



Journal Homepage: [-www.journalijar.com](http://www.journalijar.com)

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI:10.21474/IJAR01/18135
DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/18135>



RESEARCH ARTICLE

RÉSISTANCE SÉRIE DANS LA PHOTOPILE BIFACIALE (N+/P/P+) AU SILICIUM SOUS CHAMP MAGNÉTIQUE : EFFET DE LA RÉSONANCE EN TEMPÉRATURE DU COEFFICIENT DE DIFFUSION

Ousmane Sow^{1,2}, Abdoulaye Diop¹, Khady Loum^{1,2}, Youssou Traore^{1,2}, Sega Gueye^{1,3}, Moustapha Thiame^{1,4}
and Gregoire Sissoko¹

1. Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.
2. Institut Universitaire de Technologie. Université Iba Der THIAM de Thiès-Senegal.
3. Faculte des Sciences et Technologies de L'éducation et de la Formation-Departement de Physique et Chimie, Université Cheikh Anta DIOP, Dakar-Sénégal.
4. Université Assane SECK, Ziguinchor, Senegal.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 11 November 2023
Final Accepted: 14 December 2023
Published: January 2024

Key words:-

Photopile Bifaciale au Silicium, Champ Magnétique, Température, Coefficient de Diffusion, Epaisseur Optimum, Résistance Série

Abstract

Dans ce travail, l'accent est mis sur l'étude de la caractéristique densité de courant - tension, obtenue de la photopile sous éclairage, en lien avec la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la jonction, pour différentes valeurs de l'épaisseur optimum obtenue pour chaque valeur du coefficient de diffusion optimum. Le paramètre électrique qu'est la résistance série est alors déduit et étudié en fonction de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la jonction, imposant le point de fonctionnement à la photopile d'épaisseur optimum de la base induite par le coefficient de diffusion maximum.

Copy Right, IJAR, 2024,. All rights reserved.

Introduction:-

Une étude théorique en modélisation à une dimension [1-3] est présentée de la photopile bifaciale au silicium, en présence de champ magnétique [4-11], sous température [12-16], et éclairée par une lumière monochromatique à flux constant par la face arrière [17-19]. A partir de cette modélisation, l'équation de continuité des porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile est résolue, munie des conditions aux limites d'espace spécifiques à cette structure, caractérisée par les vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires de charge [20-36] à la jonction (S_f) et en face arrière (S_b). Les expressions, de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base, de la densité de photocourant, ainsi que les expressions des vitesses de recombinaison intrinsèques à la jonction et en face arrière ont été établies. L'épaisseur optimum (H_{opt}) de la base de la photopile a été obtenue, à l'aide des différentes courbes ($S_f(H)$ et $S_b(H)$) pour une diffusion maximale (D_{max}) imposée par la température et le champ magnétique [37]. L'importance des relations établies ($H_{opt}(D_{max})$) permet de comprendre les mécanismes physiques qui gouvernent le mouvement des charges (Loi de Laplace et processus Umklapp) dans la base de la photopile, pour un fonctionnement électrique optimum [38]. A partir de l'étude de la caractéristique $I(S_f, H_{opt})$ - $V(S_f, H_{opt})$ de la photopile [39-40], l'expression de la résistance série ($R_s(S_f)$) [41-50] est produite pour chaque (H_{opt}) et graphiquement représentée en fonction de la vitesse (S_f) de recombinaison à la jonction des porteurs minoritaires de charge, pour chaque cas (D_{max}) de diffusion maximum.

Corresponding Author:- Gregoire Sissoko

Address:- Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.

Détermination de la caractéristique I-V, sous l'influence de l'épaisseur optimum

A partir du concept de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge, en particulier (Sf) à la jonction, l'expression de la phototension est établie.

Expression de la phototension

L'expression de la tension à la jonction (n+/p) en x= 0, est obtenue par la relation de Boltzmann donnée par l'équation suivante:

$$V_{ph}(Sf, Hop(Dmax), \lambda) = V_T \cdot \ln \left(\frac{Nb}{n_i^2} \cdot \delta(x=0, Hop(Dmax), \lambda) + 1 \right) \tag{1}$$

La densité des porteurs minoritaires de charge à la jonction (n+/p) en x= 0 est : $\delta(x=0, Hop(Dmax), \lambda)$

L'étude s'appuyant sur les mécanismes physiques de la loi de Laplace et du processus Umlapp, a produit une relation [38] entre le coefficient de diffusion (Dmax) et la température optimale:

$$D_{max}(B) = 2,1 \cdot 10^5 \cdot [T_{opt}(B)]^{-1,58} \tag{2}$$

En conséquence l'épaisseur optimum (Hop (Dmax)) de la base de la photopile est déduite, pour chaque cas de Dmax [37].

V_T est la tension thermique, cette tension est définie par :

$$V_T = \frac{K_b}{q} T \tag{3}$$

K_b est la constante de Boltzmann, et T la température absolue.

n_i est la concentration intrinsèque et N_b est le taux de dopage en atomes accepteurs dans la base

q est la charge élémentaire de l'électron

Influence de l'épaisseur optimum de la base sur la phototension

En fonction de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge (Sf) à la jonction, la phototension est représentée ci-dessous, pour chaque valeur de l'épaisseur optimum (Hop(Dmax)).

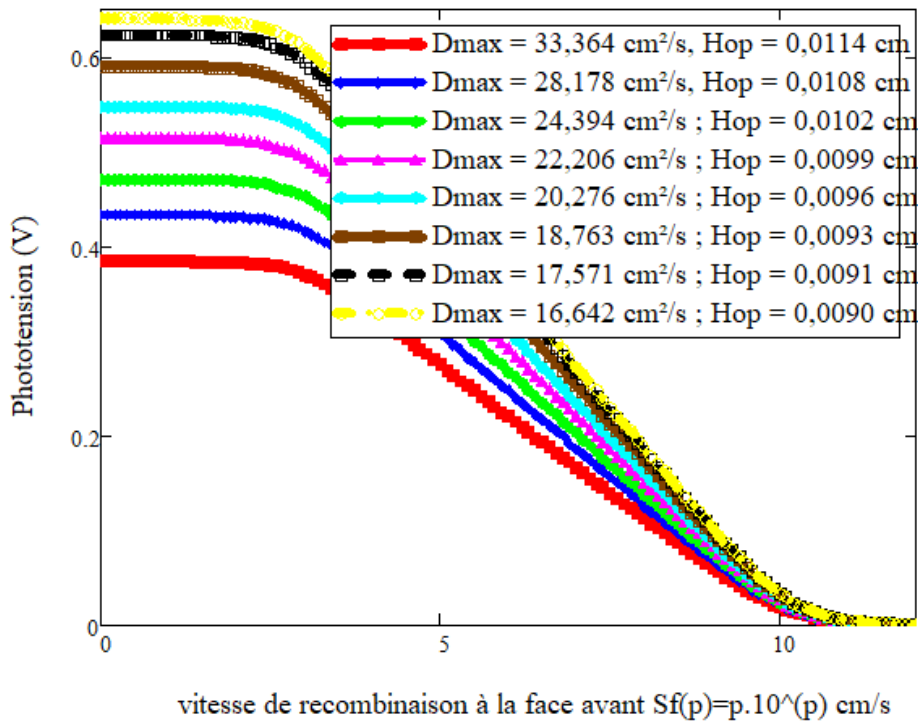


Figure 1:- Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction sous l'influence du coefficient de diffusion.

A partir de la courbe de la phototension, aux faibles valeurs de (Sf), les valeurs de la phototension de la photopile en circuit ouvert, sont extraites et consignées dans le **tableau. 1**, pour chaque valeur de l'épaisseur optimum (**Hop(Dmax)**).

Tableau 1:-Vco en fonction de Dmax et de l'épaisseur optimum de la base pour un coefficient d'absorption donné.

Dmax (cm ² /s)	33.364	28.178	24.394	22.206	20.276	18.763	17.571	16.642
H _{op} (cm)	0.0114	0.0108	0.0102	0.0099	0.0096	0.0093	0.0091	0.0090
Vco(V)	0.384	0.433	0.471	0.515	0.548	0.590	0.623	0.640

Ce **tableau .1** nous permet de tracer la **figure. 2**,représentant le profil de la phototension de circuit-ouvert en fonction de l'épaisseur optimum de la base pour un coefficient d'absorption donné.

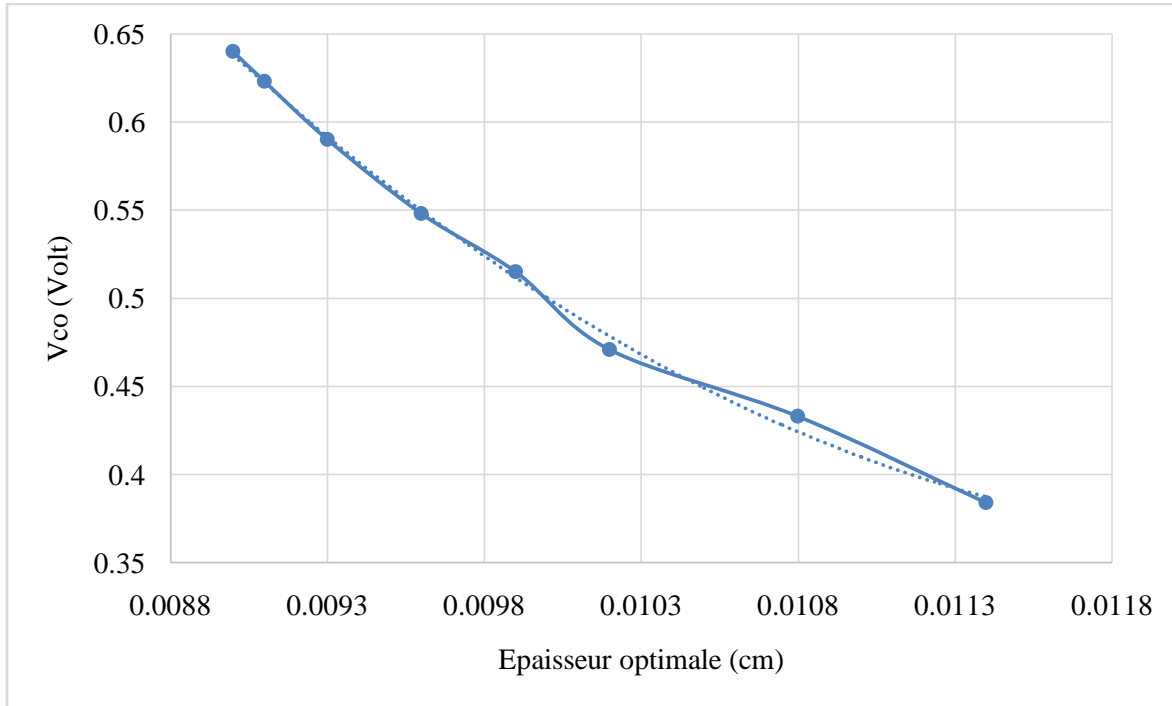


Figure 2:- Profil de la phototension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur optimum.

La phototension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur optimum (Hop(Dmax)) est décroissante, et son équation de corrélation mathématique, est donnée par la relation suivante:

$$V_{co} = 2384H_{op}^2 - 590,98H_{op} + 4,0255 \quad (4)$$

Influence de l'épaisseur optimum de la base sur la caractéristique I-V

A partir des résultats obtenus [37] la densité de photocourant et de la phototension, en fonction de la vitesse (Sf) de recombinaison des porteurs minoritaires de charge, la caractéristique courant-tension [39, 40] de la photopile peut être étudiée.

La **figure.3** représente l'influence de l'épaisseur optimum de la base sur la caractéristique I-V à partir de différents Dmax

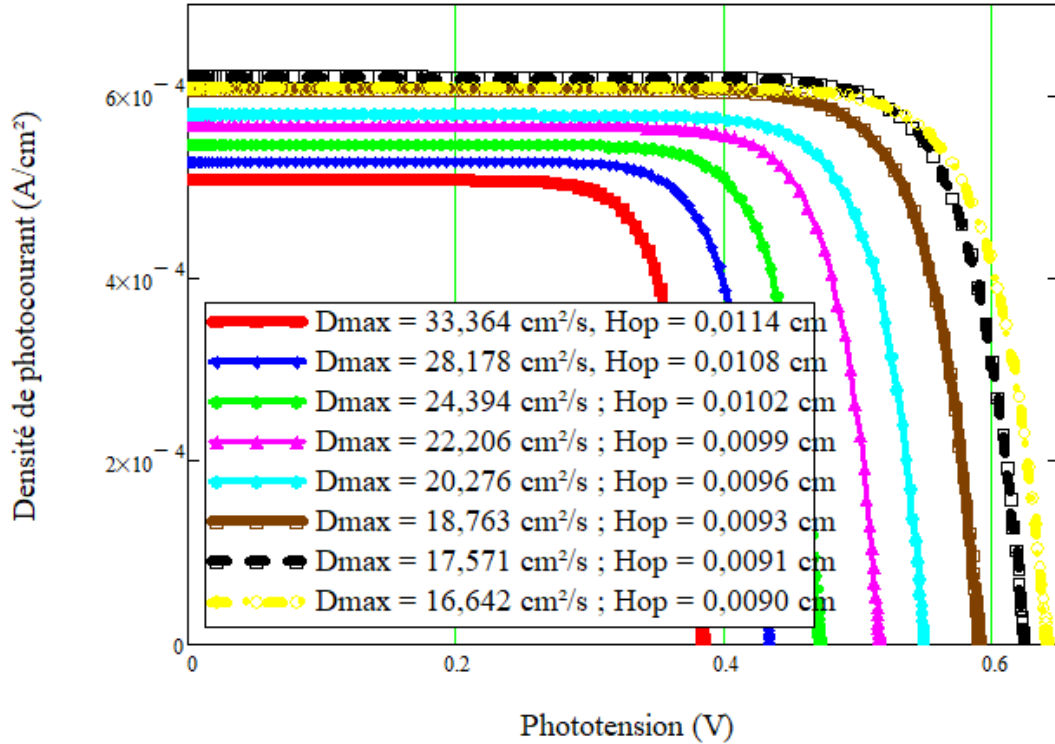


Figure 3:- Caractéristique J-V, pour différentes épaisseur optimum $H_{opt}(D_{max})$.

La **figure. 3** représente la variation de la densité de photocourant en fonction de la phototension pour différentes valeurs de l'épaisseur optimum de la base $H_{opt}(D_{max})$. La densité de photocourant est maximale et constante aux faibles valeurs de la phototension et correspond à la densité de photocourant de court-circuit. Puis, elle diminue rapidement avant de s'annuler lorsque la phototension est maximale correspondant à la phototension de circuit ouvert.

Cette **figure. 3** permet de dresser le **tableau. 2** de valeurs de la densité du courant de court-circuit et de la phototension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur optimum $H_{opt}(D_{max})$.

Tableau 2:- Valeurs de la densité du courant de court-circuit (J_{phcc}) et de la tension de circuit ouvert (V_{co}) en fonction de $H_{opt}(D_{max})$.

D_{max} (cm ² /s)	33.364	28.178	24.394	22.206	20.276	18.763	17.571	16.642
H_{op} (cm)	0.0114	0.0108	0.0102	0.0099	0.0096	0.0093	0.0091	0.0090
V_{co} (V)	0.384	0.433	0.471	0.515	0.548	0.590	0.623	0.640
J_{phcc} (A/cm ²)*10 ⁻⁴	5.075	5.272	5.461	5.668	5.782	6.061	6.198	6.085

Ce **tableau. 2** permet de représenter la variation du photocourant de la photopile en fonctionnement de court-circuit, en fonction de l'épaisseur optimum de la base, à la **figure .4**, ci-dessous.

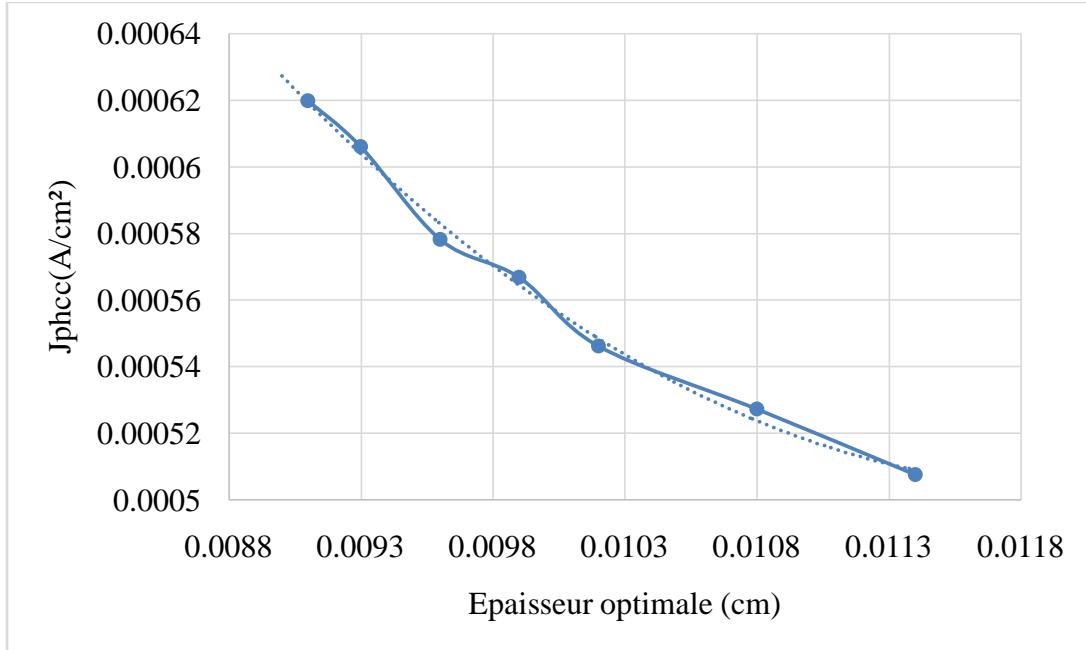


Figure 4:- Profil de la densité du photocourant de court-circuit en fonction de l'épaisseur optimum.

Cette **figure. 4** permet d'établir une corrélation mathématique entre la densité de photocourant de court-circuit et l'épaisseur optimum de la base de la photopile, exprimée par la relation suivante:

$$J_{phcc}(A \cdot cm^{-2}) = 13.745H_{op}^2 - 0.3298H_{op} + 0.0025 \quad (5)$$

A partir des expressions de la densité de photocourant et de la phototension, une photopile peut être représentée par son modèle électrique [41-50] donné à la **figure. 5**:

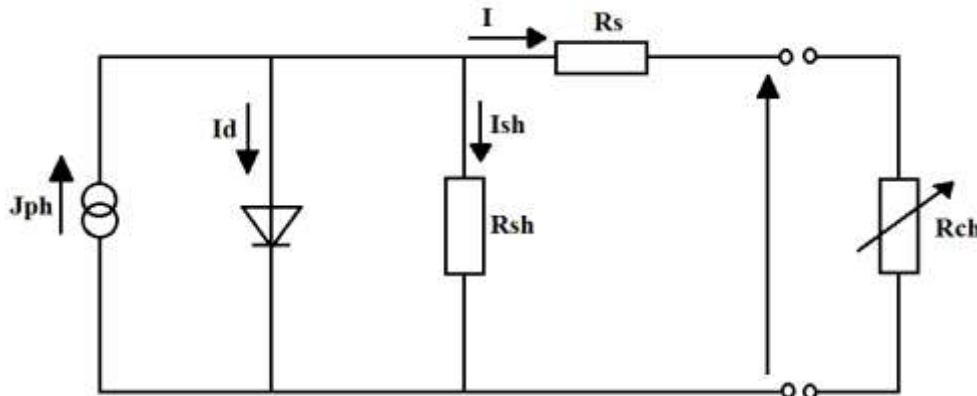


Figure 5:- Modèle électrique équivalent de la photopile sous éclaircissement.

Résistance série

C'est un paramètre électrique macroscopique important dans la caractérisation de la photopile. La résistance série d'une photopile dépend des effets conjugués de la résistivité du matériau semiconducteur, des contacts métalliques constituant les électrodes et la grille de collecte des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base. Elle est souvent très faible pour les photopiles de bonne qualité.

La résistance série (R_s) joue un rôle déterminant sur la qualité de la photopile. Elle modélise les pertes résistives au sein de la photopile (les métallisations) et est liée à l'impédance des électrodes et du matériau. C'est un paramètre fondamental dépendant de la nature du substrat, de la température et de la technologie utilisée. Plus cette résistance série est petite, plus la photopile est performante.

Expression

Sur la caractéristique I-V de la photopile, deux situations de fonctionnement caractéristiques sont distinguées. Il s'agit du fonctionnement en mode de circuit ouvert où la phototension est maximale (le photocourant presque nulle) et en mode court-circuit où le photocourant est maximal (la phototension presque nulle). En situation de circuit-ouvert, la caractéristique est une droite oblique permettant la modélisation de la photopile comme une source de tension idéale. La situation de fonctionnement de la photopile en circuit ouvert est montrée à la **figure. 6**.

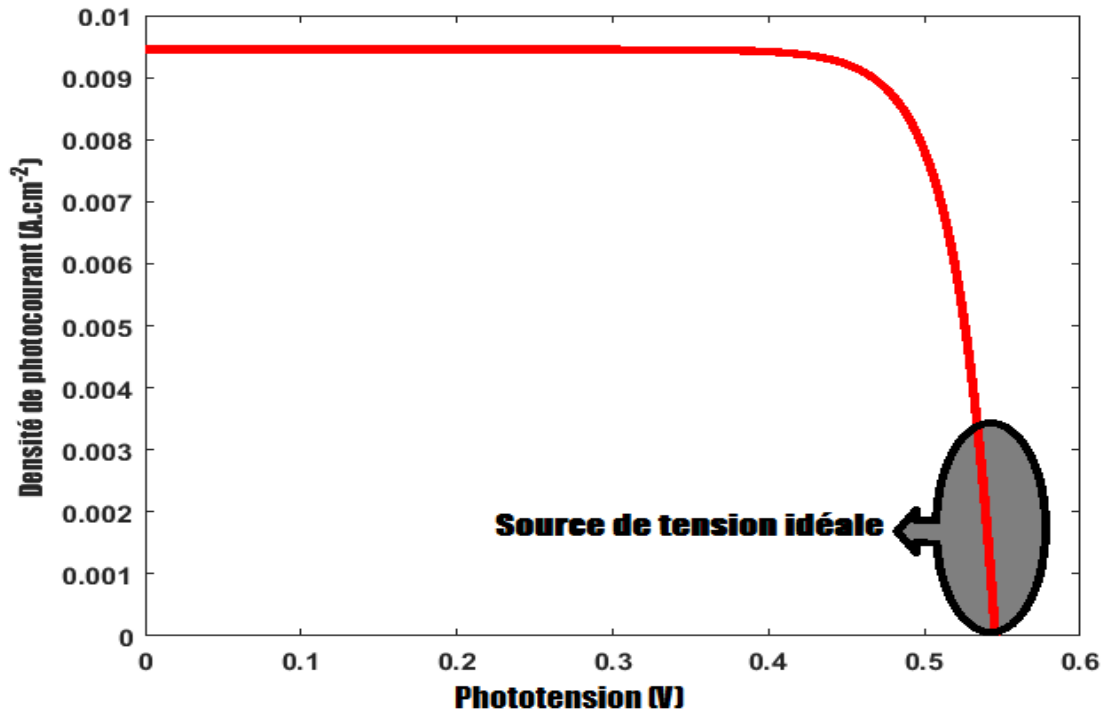


Figure 6:-Détermination de la résistance série à partir de la caractéristique I-V au voisinage du circuit ouvert.

La zone encadrée correspond à la partie de la caractéristique I-V qui est presque verticale et peu dépendante de la densité de photocourant. La photopile se présente comme une source de tension débitant une tension électrique constante quelle que soit la valeur du courant. Cette tension débitée correspond à la phototension de circuit ouvert de la photopile. Puisqu'une photopile réelle n'est pas idéale, elle présentera donc des fuites de tension. Ces fuites de tension, faibles pour les photopiles de bonne qualité, se caractérisent par la présence, dans le circuit équivalent électrique, d'une résistance montée en série, appelée résistance série, avec la source de tension de force électromotrice égale à la phototension de circuit ouvert de la photopile. Ainsi, selon le théorème de Thévenin, la cellule photovoltaïque peut être modélisée comme l'indique la **figure. 7**.

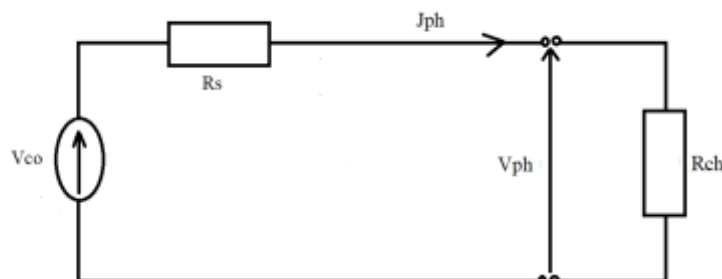


Figure 7:- Schéma électrique équivalent de la photopile comme un générateur de tension réel.

En appliquant la loi des mailles au circuit de la **figure. 7**, l'expression de la résistance série [41-50] de la photopile est donnée par:

$$R_s(S_f, \lambda, D_{max}) = \frac{V_{co}(D_{max}, \lambda) - V_{ph}(S_f, D_{max}, \lambda)}{J_{ph}(S_f, D_{max}, \lambda)} \tag{6}$$

Ainsi, la résistance série dépend de V_{co} , V_{ph} et J_{ph} lorsque la photopile est en mode circuit ouvert.

Influence du coefficient de diffusion (Dmax) et de l'épaisseur optimum

La **figure. 8** représente la variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de $H_{op}(D_{max})$.

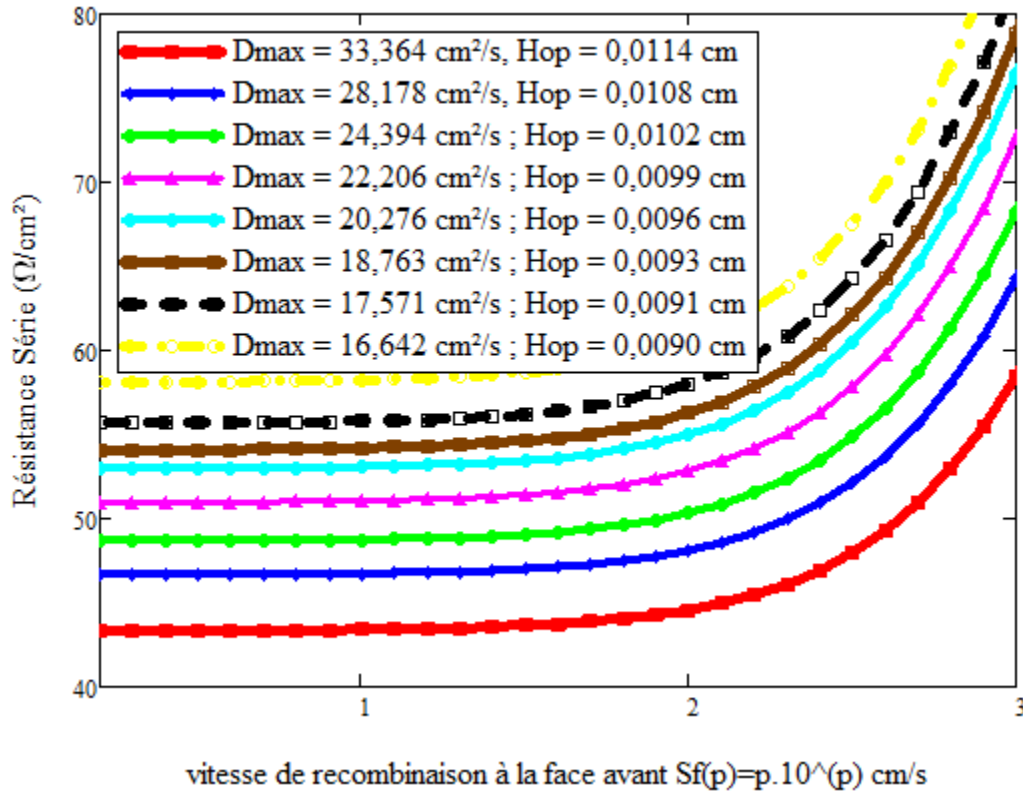


Figure 8:- Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction.

La **figure. 8** montre que la résistance série dépend de la vitesse de recombinaison à la jonction et augmente avec cette dernière. L'augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction correspond à une augmentation du nombre d'électrons traversant la jonction conduisant à l'échauffement du métal conducteur de la photopile.

Une augmentation de la résistance série est constatée lorsque ($H_{op}(D_{max})$) décroît. Cette **figure. 8** permet de dresser le **tableau. 3** ci-dessous, en s'appuyant sur le concept de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction limitant la tension de circuit ouvert [24, 25, 31-36].

Tableau 3:- Valeurs de la résistance série en fonction de Dmax et de Hop.

Dmax (cm²/s)	33,364	28,178	24,394	22,206	20,276	18,763	17,571	16,642
H _{op} (cm)	0,0114	0,0108	0,0102	0,0099	0,0096	0,0093	0,0091	0,0090
Rs(Ω/cm²)	43.401	46.698	48.726	51.074	53.062	54.185	55.784	58.244

Ce **tableau. 3** permet de représenter la **figure. 9**, donnant la résistance série en fonction de l'épaisseur optimum ($H_{op}(D_{max})$).

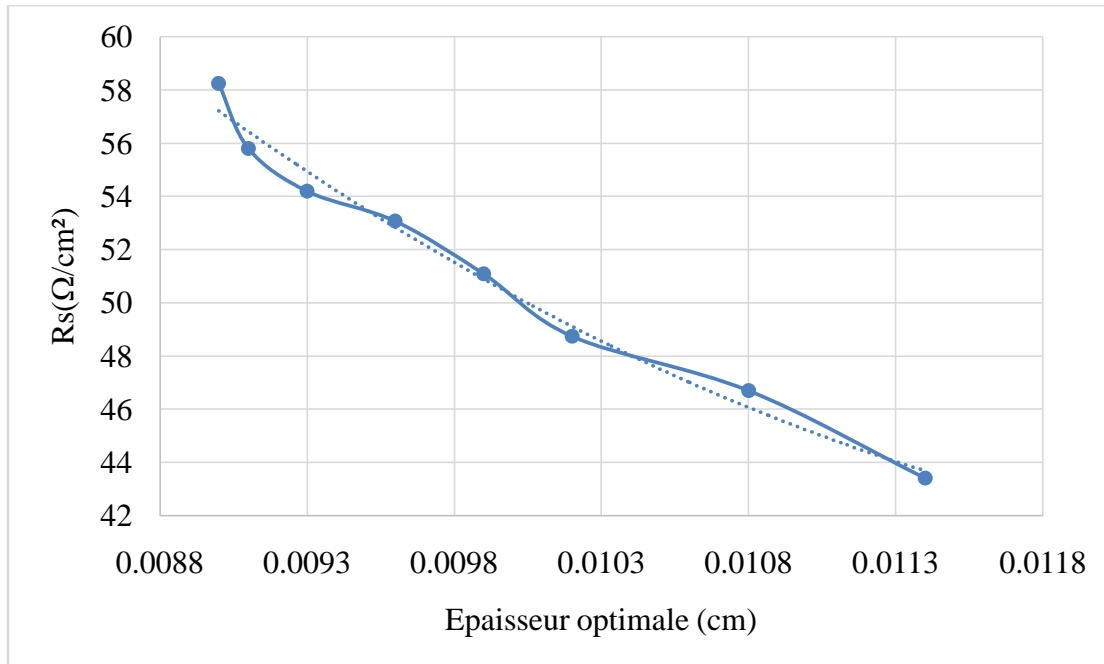


Figure 9:- Profil de la résistance série en fonction de l'épaisseur optimale.

On constate que quand la résistance série augmente lorsque l'épaisseur optimale diminue.

L'équation de corrélation mathématique obtenue s'exprime par:

$$R_s = 927919H_{op}^2 - 24566H_{op} + 203.14 \quad (7)$$

Conclusion:-

A partir des expressions de la densité du photocourant et de la phototension, la caractéristique courant-tension (I-V) de la photopile sous champ magnétique et sous éclairage est obtenue. De la situation de circuit ouvert de la photopile, la résistance série dans le circuit électrique équivalent est obtenue, par sa courbe de calibration en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, à l'ordonnée de l'abscisse correspondant à la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert, pour chaque valeur du champ magnétique. L'expression de la modélisation de la résistance série est ainsi établie en fonction de l'épaisseur optimum de la base de la photopile bifaciale en situation de résonance en température et éclairée par la face arrière.

References:-

- [1] Le Quang Nam M. Rodot, Solar cells with 15.6% efficiency on multicrystalline silicon, using impurity gettering back surface field and emitter passivation. *Int. J. Solar Energy*, 1992, 11, 273-279.
- [2] Fossum, J.G. and Burgess, E.L. (1978) High Efficiency p+-n-n+ Back-Surface-Field Solar Cells. *Applied Physics Letters*, 33, 238-240. <https://doi.org/10.1063/1.90311>
- [3] M.A. Green, (March 1995). *Silicon Solar cells advanced principles & practice* Printed by Bridge printer Pty. Ltd. 29-35 Dunning Avenue, Roseberry, Center for photovoltaic Devices and systems; pp.29-35.
- [4] F. Toure, M. Zougrana, B. Zouma, S. Mbodji, S. Gueye, A. Diao & G. Sissoko (2012) Influence of Magnetic Field on Electrical Model and Electrical Parameters of a Solar Cell Under Intense Multispectral Illumination. *Global Journal of Science Frontier Research (A)* Vol. XII, issue VI, Version I, p51-59.
- [5] A. Dieng, A. Diao, A.S. Maiga, A. Dioum, I. Ly, G. Sissoko, "A Bifacial Silicon Solar Cell Parameters Determination by Impedance Spectroscopy", *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2007)*, pp.436-440
- [6] S. Mbodji, H. Ly.Diallo, I.Ly, A.Dioum, I.F.Barro And G. Sissoko, "Equivalent Electric circuit of a bifacial solar cell in transient state under Constant magnetic field", *Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference (2006)*, pp. 447 – 450.
- [7] Flohr, Th. and Helbig, R. (1989). Determination of Minority-Carrier Lifetime and Surface Recombination Velocity by Optical-Beam-Induced-Current Measurements at Different Light Wavelengths. *Journal of Applied Physics*, 66, 3060-3065. <https://doi.org/10.1063/1.344161>

- [8] R. R. Vardanyan, U. Kerst, B. Tierock, H. G. Wagemann (1997). Measurement of recombination parameters of solar cell in a magnetic field. Proceeding of the 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Barcelona, Spain). Pp 2367-2369.
- [9] Y. Bester, D. Ritter, G. Bahia, S. Cohen and J. Sparkling, Method Measurement of the Minority Carrier Mobility in the Base of Heterojunction Bipolar Transistor Using a Magneto transport Method. Applied Physics Letters, 1995, 67, 1883- 1884. <https://doi.org/10.1063/1.114364>
- [10] Ayyazian, G.E., Kirakosyan, G.H. and Minasyan, G.A. (2004) Characteristics of Solar Cells with Vertical p-n Junction. Proceedings of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 7-11 June 2004, 117-119.
- [11] Dieng, A., Zerbo, I., Wade, M., Maiga, A.S. and Sissoko, G. (2011) Three-Dimensional Study of a Polycrystalline Silicon Solar Cell: The Influence of the Applied Magnetic Field on the Electrical Parameters. Semiconductor Science and Technology, 26, Article ID: 095023. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/26/9/095023>.
- [12] Rosling, M., Bleichner, H., Mundqvist, M. and Nordlander, E. (1992). A Novel Technique for the Simultaneous Measurement of Ambipolar Carrier Lifetime and Diffusion Coefficient in Silicon. Solid State Electronics, 35, 1223-1227. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(92\)90153-4](https://doi.org/10.1016/0038-1101(92)90153-4)
- [13] Konstantinos Misiakos and Dimitris Tsamakidis, Electron and Hole Mobilities in Lightly Doped Silicon. Appl. Phys. Lett. 1994, 64(15), 2007-2009. <https://doi.org/10.1063/1.111721>
- [14] ND. Arora, J. R. Hauser, D. J. Roulston, Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature. IEEE. Trans. Electron devices, 1982, ED-29, 292-295.
- [15] J M. Dorkel P. Leturcq, Carrier mobilities in silicon solar semi-empirically related temperature, doping and injection level. Solid State Electron, 1981, 24, 821-825.
- [16] K. M. Sy, A. Dieng, S. Tamba, M. S. Diouf, I. Diatta, M. Dieye, Y. Traoré, G. Sissoko. Effect of temperature on transient decay induced by charge removal of a silicon solar cell under constant illumination. Journal of Scientific and Engineering Research. Vol 3 n^o. 6; 2016, pp 2394- 2630.
- [17] Meier, D.L., Hwang, J.-M. and Campbell, R.B. (1988) The Effect of Doping Density and Injection Level on Minority Carrier Lifetime as Applied to Bifacial Dendritic Web Silicon Solar Cells. IEEE Transactions on Electron Devices, 35, 70-79. <https://doi.org/10.1109/16.2417>
- [18] Jain, G.C., Singh, S.N. and Kotnala, R.K. (1983) Diffusion Length Determination in n⁺-p-p⁺ Structure Based Silicon Solar Cells from the Intensity Dependence of the Short-Circuit Current for Illumination from the p⁺ Side. Solar Cells, 8, 239-248. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(83\)90063-7](https://doi.org/10.1016/0379-6787(83)90063-7)
- [19] G. Sissoko, E. Nanema, A. Correa, M. Adj, A.L. Ndiaye, M.N. Diarra (1998). Recombination parameters measurement in double sided surface field solar cell. Proceedings of World Renewable Energy Conference, Florence-Italy, pp. 1856-1859.
- [20] Denise, K., Mamadou, L.B., Mamour, A.B., Gora, D., El Hadj, S., Oulimata, M. and Gregoire, S. (2020) AC Back Surface Recombination in n⁺-p-p⁺ Silicon Solar Cell: Effect of Temperature. International Journal of advanced Research (IJAR), 8, 140-151. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/11273>
- [21] Diallo, H.L., Seidou, A., Maiga, Wereme, A. and Sissoko, G. (2008) New Approach of Both Junction and Back Surface Recombination Velocities in a 3D Modelling Study of a Polycrystalline Silicon Solar Cell. The European Physical Journal Applied Physics, 42, 203-211. <https://doi.org/10.1051/epjap:2008085>
- [22] Gaubas, E. and Vanhellemont, J. (1996) A Simple Technique for the Separation of Bulk and Surface Recombination Parameters in Silicon. Journal of Applied Physics, 80, 6293-6974. <https://doi.org/10.1063/1.363705>
- [23] E. Demesmaeker, J. Symons, J. Nijs, R. Mertens (1991). The Influence Of Surface Recombination On The Limiting Efficiency And Optimum Thickness Of Silicon Solar Cells. 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference Lisbon, Portugal-Pp.66-67
- [24] Amadou Mamour Ba, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Richard Mane, Moussa Ibra Ngom, Mamadou Yacine Ba, Khady Loum, Youssou Traore, Moustapha Thiame, Sega Gueye, Ousmane Sow, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. Determination of the junction intrinsic recombination velocity of minority carriers in the base of parallel vertical multi junctions' silicon solar cell using the open-circuit voltage calibration curve technique. Journal of chemical, biological and physical sciences, www.jcbcs.org, Volume 13, Issue 2, pp: 129 – 138, 2023
- [25] N, E.H., Sahin, G, Dieng, M., Thiam, A, Diallo, H.L., Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2015) Study of the Intrinsic Recombination Velocity at the Junction of Silicon Solar under Frequency Modulation and Irradiation. Journal of Applied Mathematics and Physics, 3, 1522-1535. <https://doi.org/10.4236/jamp.2015.311177>
- [26] O. Diasse, A. Diao, I. Ly, M. S. Diouf, I. Diatta, R. Mane, Y. Traore and G. Sissoko, (2018). Back Surface Recombination Velocity Modeling in White Biased Silicon Solar Cell under Steady State. Journal of Modern Physics, 9, 189-201. <https://doi.org/10.4236/jmp.2018.92012>

- [27] Y. L. B. Bocande, A. Correa, I. Gaye, M. L. Sow and G. Sissoko (1994). Bulk and surfaces parameters determination in high efficiency Si solar cells. *Renewable Energy*, vol 5, part III, pp. 1698-1700, Pergamon, 0960-1481 / 94\$ 700 +0.00.
- [28] Sissoko, G., Museruka, C., Corréa, A., Gaye, I. and Ndiaye, A.L. (1996). Light Spectral Effect on Recombination Parameters of Silicon Solar Cell. *World Renewable Energy Congress*, Pergamon, Part III, pp.1487-1490.
- [29] Joardar, K., Dondero, R.C. and Schroda, D.K. (1989) A Critical Analysis of the Small- Signal Voltage-Decay Technique for Minority-Carrier Lifetime Measurement in Solar Cells. *Solid-State Electronics*, 32, pp.479-483. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(89\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0038-1101(89)90030-0)
- [30] Rose, B.H. and Weaver, H.T. (1983) Determination of Effective Surface Recombination Velocity and MinorityCarrier Lifetime in High-Efficiency Si Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, 54, pp.238-247. <https://doi.org/10.1063/1.331693>.
- [31] Marcel SitorDiouf, GohanSahin, AmaryThiam, MoussaIbraNgom, Khady Faye, Doudou Gaye, GrégoireSissoko (September 2015). Determination of the junction surface recombination velocity limiting the open circuit (sfoc) for a bifacial silicon solar cell under external electric field. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 2 Issue 9, p 931-938, <http://www.ijiset.com>
- [32] I. Ly, Lemrabort, O.H., Dieng, B., Gaye, I., Gueye, S., Diouf, M.S. and Sissoko, G. (2012) Technics of Recombination Parameters Determination and the Validity Domain of a Polycrystalline Bifacial Silicon Solar Cell under Constant Multispectral Illumination in Static Mode. www.cder.dz/spip.php?article535
- [33] Fatimata Ba, boureimaSeibou, mamadou Wade, marcel SitorDiouf, brahima Ly and grégoireSissoko (2016).Equivalent Electric Model of the Junction Recombination Velocity limiting the Open Circuit of a Vertical Parallel Junction Solar Cell under Frequency Modulation. *IPASJ International Journal of Electronics & Communication (IIJEC)*, Volume 4, Issue 7, pp.1-11.
- [34] Diouf, M.S., et al. (2016) Study of the Series Resistance of a Solar Cell Silicon under Magnetic Field from of Junction Surface Recombination Velocity of Minority Charge Carriers at the Junction Limiting the Open Circuit (Sfoc). *Journal of Scientific and Engineering Research*, 3, 289-297. <http://www.jsaer.com>
- [35] Diouf, M.S., Gaye, I., Thiam, A., Fall, M.F.M., Ly, I. and Sissoko, G. (2014) Junction Recombination Velocity Induced Open Circuit Voltage for a Silicon Solar Cell under External Electric Field. *Current Trends in Technology & Sciences*, 3, 372-375. <http://www.ctts.in/>
- [36] I.Ly, M. Ndiaye, M. Wade, N. Thiam, S. Gueye and G. Sissoko, Concept of Recombination Velocity Sfcc at the Junction of a Bifacial Silicon Solar Cell, in Steady State, Initiating the Short-Circuit Condition. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2013, 5, 203-208. <https://doi.org/10.19026/rjaset.5.5105>
- [37] AbdoulayeDiop, Richard Mane, Gora Diop, IbrahimaDiatta, KhadyLoum, Sega Gueye, MoustaphaThiame, Ousmane Sow, Mamadou, Wade, GregoireSissoko. Bifacial Silicon (N+/P/P+) Silicon Solar Cell Base Thickness Optimization under Back Illumination of Long Wavelength: Effect of Diffusion Coefficient Resonance in Temperature under Applied Magnetic Field. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 2022, 9(11):152-165
- [38] R. Mane, Ibrahima Ly, Mamadou Wade, IbrahimaDatta, Marcel S. Douf, YoussouTraore, Mor Ndiaye, SeniTamba, Grégoire Sissoko (2017). Minority Carrier Diffusion Coefficient $D^*(B, T)$: Study in Temperature on a Silicon Solar Cell under Magnetic Field. *Energy and Power Engineering*, 9, pp.1-10 <http://www.scirp.org/journal/epe>
- [39] WafaaAbd El-Basit, Ashraf MoslehAbd El-Maksood and FouadAbd El-MoniemSaadSoliman (2013). Mathematical Model for Photovoltaic Cells. *Leonardo Journal of Sciences*, Issue 23, pp.13-28. (<http://ljs.academicdirect.org/>)
- [40] Sissoko, G., Nanéma, E., Corréa, A., Biteye, P.M., Adj, M. and N'Diaye, A.L. (1998). Silicon Solar Cell Recombination Parameters Determination Using the Illuminated I-V Characteristic. *World Renewable Energy Congress*, Florence, 20-25 September 1998, 1847-1851.
- [41] Yadav, P., Pandey, K., Tripathi, B., Kumar, C.M., Srivastava, S.K., Singh, P.K. and Kumar, M (2015). An Effective Way to Analyze the Performance Limiting Parameters of a Poly-Crystalline Silicon Solar Cell Fabricated in the Production Line. *Solar Energy*, 122, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.08.005>
- [42] M I. Ngom, Mohamed LemineCheikh, M. Yacine Ba, MalickNdiaye, A. Mamour Ba, SegaGueye, MoustaphaThiame, Ousmane Sow, MamadouWadeAndGregoireSissoko(2023). Magnétorésistance dans une photopile au silicium a jonctions verticales parallèles en régime statique sous éclairnement polychromatique. *International Journal of Advanced Research*, 11(06), 752-763

- [43] M. Bashahu and Habyarimna, (1995). Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance. *Renewable Energy*, 6, 2, pp. 127-138.
- [44] El-Adawi, M.K. and Al-Nuaim, I.A. (2002). A Method to Determine the Solar Cell Series Resistances from a Single I-V Characteristic Curve Considering Its Shunt Resistance—New Approach. *Vacuum*, 64, 33-36. [http://dx.doi.org/10.1016/S0042-207X\(01\)00370-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0042-207X(01)00370-0).
- [45] D. Chenvidhya, K. Kirtikara, C. Jivacate (2003). A new characterization method for solar cell dynamic impedance. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Volume 80, Issue 4, Déc. 2003, Pp. 459-464. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2003.06.011>
- [46] M.M. Dione, H. Ly Diallo, M. Wade, I. Ly, M. Thiame, F. Toure, A. Gueye Camara, N. Dieme, Z. Nouhou Bako, S. Mbodji, F. I. Barro, G. Sissoko . Determination of the shunt and series resistances of a vertical multijunction solar cell under constant multispectral light. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2010), pp. 250-254.
- [47] Grégoire Sissoko and Senghane Mbodji (2015). A method to determine the solar cell resistances from single I-V characteristic curve considering the junction recombination velocity (sf). *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol.*, 6(2) (2011), pp. 103-114-ISSN 2229 – 6107, www.ijopaasat.in
- [48] Barro, F.I., Gaye, S., Deme, M., Diallo, H.L., Samb, M.L., Samoura, A.M., Mbodji, S. and Sissoko, G. (2008) Influence of Grain Size and Grain Boundary Recombination Velocity on the Series and Shunt Resistances of a Poly-Crystalline Silicon Solar Cell. *Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valencia, 1-5 September 2008, 612-615.11
- [49] K. Bouzidi, M. Chegaar, A. Bouhemadou Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. Volume 91, Issue 18, 6 November 2007, Pages 1647-165. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.05.019>.
- [50] S. Mbodji, I. Ly, H.L. Diallo, M.M. Dione, O. Diassé and G. Sissoko (2012). Modeling Study of N⁺/P Solar Cell Resistances from Single I-V Characteristic Curve Considering the Junction Recombination Velocity (Sf) *Research Journal of Applied Sciences. Engineering and Technology* 4(1):1-7.