suit [14] :

$$I = 0 \Rightarrow V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} \right) \quad (3)$$

Le Facteur de forme (FF) représente l'idéalité électrique de la cellule solaire et il est donné par [14] :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{oc}} = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{cc} V_{oc}} \quad (4)$$

Où I_{max} et V_{max} sont respectivement le courant et la tension correspondant la puissance maximale (P_{max}) de la cellule solaire.

Le Rendement de conversion photovoltaïque (η) est donné par [14] :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF I_{cc} V_{oc}}{P_{in}} \quad (5)$$

Où P_{in} puissance incidente et A surface de la cellule solaire.

II.2. Structure de la cellule solaire GaAs

La structure initiale de la cellule solaire GaAs étudiée est constituée d'une région émetteur de 1 μ m d'épaisseur avec une concentration de dopage de type N de 4×10^{17} cm⁻³ et d'une région base d'une épaisseur de 9.6 μ m avec une concentration de dopage de type P de 7×10^{18} cm⁻³.

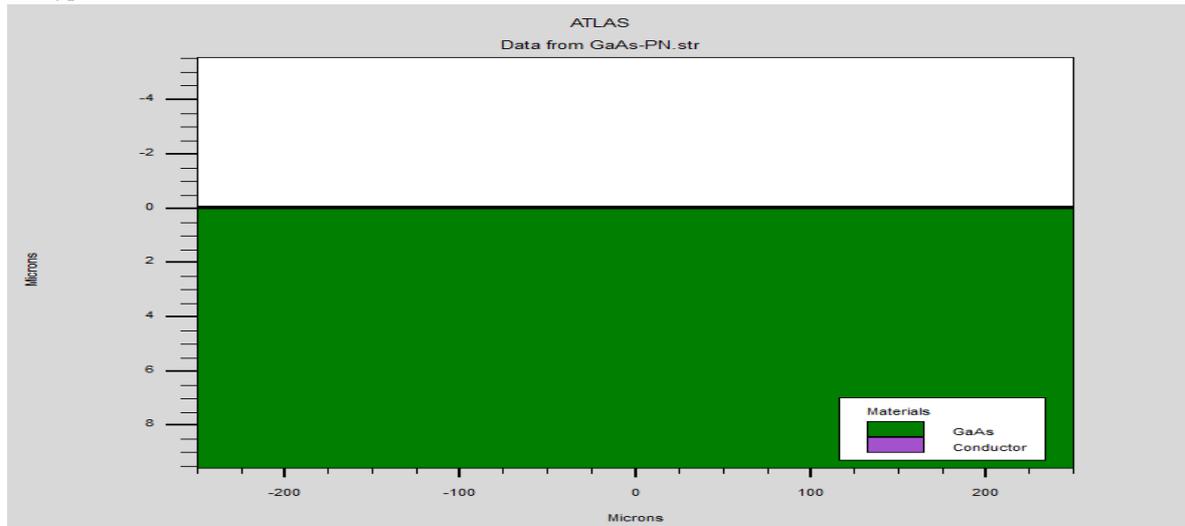


Figure 2– Schéma de la structure de la cellule solaire à base de GaAs sous TCAD

Lors de cette étude et afin de simplifier les simulations, nous avons supposé que les réflexions de la lumière de la face avant sont négligeables. De plus, afin de prendre en considération les différents phénomènes physiques pouvant avoir lieu dans la structure de la cellule solaire GaAs, nous avons implémenté et utilisé lors des simulations, les modèles physiques suivants :

- Modèle de la recombinaison Auger.
- Modèle de recombinaison Schokly-Read-Hall.
- Modèle de recombinaison radiative.

L'ensemble des simulations de la cellule solaire GaAs ont été effectuées dans les conditions de fonctionnement standards (AM1.5, 0.1W/cm² et 300K).

Les propriétés de l'alliage GaAs utilisées lors des simulations sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1. Les propriétés électriques et cristallines du matériau GaAs

Paramètre	GaAs	Réf.
Energie de gap E_g (eV)	1.424	[15]
Affinité électronique (eV)	4.07	[15]
Constante de maille (\AA)	5.6533	[15]
Permittivité électrique	12.9	[15]
Densité effective d'états N_c (cm ⁻³)	4.7×10^{17}	[15]
Densité effective d'états N_v (cm ⁻³)	9.8×10^{18}	[15]
Concentration des porteurs intrinsèque	2.1×10^6	[15]
Masse effective des électrons $\frac{m_e^*}{m_0}$	0.067	[15]
Masse effective des trous $\frac{m_h^*}{m_0}$	0.642	[15]

III. Résultats Et Discussions

III.1. Optimisation de l'épaisseur de l'émetteur (Type N)

Afin de trouver l'épaisseur optimale de l'émetteur type N, nous avons simulé la cellule solaire mono-jonction GaAs pour différentes épaisseurs de l'émetteur allant de $0.001\mu\text{m}$ jusqu'à $1\mu\text{m}$. Pour chacune des valeurs de l'épaisseur de l'émetteur, les paramètres électriques de la cellule solaire ont été déterminés, comme illustrés dans les figures (3-5). Comme le montre la figure 3, la tension de circuit ouvert augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur, alors que la densité de courant de court-circuit augmente d'abord, puis diminue. La cellule solaire GaAs délivre une densité de courant de court-circuit maximale de 37.23 A/cm^2 pour une épaisseur de l'émetteur de $0.003\mu\text{m}$.

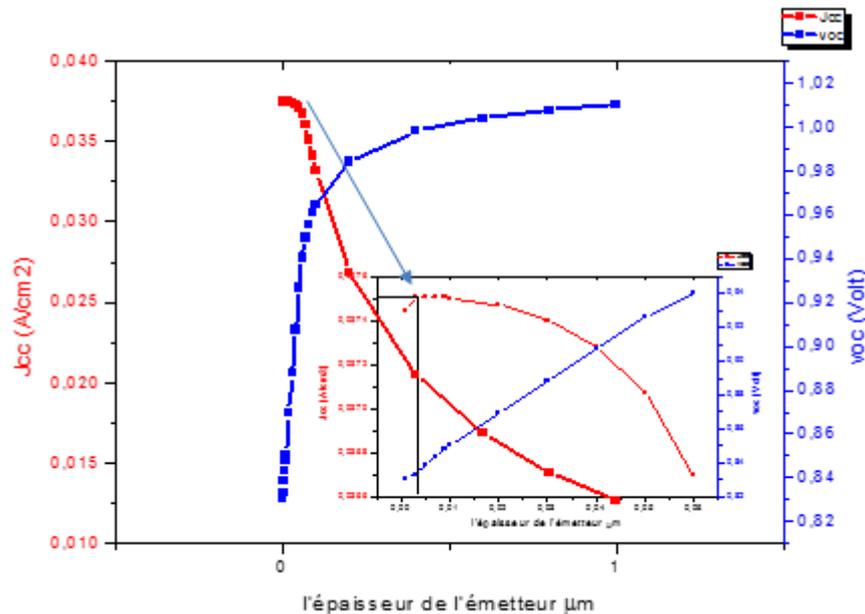


Figure 3–Densité de courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de l'émetteur pour une cellule solaire GaAs N/P.

La figure 4 montre que lorsque l'épaisseur de l'émetteur augmente, la puissance maximale produite par la cellule solaire GaAs augmente d'abord, puis diminue. La cellule solaire GaAs produit une puissance électrique maximale lorsque l'épaisseur de l'émetteur est $0.05\mu\text{m}$.

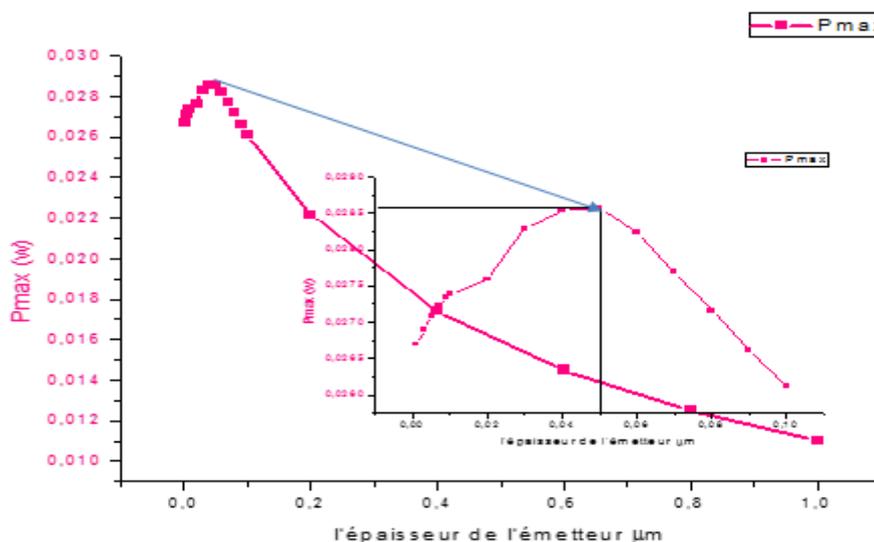


Figure 4–Puissance électrique P_{max} en fonction de l'épaisseur de l'émetteur pour une cellule GaAs N/P.

D'après la figure 5, le rendement de conversion photovoltaïque de la cellule solaire GaAs augmente d'abord avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur, puis il diminue. La cellule solaire GaAs présente un rendement maximal de 28.56% lorsque l'épaisseur de l'émetteur est $0.05\mu\text{m}$.

Ainsi, l'épaisseur optimale de l'émetteur de la cellule solaire mono-jonction GaAs est de $0.05\mu\text{m}$.

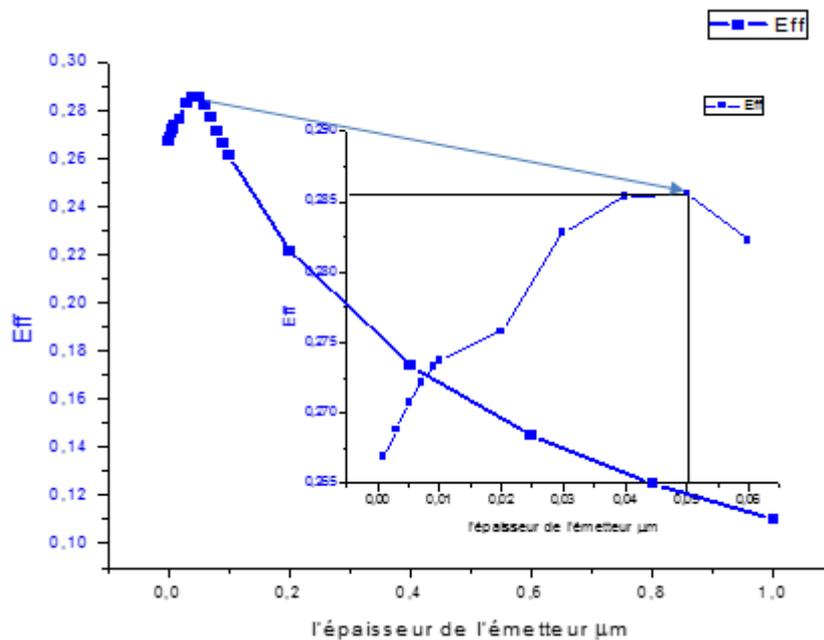


Figure 5– Le rendement de la conversion en fonction de l'épaisseur de l'émetteur

III.2. Caractéristiques électriques de la cellule solaire GaAs

Les caractéristiques électriques de la structure optimale de la cellule solaire GaAs sont données dans la figure 6. Elle présente dans les conditions de fonctionnement standards (AM1.5, 0.1W/cm² et 300K), les paramètres électriques suivants :

$$J_{cc}=37.23\text{mA/cm}^2.$$

$$V_{oc}=0.93\text{V}.$$

$$P_{max}=28.57\text{mW}.$$

$$FF=82.56\%.$$

$$\eta= 28.56\%.$$

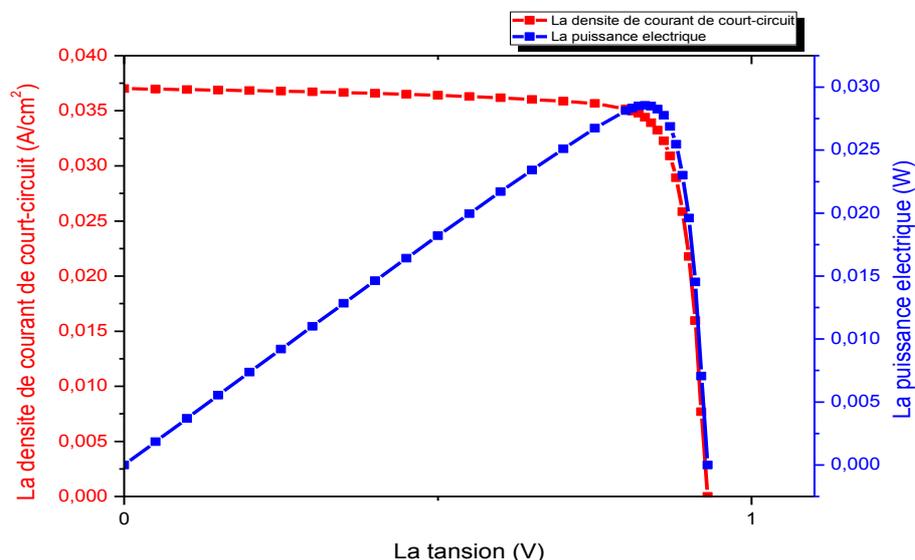


Figure 6– Caractéristiques électriques $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule solaire GaAs optimale

La comparaison de nos résultats avec ceux obtenus et publiés auparavant par M. Kayes et al. [16], montre que le rendement de la cellule solaire GaAs que nous proposons, a un meilleur rendement 28.56% contre 27.6% [16]. La cellule solaire optimale GaAs que nous avons conçue nous a permis d'améliorer le courant de court-circuit d'une cellule solaire GaAs à une jonction.

IV. Conclusion

Lors de cette étude, nous avons optimisé l'épaisseur de l'émetteur d'une cellule solaire GaAs mono-jonction afin d'améliorer le rendement de conversion photovoltaïque. Pour cela, la cellule solaire GaAs a été simulée en utilisant TCAD-Silvaco pour différentes épaisseurs de l'émetteur.

Les résultats obtenus montrent que lorsque l'épaisseur de l'émetteur augmente, les paramètres électriques de la cellule solaire GaAs augmentent d'abord, puis diminuent. La cellule solaire mono-jonction GaAs présente dans les conditions de fonctionnement standards un rendement maximal de 28.56% pour une épaisseur optimale de l'émetteur de 0.05 μ m.

La comparaison de nos résultats avec ceux publiés auparavant montre que la cellule solaire que nous proposons présente un meilleur rendement.

REFERENCES

- [1] Dimroth. F and Kurtz. S, March 2007, "High-Efficiency Multijunction Solar Cells", MRS bulletin, Vol. 32, www.mrs.org/bulletin.
- [2] Evoy. A. Mc, Markvart. T and Castaner. L, 2012, "Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications", Second Edition, Elsevier Ltd, ISBN: 978-0-12-3859334-1.
- [3] Zdanowicz. T, Rodziejewicz. T, Zabkowska-Waclawek. M, May 2005, "Theoretical analysis of the optimum energy band gap of semiconductors for fabrication of solar cells for applications in higher latitudes locations", Solar Energy Materials and Solar Cells, vol.87, pp 757-769.
- [4] Mesrane. A, Mahrane. A, Rahmoune. F., and Oulebsir. A, 2017, "Optimal band gaps for InGaN single and double junction solar cells", in Proceedings of the International Conference on Advanced Systems and Electrical Technologies (IC_ASET).
- [5] Green. M, 1998, "Solar Cells, Operating Principles, Technology and System Applications", University of New South Wales.
- [6] Brozel. MR and Stillman. GE, 1996, "Properties of Gallium Arsenides", 3rd edition, Institution of Electrical Engineers.
- [7] Jha. A. R, 2010, "Solar cell Technology and applications", Taylor & Francis Group, p.26, ISBN 978-1-4200-8177-0.
- [8] Fan. John C. C, Bozler Carl O, and Palm Barbara J, 1 December 1979, "Calculated and measured efficiencies of thinfilm shallowhomojunction GaAs solar cells on Ge substrates", Appl. Phys. Lett. 35(11).
- [9] Bauhuis. G.J, Mulder. P, Haverkamp. E.J, Huijben. J.C.C.M and Schermer. J.J, 2009, "26.1% thin-film GaAs solar cell using epitaxial lift-off", Solar Energy Materials & Solar Cells, doi:10.1016/j.solmat.2009.03.027
- [10] Lin. C.C, Chen. H.C, Tsai. Y.L, Han. H.V, Shih. H.S, Chang. Y.A, Kuo. H.C, and Yu. P, 2012, "Highly efficient CdS-quantum-dot-sensitized GaAs solar cells", Optical Society of America, Vol. 20, No. S2 / OPTICS EXPRESS A319.
- [11] Abderrezek. M, Djahli. F, Fathi. M and Ayad. M, 2013, "Numerical Modeling of GaAs Solar Cell Performances, ELEKTRONIKA IR ELEKTROTEHNIKA, ISSN 1392-1215, VOL. 19, NO. 8, <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.19.8.5392>.
- [12] Leem. J.W and Yu. J.S, May 2014, "Theoretical Modeling and Optimization of III-V GaInP/GaAs/Ge Monolithic Triple-junction Solar Cells", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 64, No. 10, pp. 1561~1565.
- [13] Bonkougou. D, Koalaga. Z and Njomo. D, March 2013, "Modelling and Simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in MATLAB", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 3, Issue 3).
- [14] Li. Z, Xiao. H, Wang. X, Wang. C, Deng. Q, Jing. L, Ding. J, and Hou. X, 2013, "Theoretical simulations of InGaN/Si mechanically stacked two-junction solar cell", Physica B: Condensed Matter, vol. 414, pp. 110–114. Doi: 10.1016/j.physb.2013.01.026.
- [15] Levinshtein. M, Rumyantsev. S and Shur. M, 1999, "HANDBOOK SERIES ON SEMICONDUCTOR PARAMETERS", VOLUME 2: Ternary and Quaternary A3BJ Semiconductors, World Scientific, Singapore, New Jersey London, Hong Kong.
- [16] Kayes. B.M, Nie. H, Twist. R, Spruytte. S.G, Reinhardt. F, Kizilyalli. I.C, and Higashi. G.S, 2011, "27.6% CONVERSION EFFICIENCY, A NEW RECORD FOR SINGLE-JUNCTION SOLAR CELLS UNDER 1 SUN ILLUMINATION", IEEE.