



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

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI: 10.21474/IJAR01/18715
DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/18715>



RESEARCH ARTICLE

ETUDE D'UNE PHOTOPILE (N+/P/P+) AU SILICIUM CRISTALLIN SOUS ECLAIREMENT POLYCHROMATIQUE EN MODULATION DE FREQUENCE : EFFET DE LA VITESSE SURFACIQUE DE RECOMBINAISON, DE LA FREQUENCE ET DE L'ÉPAISSEUR SUR LES PARAMETRES ELECTRIQUES

Matar Niane¹, Mohamed Abderrahim Ould El Moujtaba^{1,2}, Khady Loum^{1,3}, Rasmane Simpre^{1,4}, Ibrahima Diatta¹, Youssou Traore^{1,3}, Moustapha Thiame^{1,5}, Sega Gueye^{1,6} and Gregoire Sissoko¹

1. Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.
2. Faculte des Sciences et Techniques, Université de Nouakchott, -Mauritanie.
3. Université Iba Der THIAM de Thiès, Sénégal.
4. Université Nibert ZONGO, Koudougou, Burkina Faso.
5. Université Assane SECK, Ziguinchor, Senegal.
6. Faculte des Sciences et Technologies de l'éducation et de la Formation-Departement de Physique et Chimie, Université Cheikh Anta DIOP, Dakar-Sénégal.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 10 March 2024
Final Accepted: 14 April 2024
Published: May 2024

Key words:-

Photopile Au Silicium, Regime Dynamique-Vitesse De Recombinaison-Epaisseur-Puissance, Facteur De Forme

Abstract

L'étude de la photopile monofaciale (n+/p/p+) au silicium cristallin à travers la résolution de l'équation de diffusion en régime dynamique relative à la densité de porteurs minoritaires de charge dans la base(p), munie des conditions aux limites associées aux vitesses de recombinaison à la jonction et en face arrière, conduit aux caractéristiques électriques, courant-tension, puissance-tension délivrée et le facteur de forme. Ce travail montre et analyse sur ces quantités, les effets de la fréquence de modulation de la lumière polychromatique incidente, de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge en face arrière et de l'épaisseur de la base de la photopile.

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

Introduction:-

La réponse en courant et en tension permet d'analyser la performance d'une photopile [1 – 10] selon son architecture, la technique de fabrication et les conditions de fonctionnement appliquées. Ainsi, les mécanismes physiques définissant les paramètres phénoménologiques [11 – 33] entrant dans le processus de la conversion photovoltaïque peuvent affecter la performance [9] de la photopile. La caractéristique courant-tension [17, 34 – 38] est obtenue généralement par l'étude théorique de ces paramètres phénoménologiques qui sont : l'absorption, la génération, la recombinaison surfacique et volumique. Ces paramètres phénoménologiques sont reliés à travers l'équation de diffusion relative à la densité des porteurs minoritaires de charge dans la photopile, de géométries [10, 15, 16, 22] modélisées (1D ou 2D ou 3D, induisant la taille de grain, et les épaisseurs des différentes zones) et de choix de régime de fonctionnement (statique ou dynamique) [10 – 14, 17, 22, 29]. Les conditions d'étude sont fixées par les paramètres extérieurs [15, 20 – 28, 35] tels que : la température, le champ magnétique, le niveau d'éclairement, la fréquence de modulation de la lumière incidente et son spectre de longueur d'onde. Les conditions de mesure expérimentales de la caractéristique courant-tension sont réalisées et permettent les corrélations avec les paramètres macroscopiques, à travers les équations des courants, selon le modèle équivalent électrique [36 –

Corresponding Author:- Grégoire Sissoko (gsissoko@yahoo.com)

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

38] de la diode, sous obscurité ou éclaircissement et liée au régime de fonctionnement. Ces paramètres du modèle électrique[39 – 53] sont, résistif, capacitif et inductif, et sont obtenus par l'exploitation des résultats expérimentaux à travers la théorie.

Dans ce travail, nous allons étudier les effets sur la caractéristique courant-tension, sur la puissance délivrée ainsi que sur le facteur de forme:

- de la fréquence de modulation, -de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge, -de l'épaisseur de la base de la photopile.

Théorie

Présentation de la photopile et fonctionnement

L'étude considère une photopile monofaciale au silicium de type (n⁺/p/p⁺)[1]éclairée par une lumière polychromatique fonctionnant en régime dynamique de modulation de fréquence. La structure de la photopile considérée est décrite sur la **figure.1**, montrant l'émetteur(semi-conducteur de type(n)) revêtu de la grille métallique, suivi de la zone de charge d'espace(zce), ou jonction(siège d'un champ électrique qui permet de séparer les paires électron-trou, photogénérés) accolée à la base(semi-conducteur de type(p)), parachevée par la zone (p+), semi-conducteur surdopé qui permet de réaliser un champ électrique intense dans l'interface(p/p+) pour renvoyer les porteurs minoritaires de charge vers la jonction et aussi permettre un contact de type ohmique en face arrière.

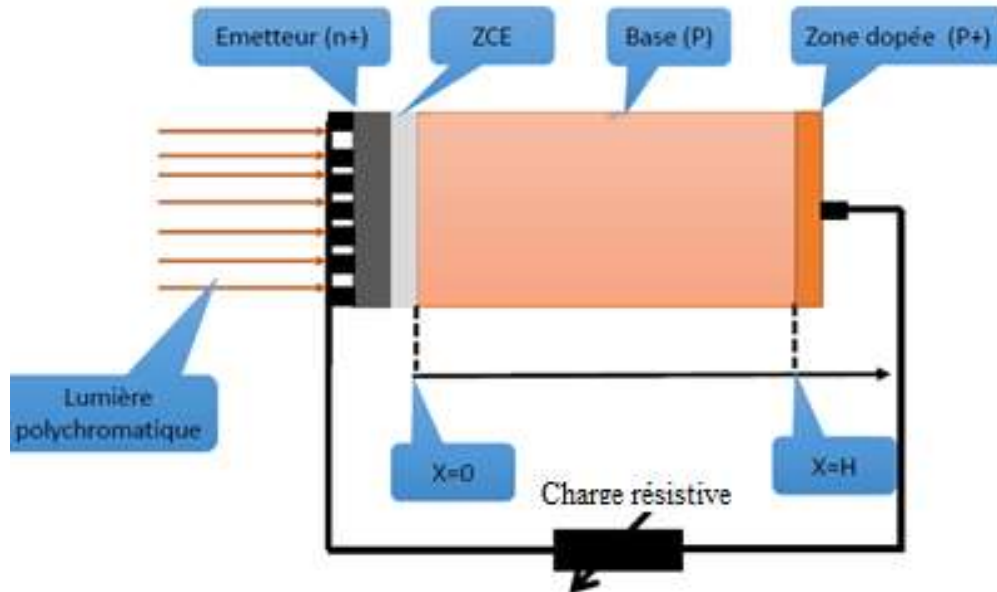


Figure1:- Structure d'une photopile monofaciale.

Equation de continuité relative à la densité des porteurs minoritaires de charge

L'équation de continuité relative à la densité de porteurs minoritaires de charge en excès $\delta(x, \omega, t)$ dans la base, sous illumination polychromatique en modulation de fréquence, est donnée par la relation suivante[54, 55]:

$$\frac{\partial \delta(x, \omega, t)}{\partial t} = G(x, \omega, t) - U(x, \omega, t) + \frac{1}{q} \frac{\partial J(x, \omega, t)}{\partial x} \quad (1)$$

$$U(x, t) = \frac{\delta(x, t)}{\tau} \quad (2)$$

$$J(x, t) = qD(\omega) \frac{\partial \delta(x, t)}{\partial x} \quad (3)$$

$\delta(x, \omega, t)$ = la densité des porteurs de charge en fonction de l'abscisse x et du temps t

$G(x, t)$ = le taux de génération des porteurs de charge en fonction de l'abscisse x et du temps t

$U(x, t)$ = taux de recombinaison des porteurs de charge en fonction de l'abscisse x

$J(x, t)$ = densité du courant à l'abscisse x et à un instant t

q = charge de l'électron . $D(\omega)$ = coefficient dynamique de diffusion

En combinant ces équationson obtient :

$$D \frac{\partial^2 \delta(x, \omega, t)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x, \omega, t)}{\tau} = \frac{\partial \delta(x, \omega, t)}{\partial t} - G(x, \omega, t) \quad (4)$$

$$\delta(x, \omega, t) = \delta(x) e^{i\omega t} \quad (5)$$

$$G(x, \omega, t) = g(x) e^{i\omega t} \quad (6)$$

Ou $\delta(x)$ et $g(x)$ sont respectivement les composantes spatiales de la densité des porteurs de charge et du taux de génération [56,57], et $e^{i\omega t}$ est la composante temporelle.

$$g(x) = \sum_{i=1}^3 a_i e^{-b_i x} \quad (7)$$

En remplaçant chaque grandeur par son expression dans (Equation. 1)] on obtient :

$$\frac{\partial^2 \delta(x, \omega)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x, \omega)}{L^2(\omega)} = -\frac{g(x)}{D(\omega)} \quad (8)$$

$$D(\omega) = D_0 \times \left(\frac{1 - j \cdot \omega^2 \cdot \tau^2}{1 + (\omega \cdot \tau)^2} \right) \quad (9)$$

$$L(\omega) = \sqrt{\frac{D(\omega) \cdot \tau}{1 + j\omega\tau}} \quad (10)$$

D_0 et τ respectivement coefficient de diffusion et durée de vie des porteurs de charge en régime permanent. La solution de l'équation de continuité est sous la forme :

$$\delta(x, \omega) = A \operatorname{ch} \left(\frac{x}{L(\omega)} \right) + B \operatorname{sh} \left(\frac{x}{L(\omega)} \right) + \sum_{i=1}^3 c_i e^{-b_i x} \quad (11)$$

Les constantes **A** et **B** sont déterminées à partir des conditions aux limites.

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \omega, S_f)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_f}{D(\omega)} \delta(0, \omega, S_f) \quad (12)$$

$$\left. \frac{\partial \delta(x, H, \omega, S_b)}{\partial x} \right|_{x=H} = -\frac{S_b}{D(\omega)} \delta(H, \omega, S_b) \quad (13)$$

S_f et **S_b** sont respectivement les vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la jonction [15, 16, 18, 20, 22, 31 – 34] et à la surface arrière [16, 18, 21 – 25, 29] de la photopile.

En régime dynamique fréquentiel, le coefficient et la longueur de diffusion des porteurs de charge (Equations. 9 et 10) sont des grandeurs complexes qui varient en fonction de la fréquence de modulation.

Expression de la phototension

Le phénomène de diffusion dans la photopile sous éclairage entraîne une différence de concentration des porteurs de charge entre deux points de la photopile. Cette différence de concentration donne naissance à une différence de potentiel qui est déterminé par la relation de Boltzmann.

$$V_{ph}(S_f, S_b, \omega, H) = V_T \ln \left(\frac{N_b}{n_i^2} * \delta(x, S_f, S_b, \omega, H) \Big|_{x=0} + 1 \right) \quad (14)$$

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

$$n_i = A \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp \left(-\frac{E_g}{2 \cdot K \cdot T} \right) \quad (15)$$

A : est une constante ($A = 3.87 \cdot 10^{16} \text{ Cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-\frac{3}{2}}$)

n_i : densité intrinsèque des porteurs minoritaires de charge.

N_b : le taux de dopage de la base

V_T : la tension thermique

k : la constant de Boltzmann ($k = 1.38 * 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$)

T : la température

q : la charge élémentaire ($q = 1.6 * 10^{-19} \text{ C}$)

a)

Caractéristique courant –tension

Des études précédentes [15, 16, 18, 20, 22, 31 – 34] ont montré que la densité de photocourant et la phototension sont reliées par la vitesse de recombinaison (S_f), à la jonction des porteurs minoritaires de charge. En faisant varier cette dernière l'ensemble de points ($V_{ph}(S_f)$, $J_{ph}(S_f)$) sur la caractéristique courant-tension de la photopile, est défini. Le concept de la vitesse de recombinaison à la jonction permet de décrire le point de fonctionnement de la photopile en relation avec la charge externe, quel que soit le régime de fonctionnement.

Ces études précédentes, ont donné les expressions de la phototension et de la densité de photocourant pour la photopile monofaciale par les équations suivantes :

L'équation. 3, conduit à l'expression suivante de la densité de photocourant :

$$J_{ph}(S_f, \omega, H, S_b) = S_f q \sum_{i=1}^3 C_i \left\{ \frac{e^{-b_i H} \left(b_i - \frac{S_b}{D(\omega)} \right) + K_1 - b_i L(\omega) K_2}{\left(K_1 + \frac{L(\omega) S_f}{D(\omega)} K_2 \right)} \right\} \quad (16)$$

La phototension, en tenant compte des équations 11 et 14, conduit à :

$$V_{ph}(S_f, S_b, \omega, H) = V_T \ln \left(\frac{N}{n_i^2} \left[\sum_{i=1}^3 C_i \left\{ \frac{e^{-b_i H} \left(b_i - \frac{S_b}{D(\omega)} \right) - L(\omega) K_2 b_i + K_1}{\left(K_1 + \frac{L(\omega) S_f}{D(\omega)} K_2 \right)} \right\} + 1 \right] \right) \quad (17)$$

Effet de la vitesse de recombinaison sur la face arrière

La figure.2 représente la caractéristique courant-tension de la photopile monofaciale pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge sur la face arrière.

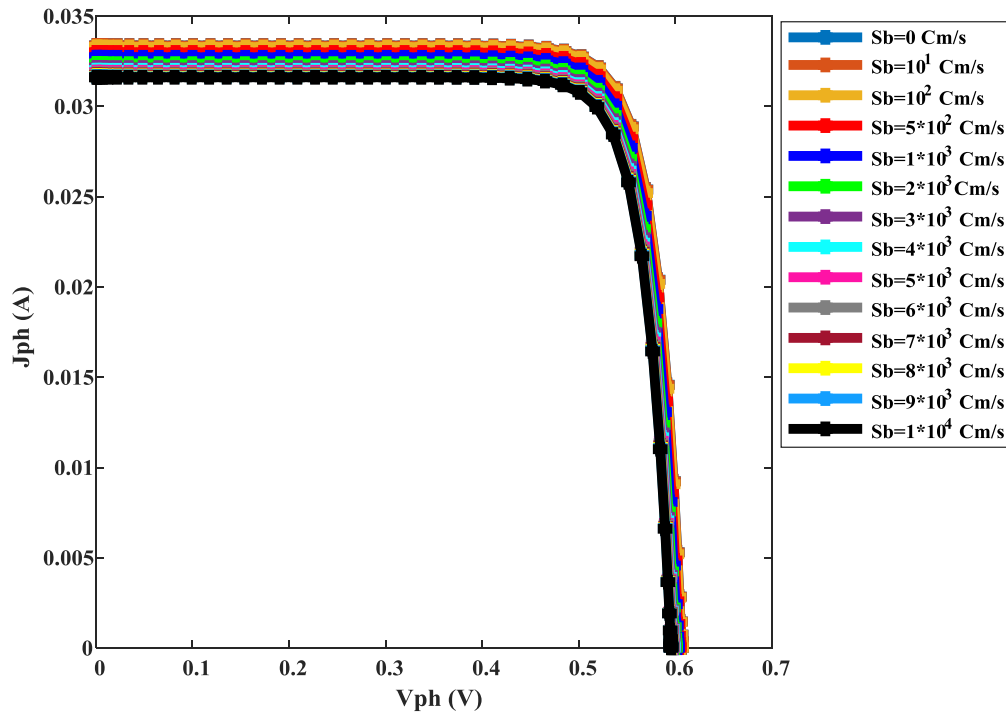


Figure 2:- Caractéristique courant-tension de la photopile.

$D_0 = 35 \text{ Cm}^2\text{s}^{-1}$, $\tau = 10^{-5}\text{s}$, $w = 1.9 * 10^4 \text{ rad. s}^{-1}$, $H = 0.011 \text{ Cm}$,

On observe que l'augmentation de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge en face arrière entraîne un accroissement sensible de la densité du courant de court-circuit et peu sensible de la phototension de circuit ouvert de la photopile.

Effet de la fréquence de modulation

La figure.3 représente la caractéristique courant-tension de la photopile monofaciale pour différentes valeurs de la fréquence de modulation.

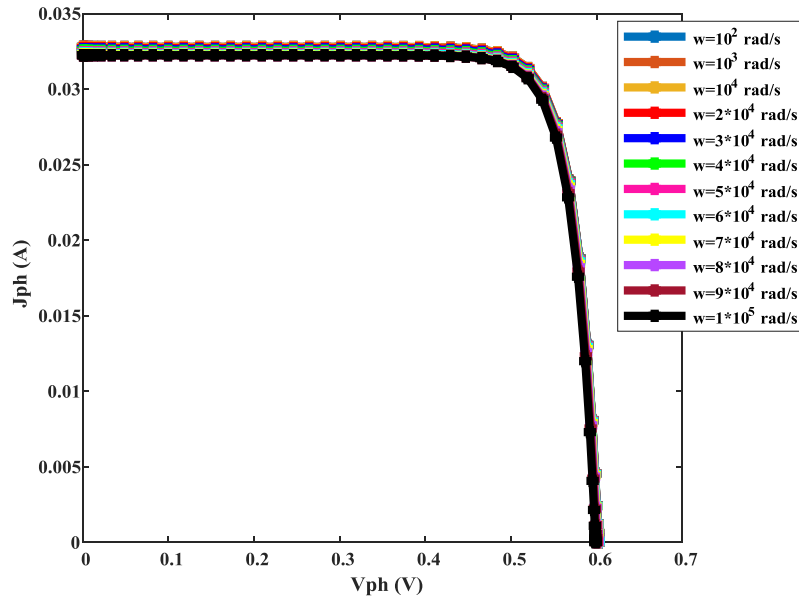


Figure2:- Caractéristique courant-tension de la photopile monofaciale pour différentes valeurs de ω .
 $D_0 = 35 \text{ Cm}^2\text{s}^{-1}$, $\tau = 10^{-5}\text{s}$, $H= 0.011 \text{ Cm}$, $S_b = 10^3 \text{ cm. s}^{-1}$, $z=0.01 \text{ Cm}$

On constate que l’augmentation de la fréquence de modulation entraine une faible diminution de la densité de photocourant de court-circuit de la photopile monofaciale ($\omega\tau \gg 1$). La caractéristique montre que la phototension de circuit ouvert est quasi indépendante de la fréquence de modulation.

Effet de l’épaisseur (H) de la base

La **figure.4** présente la caractéristique courant-tension de la photopile monofaciale pour différentes valeurs de l’épaisseur (H) de la base.

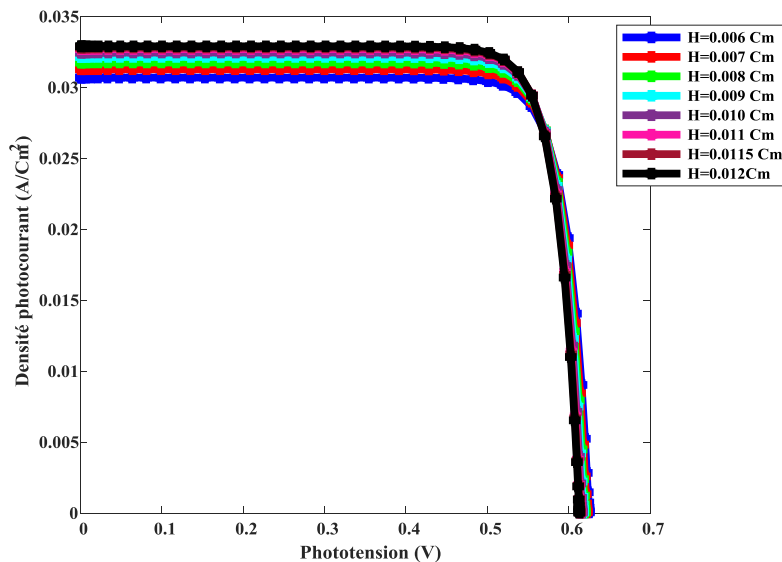


Figure 4:- Caractéristique courant-tension de la photopile monofaciale pour différentes valeurs de H $D_0 = 35 \text{ Cm}^2\text{s}^{-1}$, $\tau = 10^{-5}\text{s}$, $w = 1.9 * 10^4 \text{ rad. s}^{-1}$ $S_b = 10^3 \text{ cm. s}^{-1}$.

L’augmentation de l’épaisseur de la photopile monofaciale entraine une augmentation de la densité de photocourant de court-circuit et une faible diminution de sa phototension.

L'expression de la puissance

La puissance est un paramètre physique important, dépendant des paramètres phénoménologiques de la photopile (dont la géométrie et la cristallinité) et des conditions externes appliquées, notamment le point de fonctionnement, qui permet d'optimiser l'énergie produite, par la recherche du point de puissance maximale [59, –61]. Tenant compte du modèle équivalent électrique, l'expression de la puissance délivrée par la photopile sous éclairage polychromatique en modulation de fréquence est donnée par :

$$P(S_f, \omega, H, S_b) = J(S_f, \omega, H, S_b) \cdot V_{ph}(S_f, \omega, H, S_b) \quad (18)$$

$$J(S_f, \omega, H, S_b) = J_{ph}(S_f, \omega, H, S_b) - J_a(S_f, \omega, H, S_b) \quad (19)$$

$J_a(S_f, \omega, H, S_b)$ est la densité du courant de la diode. Son expression est donnée par:

$$J_a(S_f, \omega, H, S_b) = q \cdot S_{f0} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{ph}(S_f, \omega, H, S_b)}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (20)$$

La vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction (S_f) est donnée en plusieurs composantes [15, 16, 18, 20, 22, 31 – 34]:

$$S_f = S_{f0} + S_j \quad (21)$$

La vitesse de recombinaison S_j est associée à la variation de la résistance de charge externe, tandis que S_{f0} est associée à la résistance shunt intrinsèque à la photopile et draine les fuites de charge à travers de diode [29, 31, 32, 34, 36, 37].

Effet de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires charge sur la face arrière

La **figure.5** représente le profil de la puissance en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison en face arrière de la photopile monofaciale

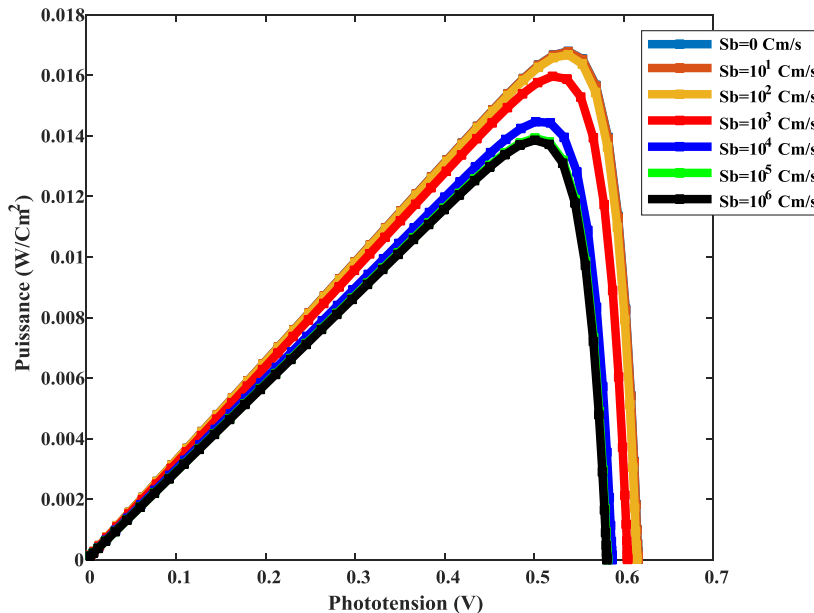


Figure5:- Caractéristique puissance-tension de la photopile monofaciale pour différentes valeurs de $S_b D_0 = 35 \text{ Cm}^2 \text{ s}^{-1}$, $\tau = 10^{-5} \text{ s}$, $w = 1.9 * 10^4 \text{ rad. s}^{-1}$, $H = 0.011 \text{ Cm}$, $z = 0.01 \text{ Cm}$, $S_{f0} = 10^4 \text{ cm. s}^{-1}$,

Le profil de la puissance en fonction de la phototension présente deux phases. Dans la première phase, la puissance de la photopile augmente avec la phototension jusqu'à une valeur maximale correspondant au point de puissance maximal de la photopile caractérisé par une tension maximale et une intensité de densité de courant maximale. Dans la deuxième phase la courbe décroît et tend vers zéro mettant en évidence ainsi la phototension de circuit ouvert qui décroît avec (S_b) qui traduit l'effet (BSF).

La **figure 5**.montre que l'augmentation de la vitesse de recombinaison des porteurs de charge sur la face arrière entraîne une diminution de la phototension de circuit ouvert et de la puissance maximale de la photopile.

Effet de la fréquence de modulation

Sur la **figure.6** nous représentons, pour la photopile monofaciale le profil de la puissance en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la fréquence de modulation.

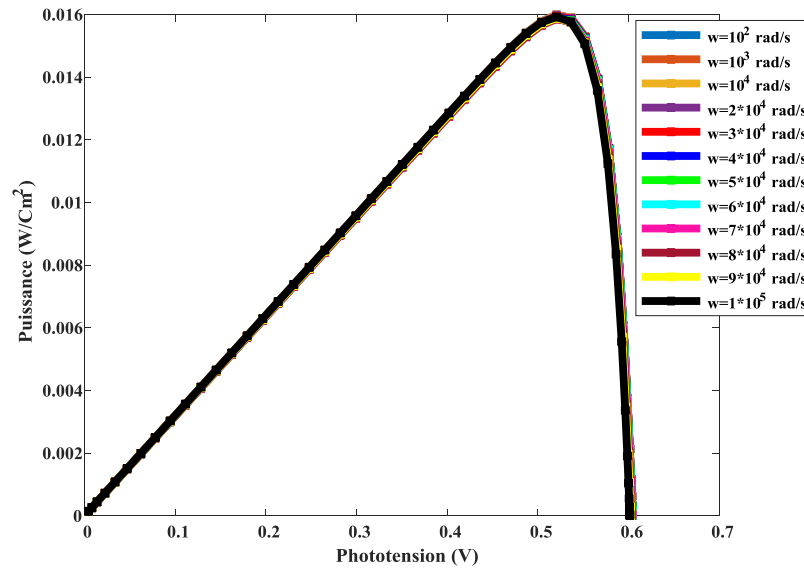


Figure 6:- Caractéristique courant-tension de la photopile monofaciale pour différentes valeurs de $\omega D_0 = 35 \text{ Cm}^2 \text{ s}^{-1}$, $\tau = 10^{-5} \text{ s}$, $H = 0.011 \text{ Cm}$, $S_b = 10^3 \text{ cm. s}^{-1}$, $z = 0.01 \text{ Cm}$, $S_{f0} = 10^4 \text{ cm. s}^{-1}$,

Pour la photopile monofaciale, la figure. 6 montre que l'augmentation de la fréquence de modulation entraîne une faible diminution de la phototension de circuit ouvert ainsi que la puissance maximale de la photopile.

Effet de l'épaisseur H

Sur la **figure. 7**, nous représentons, le profil de la puissance en fonction de la phototension pour différentes valeurs de l'épaisseur (H) de la base de la photopile monofaciale.

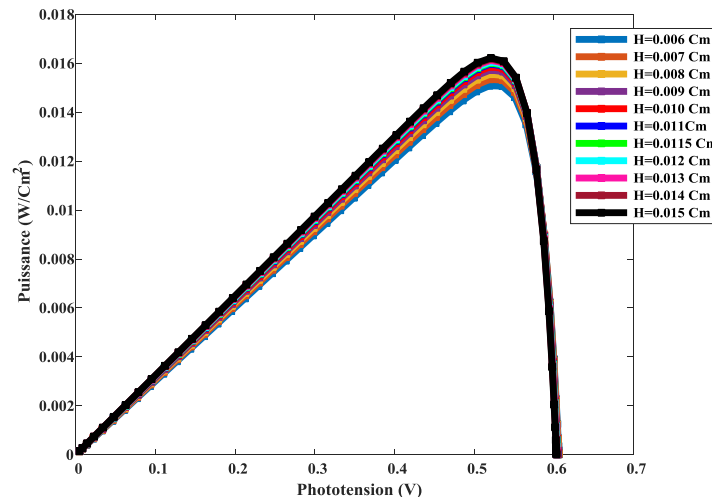


Figure 7:- Caractéristique courant-tension de la photopile monofaciale pour différentes valeurs de H.

$D_0 = 35 \text{ Cm}^2 \text{ s}^{-1}$, $\tau = 10^{-5} \text{ s}$, $w = 1.9 * 10^4 \text{ rad. s}^{-1}$, $S_b = 10^3 \text{ cm. s}^{-1}$, $S_{f0} = 10^4 \text{ cm. s}^{-1}$,

La figure. 7 montre que l'augmentation de l'épaisseur de la base entraîne une faible diminution de la phototension de circuit ouvert et une augmentation de la puissance maximale de la photopile.

Effet du coefficient de diffusion

Des travaux ont montré que la cristallinité à travers le taux de dopage (Nb) de la base, qui conduit au coefficient de diffusion des porteurs minoritaires de charge [58]. Alors le coefficient de diffusion (D_0) est un paramètre important

dans la réponse en courant et en tension pour la photopile. Pour une base en monocristallin ($D_0 = 35 \text{ Cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) ou en poly cristallin ($D_0 = 26 \text{ Cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), nous représentons respectivement sur la **figure. 8**, la caractéristique P-V de la photopile monofaciale

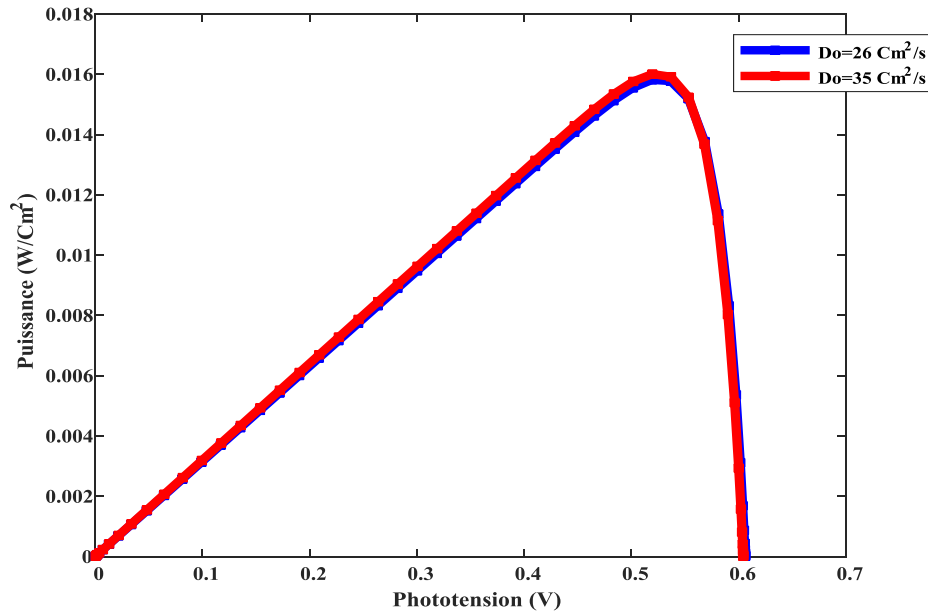


Figure 8:- Caractéristique courant-tension de la photopile monofaciale pour différentes valeurs D_0

Avec : $\tau = 10^{-5} \text{ s}$, $w = 1.9 \cdot 10^4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $S_b = 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $z=0.01 \text{ Cm}$, $S_{f0} = 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $H=0.0115 \text{ Cm}$

La **figure.8** montre que la photopile monofaciale dont la base est un monocristal a une phototension de circuit ouvert légèrement plus petite et de puissance maximum faiblement plus grande que la photopile monofaciale avec une base polycristallin.

Ces résultats montrent que la cristallinité a un effet relativement sensible sur la performance de la photopile monofaciale.

Facteur de forme

L'expression du facteur de forme (FF) [62] est donnée par la relation (22) suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot J_{cc}} \quad (22)$$

Le facteur de forme permet aussi de caractériser la fraction de la puissance perdue par la photopile. Ces pertes peuvent être dues à des effets de résistance [39 – 53] ou aux recombinaisons [15 – 25, 31 – 34] des porteurs de charge photogénérés.

La puissance maximale de la photopile notée P_{max} , est la valeur de puissance correspondant à une valeur maximale de la densité de photocourant (J_{max}) et une valeur maximale de la phototension (V_{max}). Elle correspond donc à un point de fonctionnement de la photopile fixé par une valeur S_{fmax} de la vitesse de recombinaison à la jonction. A cette valeur de Sf, la variation de la puissance est nulle. On peut donc déterminer l'expression de S_{fmax} et en déduire celle de puissance maximale en résolvant l'équation [59 – 61] :

$$\frac{\partial P}{\partial S_f} = 0 \quad (23)$$

La solution est constituée de valeurs propres issues de la démarche de représentation graphique des équations transcendantes obtenues pour la détermination de S_{fmax} . Alors pour la suite, nous étudions la caractéristique P-V pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison sur la face arrière (S_b), de la fréquence de modulation (ω), de l'épaisseur de la base (H) et de la cristallinité de la base caractérisé par D_0 . Nous avons constaté que la tension correspondant à la puissance maximale varie faiblement quel que soit les valeurs de (S_b), de (ω), de (H) ou de D_0 du à une faible variation de S_{fmax} . On peut donc obtenir la valeur de S_{fmax} à partir du profil de la puissance en

fonction de S_f en projetant sur l'axe des abscisses le point de la puissance maximale. Nous trouvons alors une valeur de $S_{f_{max}}$ voisine de $2.8 \cdot 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Nous examinons ensuite les effets de la fréquence de modulation, de l'épaisseur de la base et de la cristallinité sur le profil du facteur de forme en fonction de la vitesse de recombinaison sur la face arrière.

Effet de la fréquence de modulation

La **figure. 9**, donne le profil du facteur de forme en fonction de la vitesse de recombinaison sur la face arrière pour différentes valeurs de la fréquence de modulation.

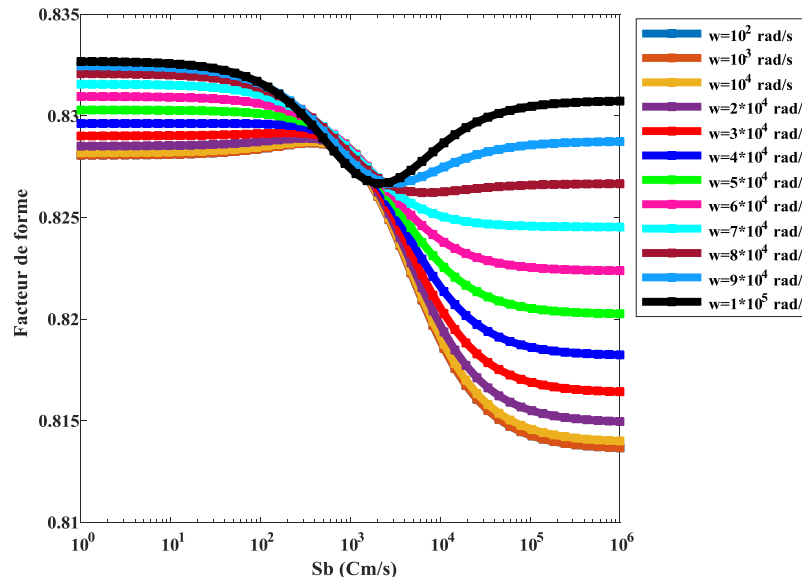


Figure9:- Facteur de forme de la photopile monofaciale en fonction de S_b pour différentes valeurs de $\omega D_0 = 26 \text{ Cm}^2 \text{ s}^{-1}$, $\tau = 10^{-5} \text{ s}$, $H = 0.011 \text{ Cm}$, $S_{f_{max}} = 2.8 \cdot 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $z=0.01 \text{ Cm}$, $S_{f_0} = 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$

La **figure. 9** montre que le profil du facteur de forme en fonction de la vitesse de recombinaison de porteurs minoritaires en face arrière, présente deux phases séparés par un petit intervalle de S_b [21] au voisinage $10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ dans lequel le facteur de forme varie faiblement avec la fréquence de modulation. Au delà de cette intervalle, le facteur de forme augmente avec la fréquence de modulation.

La première phase correspond aux valeurs de $S_b < 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Effet de l'épaisseur H

La **figure .10** donne le profil du facteur de forme en fonction de la vitesse de recombinaison sur la face arrière pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base.

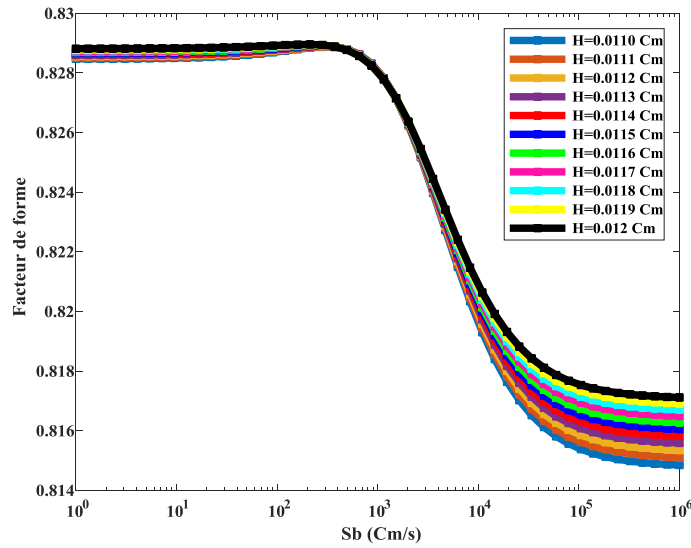


Figure10:- Facteur de forme de la photopile monofaciale en fonction de S_b pour différentes valeurs de H .
 Avec: $D_0 = 26 \text{ Cm}^2 \text{ s}^{-1}$, $\tau = 10^{-5} \text{ s}$, $w = 1.9 \cdot 10^4 \text{ rad. s}^{-1}$, $S_{fmax} = 2.8 \cdot 10^4 \text{ cm. s}^{-1}$, $z=0.01 \text{ Cm}$, $S_{f0} = 10^4 \text{ cm. s}^{-1}$

On observe que pour $S_b < 10^3 \text{ cm. s}^{-1}$ et $S_b > 10^5 \text{ cm. s}^{-1}$, le facteur de forme est quasiment constante. Par contre, pour $10^3 < S_b < 10^5 \text{ cm. s}^{-1}$, le facteur de forme diminue considérablement lorsque la vitesse de recombinaison sur la face arrière augmente.

On note également que le facteur de forme est quasi indépendant de l'épaisseur de la base lorsque la vitesse de recombinaison sur la face arrière est au voisinage 10^3 cm. s^{-1} .

Effet de de la cristallinité du matériau à travers l'effet de (D_0)

La **figure .11** le profil du facteur de forme en fonction de la vitesse de recombinaison sur la face arrière pour différentes valeurs de D_0 .

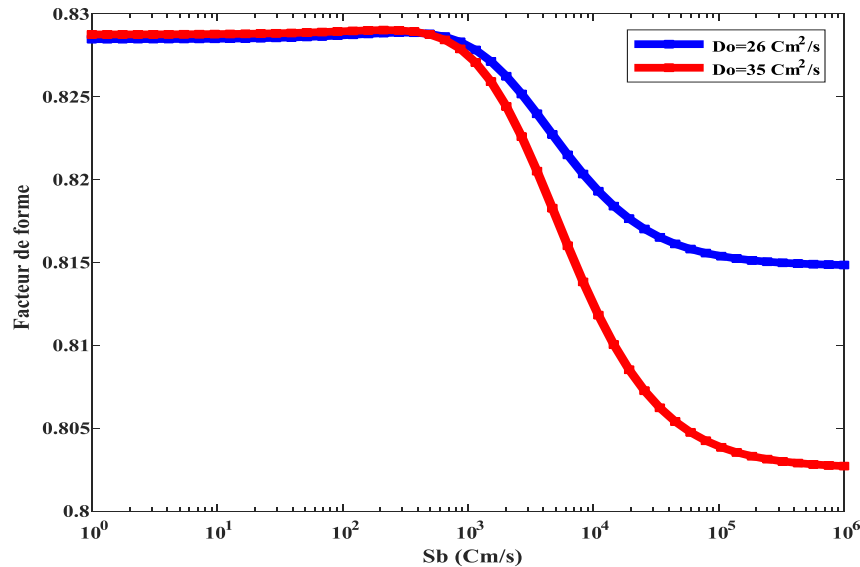


Figure11:- Facteur de forme de la photopile monofaciale en fonction de S_b pour différentes valeurs de D_0 . $w = 1.9 \cdot 10^4 \text{ rad. s}^{-1}$, $\tau = 10^{-5} \text{ s}$, $H = 0.011 \text{ Cm}$, $S_{fmax} = 2.8 \cdot 10^4 \text{ cm. s}^{-1}$, $z=0.01 \text{ Cm}$, $S_{f0} = 10^4 \text{ cm. s}^{-1}$

La **figure. 11** montre qu'au voisinage de $S_b = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ le facteur forme est indépendant de la cristallinité de la photopile. Pour les valeurs de $S_b < 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ la valeur du facteur de forme est quasi constante. Nous observons également que la valeur du facteur de forme de la photopile monofaciale monocristallin est légèrement supérieure à celui de la photopile monofaciale polycristallin. Pour des valeurs de $S_b > 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, le facteur de forme décroît lorsque S_b augmente mais diminue également lorsque D_0 passe de $26 \text{ Cm}^2\text{s}^{-1}$ à $35 \text{ Cm}^2\text{s}^{-1}$.

Conclusion:-

Dans ce travail, nous avons fait une étude sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension de la photopile monofaciale. La caractéristique courant-tension permet de voir les variations de la réponse en courant et en tension de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison sur la face arrière. Elle consiste à tracer le profil de la densité de photocourant ou de la puissance en fonction de la phototension. L'étude de la caractéristique courant-tension nous a permis de mettre en évidence les valeurs des densités de courant de court-circuit et de la phototension de circuit ouvert de la photopile et d'étudier leur évolution en fonction de la vitesse de recombinaison sur la face arrière, de la fréquence de modulation, de l'épaisseur de la base et la cristallinité. L'étude de la caractéristique puissance-tension nous a permis de mettre en évidence les effets de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires en face arrière, de la fréquence de modulation, de l'épaisseur de la base et la cristallinité sur la puissance maximale de la photopile. L'étude du facteur de forme de la photopile, à travers son profil en fonction de la vitesse de recombinaison sur la face arrière ainsi que ses variations avec la fréquence de modulation, l'épaisseur de la base et sa cristallinité, a montré une valeur de (S_b) autour de laquelle elle varie peu, et peut constituer un paramètre de calibration, dans l'optimisation de la photopile.

Références Bibliographiques:-

1. 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.
2. Liou J JWong, W.W. (1992) Comparison and Optimization of the Performance of Si and GaAs Solar Cells. Solar Energy Materials and Solar Cells, 28, 9-28. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(92\)90104-W](https://doi.org/10.1016/0927-0248(92)90104-W)
3. 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>
4. T. Baghdali, A. Zerga et B. Benyoucef, (1999) Optimisation du Rendement de Conversion Photovoltaïque des Cellules Solaires à base de GaAs et de Si, Rev. Energ. Ren. : Valorisation, pp. 27-31.
5. Navruz, T.S. and Saritas, M. (2012) Determination of the Optimum Material Parameters for Intermediate Band Solar Cells Diffusion Model. Progress in Photovoltaics Research and Applications 1672-1676, 22, 593-602. <https://doi.org/10.1002/pip.2283>
6. Lago-Aurrekoetxea, R.M., et al . (2001) Fabrication Process for Thin Silicon Solar Cells. Proceedings 17th European PVSEC, Munich, 22-26, October 2001, 1519-1522.
7. Ohtsuka, H., Sakamoto, M., Tsutsui, K. and Yazawa, Y. (2000) Bifacial Silicon Solar Cells with 21.3% Front Efficiency and 19.8% Rear Efficiency. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 8, 385-390.
8. A. A. Sayem, Y. Arafat and M. M. Rahman, Thickness optimization and composition grading effect in heterojunction CIGS Solar Cell. 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering (20-20 Dec, Dhaka, Bangladesh), 2014, 524-527, doi: 10.1109/ICECE.2014.7026952.
9. M. A. Green, K. Emery, D. L. King, Y. Hishikawa, and W. Warta, (2006). 'Solar Cell Efficiency Tables (version 28)', Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 14; pp. 455-461.
10. F. Caldararu, M. Caldararu, S. Nan, D. Nicolaescu and S. Vasile (1991). Analytical two dimensional model of solar cell current- voltage characteristics. Solid States Electronics. Vol. 34, No. 6, pp. 553-558.
11. Vardayan, R.R., Kerst, U., Wawer, P., Nell, M.N. and Wagemann, H.G (1998). Method of measurement of all recombination parameters in the base region of solar cells. Proceedings of 2nd Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, 6-10 July 1998, 191-193.
12. Chih Hsin Wang and Arnost Neugroschel (1991). Minority-carrier lifetime and surface recombination velocity measurement by frequency-domain photoluminescence. IEEE transactions on electron devices, vol.38, no. 9, pp.2169-2180.
13. S. Gupta, P. Ahmed and S. Garg, (1988). A Method for the Determination of the Material parameters D, L, S and α from Measured Short-Circuit Photocurrent. Solar Cells, 25, 61-72. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(88\)90058-0P](https://doi.org/10.1016/0379-6787(88)90058-0P)

14. N.Honma and C. Munakata (1987). Sample Thickness Dependence of Minority Carrier Lifetimes Measured Using an ac Photovoltaic Method. *Japanese Journal of Applied Physics*, 26, 2033-2036. <https://doi.org/10.1143/JJAP.26.2033>
15. 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>.
16. H.L.Diallo, A. Seidou, Maiga, A.Wereme and G.Sissoko, 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*, 2008, 42, 203-211. <http://dx.doi.org/10.1051/epjap:2008085>
17. Sissoko, G., Nanema, E., Correa, A., Biteye, P.M., Adj, M. and Ndiaye, A. L (1998). Silicon Solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic. *Renewable Energy*, Elsevier Science Ltd, 0960-1481/#. Vol-3, pp.1848–1851.
18. G.Sissoko, C. Museruka, A. Corréa, I. Gaye and A.L.Ndiaye, Light Spectral Effect on Recombination Parameters of Silicon Solar Cell. *World Renewable Energy Congress*, Pergamon, Part III, pp.1487-1490.
19. E.Gaubas and J. Vanhellemont (1996). A simple Technique for the Separation of Bulk and Surface Recombination Parameters in Silicon. *Journal of Applied Physics*, 80, 6293-6297. <https://doi.org/10.1063/1.363705M>
20. O. Diasse, R. S. Sam, H. L. Diallo, M. Ndiaye, N. Thiam, S. Mbodji and G. Sissoko, Solar cell's classification by the determination of the specific values of the back surface recombination velocities in open circuit and short-circuit operating conditions. *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS)*, 2012, 2278/6856:18-23)
21. O.Diasse. A. Diao, I. Ly, M.S. Diouf. I. Diatta. R.Mane. Y. Traore and G.Sissoko, Back Surface Recombination Velocity Modeling in White Biased Silicon Solar Cell under Steady State. *Journal of Modern Physics*, 2018, 9, 189-201.
22. Ly Diallo, H., Wade, M., Ly, I., NDiaye, M., Dieng, B., Lemrabott, O.H., Maïga, A.S. and Sissoko. G. (2012). 1D Modeling of a Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation, Monochromatic Illumination: Determination of the Equivalent Electrical Circuit Related to the Surface Recombination Velocity. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4, 1672-1676.
23. 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>
24. Fall, M. , Gaye, I. , Diarisso, D. , Diop, G. , Loum, K. , Diop, N. , Sy, K. , Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2021). AC Back Surface Recombination Velocity in $n^+ - p - p^+$ Silicon Solar Cell under Monochromatic Light and Temperature. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 13, 67-81. doi: 10.4236/jemaa.2021.135005.
25. Y. Traore, N. Thiam, M. Thiame, M. L. Ba, M. S. Diouf et G. Sissoko, AC Recombination Velocity in the Back Surface of a Lamella Silicon Solar Cell under Temperature. *Journal of Modern Physics*, 2019, 10, 1235-1246. <https://doi.org/10.4236/jmp.2019.1010082>
26. Seydina Diouf , Mor Ndiaye, Ndeye THIAM, Youssou Traore, Mamadou Lamine Ba, Ibrahima Diatta, Marcel Sitor diouf, Oulimata Mballo, Amary Thiam and Grégoire Sissoko (2019). Influence of Temperature and Frequency on Minority Carrier Diffusion Coefficient in a Silicon Solar Cell Under Magnetic Field. *Energy and Power Engineering*, 11, 355-361 <http://www.scirp.org/journal/epe>
27. 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>
28. 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>
29. Sissoko, G., Nanéma, E., Ndiaye, A.L., Bocandé, Y.L.B. and Adj, M. (1996) Minority Carrier Diffusion Length Measurement in Silicon Solar Cell under Constant White Bias Light. *Renewable Energy*, 3, 1594-1597.
30. Demesmaeker, E., Symons, J., Nijs, J. and Mertens, R. (1991) The Influence of Surface Recombination on the Limiting Efficiency and Optimum Thickness of Silicon Solar Cells. 10th European Photovoltaic Solar
31. Ndiaye, 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>
32. Thiam, N., Diao, A., Ndiaye, M., Dieng, A., Thiam, A., Sarr, M., Maiga, A.S. and Sissoko, G. (2012). Electric Equivalent Models of Intrinsic Recombination Velocities of a Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation and Magnetic Field Effect. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4, 4646-4655.
33. I. Ly, M. Ndiaye, M. Wade, N. Thiam, S. Gueye and G. Sissoko, Concept of Recombination Velocity S_{fcc} 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>
34. 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
35. Dione, B., Sow, O., Wade, M., Ibrahima, L.Y., Mbodji, S. and Sissoko, G. (2016) Experimental Processus for Acquisition Automatic Features of I-V Properties and Temperature of the Solar Panel by Changing the Operating Point. *Circuits and Systems*, 7, 3984-4000.
<https://doi.org/10.4236/cs.2016.711330>
36. Wafaa Abd El-Basit, Ashraf Mosleh Abd El-Maksood and Fouad Abd El-Moniem Saad Soliman (2013). Mathematical Model for Photovoltaic Cells. *Leonardo Journal of Sciences*, Issue 23, pp.13-28.
(<http://ljs.academicdirect.org/>)
37. Salinger J., Measurement of Solar Cell Parameters with Dark Forward I-V Characteristics, *Acta Polytechnica, Czech Technical Univ. Publ. House*, 2006, 46(4), p. 25- 27
38. Ayvazian, 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.
39. Meier D. L., Good E. A., Garcia R. A., Bingham B. L., Yamanaka S., Chandrasekaran V., Bucher C., Determining Components of Series Resistance from Measurements on A Finished Cell, *Photovoltaic Energy Conversion, IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2006, 2, p. 1315-1318.
40. 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)
41. K. Bouzidi, M. Chegaar, A. Bouhemadou (2007). Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. Volume 91, Issue 18, 6, Pp. 1647-165.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.05.019>
42. Meyer, E. L., & Ernest van Dyk, E. (n.d.). The effect of reduced shunt resistance and shading on photovoltaic module performance. *Conference Record of the Thirty-First IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2005. doi :10.1109/pvsc.2005.1488387
43. Jen-Cheng W., Jyh-Cherng S., Yu-Li S. Kun-Chang K., Yen-Wei C., Yu-Ting L., Jui-Jen C., Kuo-Chi L., Joe-Air J., A Novel Method for the Determination of Dynamic Resistance for Photovoltaic Modules, *Energy*, 2011, 36, p. 5968-5974.
44. Mora-Sero, I., Garcia-Belmonte, G., Boix, P.P., Vazquez, M.A. and Bisquert, J. (2009) Impedance Spectroscopy Characterization of Highly Efficient Silicon Solar Cells under Different Illumination Intensities. *Light. Energy and Environmental Science*, 2, 678-686.
<https://doi.org/10.1039/b812468j>
45. Bonham, D.B. and Orazem, M.E. (1988) A Mathematical Model for the AC Impedance of Semiconducting Electrodes. *AIChE Journal*, 34, 465-473.
<https://doi.org/10.1002/aic.690340314>
46. Streever, R.L., Breslin, J.T. and Ahlstrom, E.H. (1980) Surface States at the n-GaAs-SiO₂ Interface from Conductance and Capacitance Measurements. *Solid State Electronics*, 23, 863-868.
[https://doi.org/10.1016/0038-1101\(80\)90103-3](https://doi.org/10.1016/0038-1101(80)90103-3)
47. Sahin, G., Dieng, M., Moujtaba, M., Ngom, M., Thiam, A. and Sissoko, G. (2015) Capacitance of Vertical Parallel Junction Silicon Solar Cell under Monochromatic Modulated Illumination. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 3, 1536-1543. <https://doi.org/10.4236/jamp.2015.311178>
48. Scofield, J.H. (1995) Effects of Series and Inductance on Solar Cell Admittance Measurements. *Solar Energy and Solar Cells*, 37, 217-233.
[https://doi.org/10.1016/0927-0248\(95\)00016-X](https://doi.org/10.1016/0927-0248(95)00016-X)

49. Jen-Cheng W., Jyh-Cherng S., Yu-Li S. Kun-Chang K., Yen-Wei C., Yu-Ting L., Jui-Jen C., Kuo-Chi L., Joe-Air J., A Novel Method for the Determination of Dynamic Resistance for Photovoltaic Modules, *Energy*, 2011, 36, p. 5968-5974
50. Surya K. J., Sai B. Ch., Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell using Matlab-Simulink Environment, *Intr. Jour. of Electrical and Computer Eng. (IJECE)*, 2012, 2(1), p. 26-34.
51. Nema R. K., Savita N., Gayatri A., Computer Simulation Based Study of Photovoltaic Cells/Modules and their Experimental Verification, *International Journal of Recent Trends in Engineering (IJRTE)*, Academy Publisher, 2009, 1(3), p. 151-156
52. Ramos-Hernanz J. A., Campayo J. J., Zulueta E., Barambones O., Eguía P., Zamora I., Obtaining the Characteristics Curves of a Photocell by Different Methods, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13)*, Bilbao (Spain), 11, 2013, p. 20-26.
53. Ward, M.A.A. and Lee, K.T. (1989) Combined AC Photocurrent and Photothermal Reflectance Response Theory of Semiconducting p-n Junctions. *Journal of Applied Physics*, 66, 5572-5583. <https://doi.org/10.1063/1.343662>
54. Mandelis, A.A. Ward and K.T. Lee.(1989). Combined AC photocurrent and photothermal reflectance response theory of semiconducting p-n junctions. *J. Appl. Phys. Vol.66. No.11. pp 5572 – 5583.* <http://dx.doi.org/10.1063/1.343662>
55. Luc, B., Shahriar, M., Dean, H., Marco, S., Manuela, A. and Claudio, N. (1994). Investigation of Carrier Transport through Silicon Wafers by Photocurrent Measurement. *Journal of Applied Physics*, 75, 4000-4008. <https://doi.org/10.1063/1.356022>
56. M. A. Green and M. Keevers, Optical Properties of Intrinsic Silicon at 300K. *Progress in Photovoltaics*, 1995, 3, 189-192. <http://dx.doi.org/10.1002/ppip.4670030303>
57. Furlan, J. and Amon, S. (1985). Approximation of the Carrier Generation Rate in Illuminated Silicon. *Solid-State Electronics*, 28, 1241-1243. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(85\)90048-6](https://doi.org/10.1016/0038-1101(85)90048-6) .
58. J. G. Fossum and D. S. Lee (1952). A physical model for the dependence of carrier life time on doping density in non-degenerate silicon solid-state electronics,15, pp.741-747. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(52\)90048-6](https://doi.org/10.1016/0038-1101(52)90048-6)
59. Sylla, B. , Ly, I. , Sow, O. , Dione, B. , Traore, Y. and Sissoko, G. (2018) Junction Surface Recombination Concept as Applied to Silicon Solar Cell Maximum Power Point Determination Using Matlab/Simulink: Effect of Temperature. *Journal of Modern Physics*, 9, 172-188. doi: 10.4236/jmp.2018.92011
60. Ba, M.L., Diallo, H.L., Ba, H.Y., Traore, Y., Diatta, I., Diouf, M.S., Wade, M. and Sissoko, G. (2018). Irradiation Energy Effect on a Silicon Solar Cell: Maximum Power Point Determination. *Journal of Modern Physics*, 9, 2141-2155. <https://doi.org/10.4236/jmp.2018.912135>
61. Abdul J., Nazar. A, Omega A. R, Simulation on Maximum Power Point Tracking of the Photovoltaic Module Using LabVIEW, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* , 2012, 1(3), p. 190-199
62. 14. Skoplaki E., Palyvos J. A., On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A review of efficiency/power correlations, *Science-Direct, Elsevier, Solar Energy*, 2009, 83(83), p. 614–624.