



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

## INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI: 10.21474/IJAR01/17141

DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/17141>



### RESEARCH ARTICLE

#### ETUDE D'UNE PHOTOPILE BIFACIALE AU SILICIUM EN REGIME STATIQUE SOUMISE A UN CHAMP MAGNETIQUE SOUS ECLAIREMENT MONOCHROMATIQUE PAR LA FACE ARRIERE: DETERMINATION DE L'ÉPAISSEUR OPTIMUM DE LA BASE

Moustapha Thiame<sup>1,2</sup>, Moussa Camara<sup>1,2</sup>, Mohamed Lemine Cheikh<sup>1</sup>, Sega Gueye<sup>1</sup>, Ousmane Sow<sup>1,3</sup>, Mamadou Wade<sup>1,4</sup> and Gregoire Sissoko<sup>1</sup>

1. Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.
2. Université Assane SECK, Ziguinchor, Senegal.
3. Institut Universitaire de Technologie. Université Iba Der THIAM de Thiès-Senegal.
4. Ecole Polytechnique de Thiès, BP A10, Thiès, Senegal.

#### Manuscript Info

##### Manuscript History

Received: 25 April 2023

Final Accepted: 28 May 2023

Published: June 2023

##### Key words:-

Photopile Bifaciale Au Silicium, Champ Magnétique, Coefficient D'absorption, Vitesse De Recombinaison, Epaisseur Optimum

#### Abstract

La photopile bifaciale au silicium, est éclairée par la face arrière par une lumière monochromatique. Elle est placée dans un champ magnétique induisant un coefficient de diffusion  $D_n(B)$  des porteurs minoritaires. L'équation de magnéto-transport relative à la densité des porteurs minoritaires dans la base de la photopile est résolue. Les conditions aux limites associées sont données à l'aide des vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires ( $S_f$  et  $S_b$ ), respectivement à la jonction (n+/p) et à la surface arrière (p/p+). Du profil de densité de courant en fonction de la vitesse de recombinaison ( $S_f$ ) à la jonction, les expressions de la vitesse de recombinaison ( $S_b$ ) des porteurs minoritaires sont déduites, en fonction du coefficient d'absorption ( $\alpha(\lambda)$ ), du coefficient de diffusion et de l'épaisseur (H). Dans ce travail, nous avons proposé une étude graphique pour déterminer l'épaisseur optimum de la base de la photopile bifaciale au silicium par le concept de vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la surface arrière. L'épaisseur optimalum de la base est obtenue et modélisée en fonction du champ magnétique, pour les petites et grandes gammes de longueurs d'onde de la lumière incidente.

Copy Right, IJAR, 2023.. All rights reserved.

#### Introduction:-

Le contrôle de qualité de la photopile est produit par les techniques de caractérisation [1-4], sur le matériau massif ou sur la photopile déjà élaborée. Ces techniques visent la détermination des paramètres phénoménologiques [5-8] et électriques [9-16], en maintenant la photopile sous différents régimes [17-23], statique, dynamique fréquentiel et transitoire, et opèrent alors sous obscurité ou sous éclairage à l'aide de lumière, monochromatique ou polychromatique.

- a) Les paramètres phénoménologiques [5-8, 24-30] désignent les paramètres qui décrivent les mécanismes physiques du comportement des porteurs minoritaires de charge qui interviennent dans le fonctionnement de la photopile. Il s'agit de :

**Corresponding Author:- Gregoire Sissoko**

Address:- International Group of Research in Renewable Energy, Bp. 15003 Dakar Fann Senegal.

La durée de vie, du coefficient et de la longueur de diffusion, de la mobilité, des vitesses de recombinaison aux interfaces, des différentes régions qui constituent la photopile.

Les paramètres électriques [9-16], sont obtenus de la mesure du photocourant et de la phototension de la photopile, selon son régime de fonctionnement. Ils sont représentés par les résistances série et shunt, et de la capacité de la zone de charge d'espace.

Ces quantités physiques sont lourdement affectées par l'architecture des photopiles [31-47], qui sont élaborées :

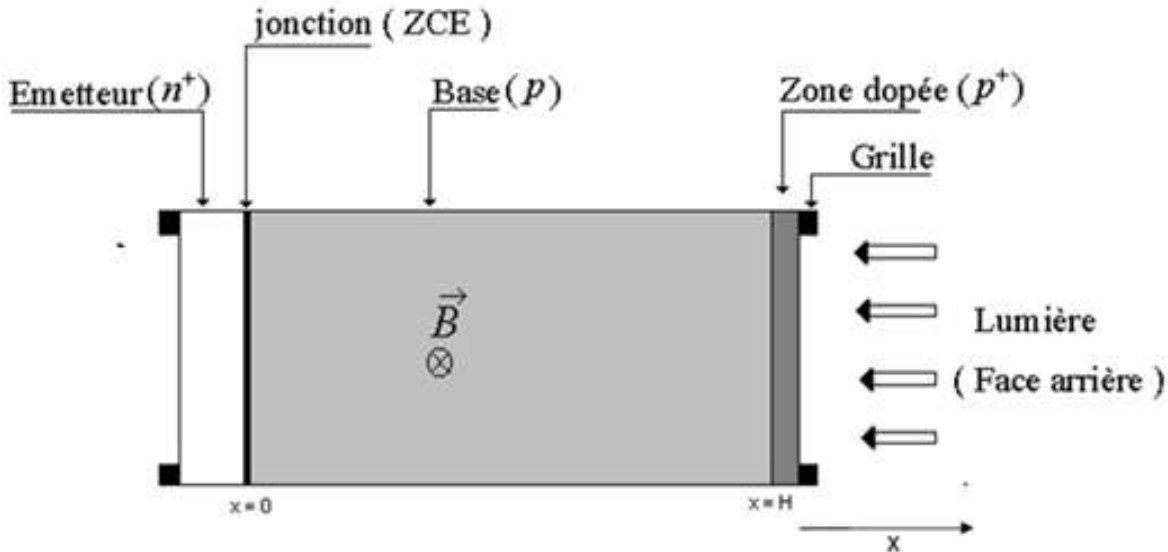
- b) Selon le mode d'éclairage notamment, monofaciale, bifaciale, à jonctions verticales parallèles ou connectées en série.
- c) Selon l'épaisseur, en couches minces ou épaisse, suivant les propriétés optoélectroniques du matériau (Si)

L'épaisseur est un paramètre très important pour l'optimisation de ces structures [48-55]. Elle intervient malheureusement après élaboration de plaquettes prédécoupées, pour la réalisation de photopiles et suivi de caractérisation [56, 57].

Alors notre travail propose une étude en modélisation de l'épaisseur de la base de la photopile bifaciale au silicium, sous application de champ magnétique (B) [58-60], et éclairée par une lumière monochromatique ( $\alpha(\lambda)$ ) [61, 62] par la face arrière, en prenant en compte les mécanismes physiques [1, 4], d'absorption- génération, diffusion et recombinaison. Les résultats obtenus montrent un gain en matériau, permettant de réduire les coûts de réalisation industrielle.

**2. Etude théorique**

A la figure 1 nous représentons la structure d'une photopile ( $n^+ - p - p^+$ ) bifaciale au silicium [24, 33-36, 34, 55, 60], sous éclairage monochromatique [16, 51-54] à flux constant par la face arrière et soumise à un champ magnétique parallèle à la surface de la zone de charge d'espace.



**Figure 1:-** Schéma d'une photopile bifaciale sous champ magnétique appliqué.

En régime statique, la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base obéit à l'équation de magnéto-transport, résumant les processus de génération, de diffusion et de recombinaison des porteurs de charge minoritaires dans la base [8, 37, 48-50, 58-60] :

$$\frac{\partial^2 \delta n(x, B, \lambda)}{\partial x^2} - \frac{\delta n(x, B, \lambda)}{L_n(B)^2} = - \frac{G(x, \lambda)}{D_n(B)} \tag{1}$$

$\delta n(x, B, \lambda)$  est la densité des porteurs minoritaires en excès.

$G(x, \lambda)$  est le taux de génération lorsque la photopile est éclairée par sa face arrière [34-36], qui est donné par :

$$g(x) = \alpha(\lambda) \cdot I_0(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot e^{-\alpha(\lambda)(H-x)} \quad (2)$$

Avec : x est la profondeur dans la base. Les paramètres optiques [61, 62] sont donnés par :

$\alpha(\lambda)$  le coefficient d'absorption du matériau,  $I_0(\lambda)$  l'intensité du flux lumineux incident et  $R(\lambda)$  le coefficient de réflexion du matériau.

$Ln(B)$  est la longueur de diffusion des électrons dans la base, elle dépend du champ magnétique B auquel la base est soumise. Elle est donnée par la relation d'Einstein:

$$Ln(B) = \sqrt{Dn(B) \cdot \tau} \quad (3)$$

$Dn(B)$  est le coefficient de diffusion des électrons dans la base en fonction du champ magnétique. Son expression est donnée par [58] :

$$Dn(B) = \frac{D0}{1 + (\mu \cdot B)^2} \quad (4)$$

La mobilité des porteurs minoritaires est ( $\mu$ ) [63, 64], et  $D0$  est le coefficient de diffusion en l'absence du champ magnétique.

La solution de l'équation de continuité est donnée sous la forme:

$$\delta n(x, B, \alpha(\lambda)) = N \cdot \cosh\left(\frac{x}{Ln(B)}\right) + M \cdot \sinh\left(\frac{x}{Ln(B)}\right) - K(B, \lambda) \exp(-\alpha(\lambda) \cdot (H - x)) \quad (5)$$

Avec :

$$K(B, \alpha(\lambda)) = \frac{\alpha(\lambda) I_0(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot Ln(B)^2}{Dn(B) [\alpha(\lambda)^2 \cdot Ln(B)^2 - 1]} \quad (6)$$

Les coefficients N et M sont déterminés par les conditions aux limites :

- A la jonction base-émetteur ( $x=0$ ).

$$Dn(B) \cdot \left( \frac{\partial \delta n(x, B, \alpha(\lambda))}{\partial x} \right)_{x=0} = Sf \cdot \delta n(0, B, \alpha(\lambda)) \quad (7)$$

- A la face arrière ( $x=H$ ).

$$- Dn(B) \cdot \left( \frac{\partial \delta n(x, B, \alpha(\lambda))}{\partial x} \right)_{x=H} = -Sb \cdot \delta n(x=H, B, \alpha(\lambda)) \quad (8)$$

H est l'épaisseur de la base. Les vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires [4, 18, 20, 22-30] sont respectivement, (Sf) à la jonction émetteur-base et (Sb) à la face arrière (p/p+).

## Résultats et Discussions:-

### Densité de photocourant

La lumière absorbée par la photopile provoque la création de paires électron-trou dans les différentes régions dont la base, qui produit le maximum de photocourant, à cause de l'importance son épaisseur.

Les porteurs de charge photogénérés dans la base, ayant échappé aux processus de recombinaison sont collectés par les grilles pour participer à la production du courant à travers le circuit extérieur

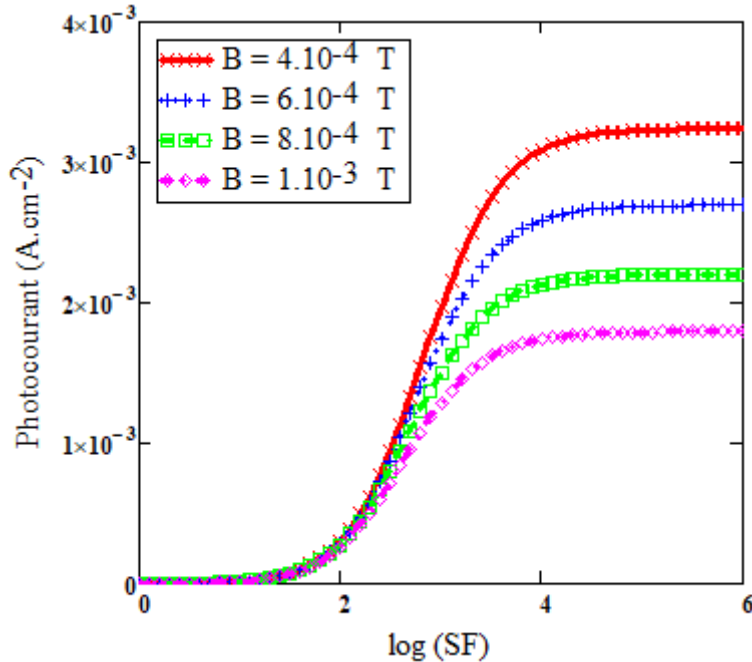
L'expression générale de la densité de photocourant est définie par la relation suivante:

$$Jph(B, \alpha(\lambda), H, Sf, Sb) = q \cdot Dn(B) \cdot \left[ \frac{\partial \delta n(B, \alpha(\lambda), x, H, Sf, Sb)}{\partial x} \right]_{x=0} \quad (9)$$

Ce qui donne :

$$Jph(B, \alpha(\lambda), H, Sf, Sb) = q \cdot Dn(B) \left[ \frac{M}{Ln(B)} + K(B, \lambda) \cdot \alpha(\lambda) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot H) \right] \quad (10)$$

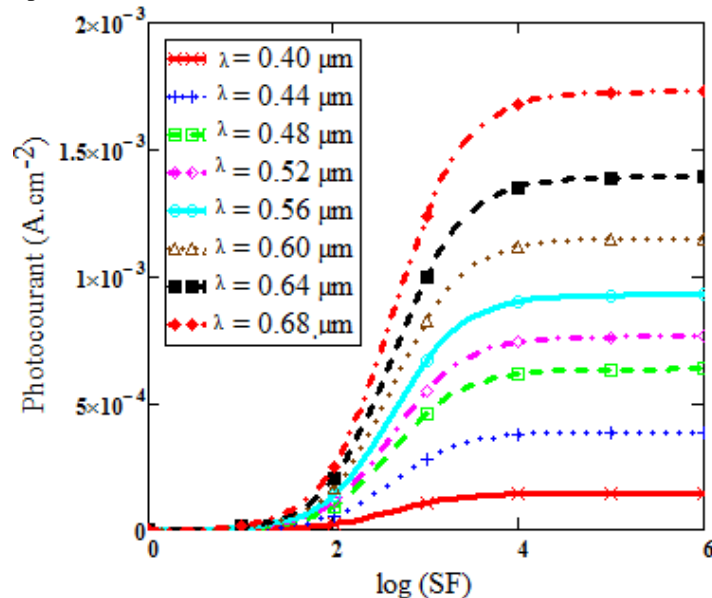
L'équation (10), nous permet de représenter les profils de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction respectivement, pour différentes valeurs du champ magnétique (Fig. 2), de la longueur d'onde (Fig. 3 et 4), et de l'épaisseur (Fig. 5), de la base.



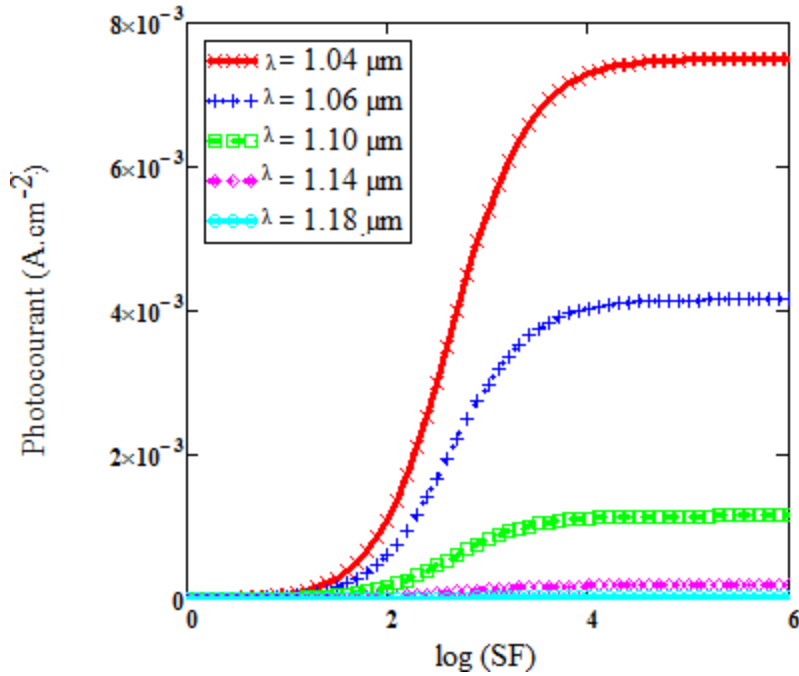
**Figure 2:-** Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique. (Sb, λ = 0.72 μm, μ = 1448 cm<sup>2</sup>.V<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>, Dn = 26 cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>, H = 0.02 cm).

La densité de photocourant croît avec la vitesse de recombinaison à la jonction (SF) et présente deux paliers : l'un aux faibles valeurs de (Sf) et l'autre aux grandes valeurs de (Sf). Le premier palier traduit une situation de circuit-ouvert tandis que le second correspond au fonctionnement en court-circuit de la photopile [25].

Nous observons que la densité de photocourant diminue avec le champ magnétique. La déflexion des porteurs minoritaires de charge de leur trajectoire selon la loi de Lorentz, entraîne la diminution du coefficient de diffusion [8, 58], par conséquent du photocourant.

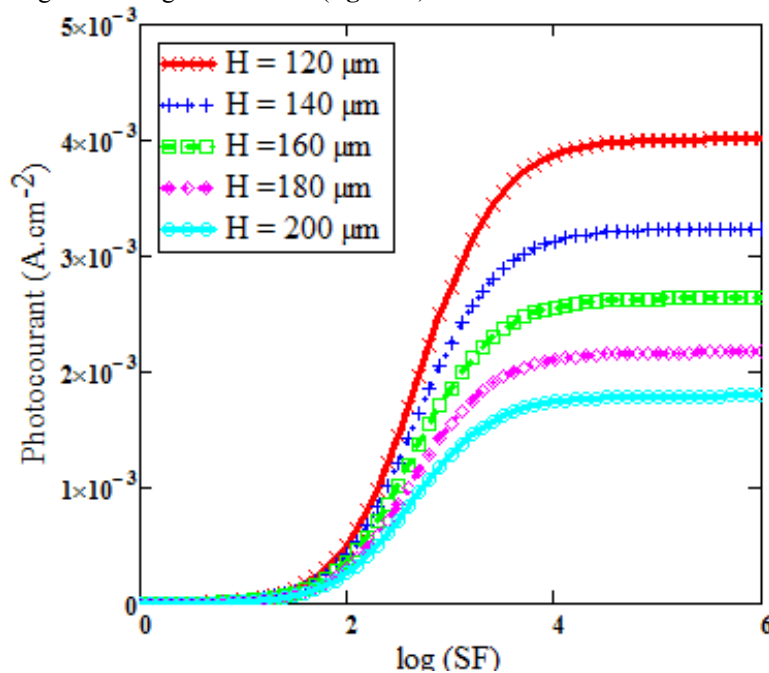


**Figure 3:-** Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde (μ = 1448 cm<sup>2</sup>.V<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>, Dn = 26 cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>, H = 0.02 cm, B = 10<sup>-3</sup>T).



**Figure 4:-** Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de grandes longueurs d’onde. ( $\mu = 1448 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $D_n = 26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $H = 0.02 \text{ cm}$ ,  $B = 10^{-3} \text{ T}$ )

Nous notons que la densité de photocourant croît avec les faibles longueurs d’onde (**figure 3**) et on retrouve une situation inverse pour les grandes longueurs d’onde (**figure 4**).



**Figure 5:-** Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l’épaisseur de la base ( $S_b, \lambda = 0.72 \text{ μm}$ ,  $\mu = 1448 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $D_n = 26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

A la **figure 5**, nous constatons que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$  ( $S_f \square 2.10^2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ), c’est-à-dire lorsque la photopile est en circuit-ouvert, l’épaisseur de la base n’a presque pas d’effet sur la faible densité de photocourant.

En revanche, pour les grandes vitesses de recombinaison à la jonction, c'est-à-dire lorsque la photopile est en court-circuit, la densité de photocourant diminue quand l'épaisseur de la base augmente [44-47, 51-54].

**Optimisation de l'épaisseur de la base par la méthode des vitesses de recombinaison à la face arrière**

Pour obtenir l'expression de la vitesse de recombinaison  $S_b$ , l'expression de la densité de photocourant (figures. 4 et 5) est dérivée par rapport à (Sf), avec (Sf) tendant vers ses grandes valeurs [18, 24-30]. En effet pour les grandes valeurs de Sf, la densité de photocourant présente un gradient nul; cela nous permet d'écrire:

$$\left[ \frac{\partial J_{ph}}{\partial SF} \right] = 0 \tag{11}$$

L'équation 11 donne deux solutions de la vitesse de recombinaison en face arrière  $S_b$  des porteurs minoritaires dans la base dont l'une ( $S_{b1}$ ) dépendant de l'épaisseur de la base et du champ magnétique, et l'autre ( $S_{b2}$ ) dépendant en plus de l'épaisseur de la base et du champ magnétique, de la longueur d'onde.

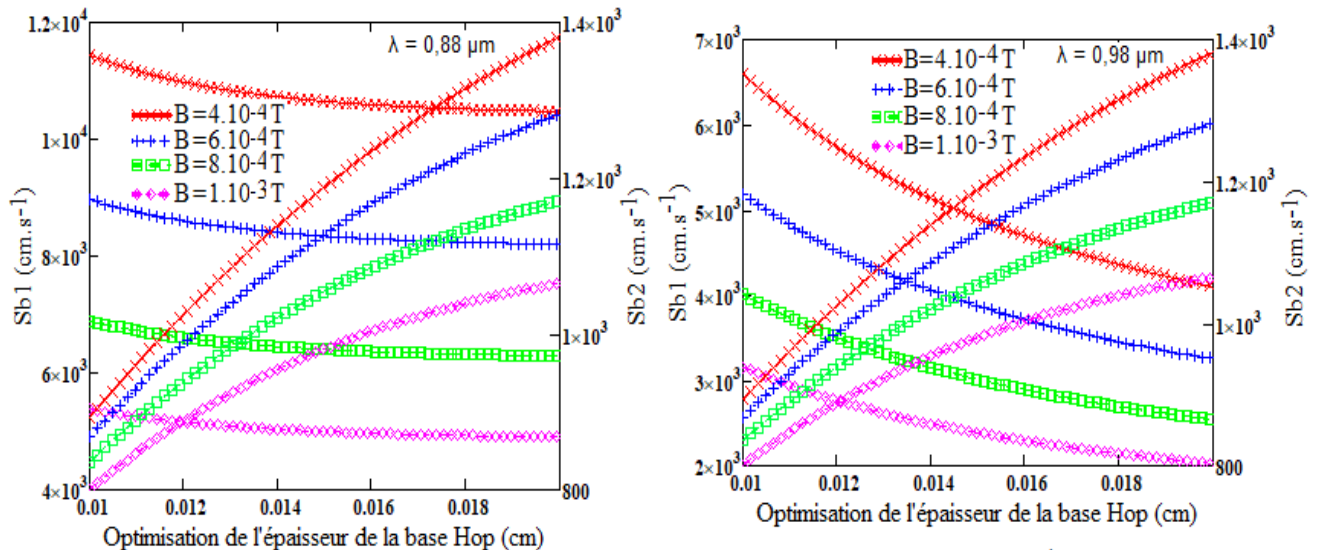
Les solutions sont les suivantes:

$$S_{b1}(D_n(B), H) = -\frac{D_n(B)}{L_n(B)} \cdot th\left(\frac{H}{L_n(B)}\right) \tag{12}$$

La solution ( $S_{b1}$ ) est indépendante de la longueur d'onde  $\lambda$  et la seconde solution dépend du coefficient d'absorption  $\alpha(\lambda)$  et du coefficient de diffusion et est donnée par la relation suivante :

$$S_{b2}(B, H, \lambda) = D_n(B) \cdot \frac{\alpha(\lambda) \cdot \left( \cosh\left(\frac{H}{L_n(B)}\right) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot H) - 1 \right) + \frac{1}{L_n(B)} \cdot \sinh\left(\frac{H}{L_n(B)}\right) \exp(-\alpha(\lambda) \cdot H)}{1 - \left( \cosh\left(\frac{H}{L_n(B)}\right) + \alpha(\lambda) \cdot L_n(B) \cdot \sinh\left(\frac{H}{L_n(B)}\right) \right) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot H)} \tag{13}$$

Sur la figure. 6, nous avons présenté les profils des deux expressions de la vitesse de recombinaison en face arrière  $S_{b1}$  et  $S_{b2}$  en fonction de l'épaisseur de la base de la photopile [48-55], pour différentes valeurs du champ magnétique et pour différentes valeurs de longueurs d'onde.



**Figure 6:-** Vitesse de recombinaison en face arrière  $S_{b1}$  et  $S_{b2}$  en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du champ magnétique, avec  $\lambda = 0.88 \mu\text{m}$  et  $\lambda = 0.98 \mu\text{m}$ .

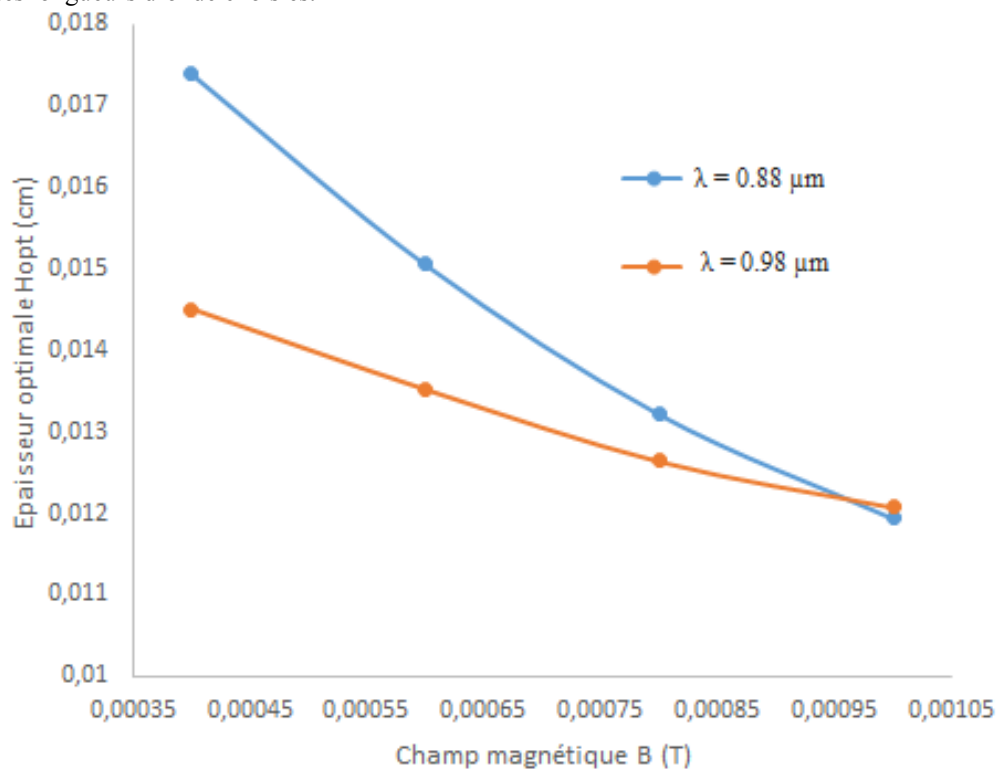
Les points d'intersection des courbes des expressions de  $S_{b1}$  et  $S_{b2}$  permettent d'obtenir l'épaisseur optimum [48-55] de la base d'une photopile éclairée par la face arrière avec une lumière monochromatique, pour différentes valeurs du champ magnétique. Pour chaque point d'intersection des courbes des deux vitesses de recombinaison à la surface arrière de la photopile l'abscisse représente l'épaisseur optimum de la base de la photopile.

Les résultats obtenus des valeurs de l'épaisseur optimum de la base, pour différentes valeurs du champ magnétique et selon une valeur de longueur d'onde, sont présentées dans le **tableau 1**.

**Tableau 1:-** Epaisseur optimum de la base pour des longueurs d'onde:  $\lambda = 0.88 \mu\text{m}$  et  $\lambda = 0.98 \mu\text{m}$ .

Longueur d'onde	B (T)	Hopt (cm)	Sb1(cm.s <sup>-1</sup> )	Sb2 (cm.s <sup>-1</sup> )
$\lambda = 0.88 \mu\text{m}$	0.0004	0.01740	10573	1293
	0.0006	0.01506	8338.6	1125.5
	0.0008	0.01322	6502	987.65
	0.0010	0.01194	5162.1	887.16
$\lambda = 0.98 \mu\text{m}$	0.0004	0.0145	5015.4	1161.8
	0.0006	0.01352	4157.3	1058.9
	0.0008	0.01264	3379.2	965.51
	0.0010	0.01208	2760.2	891.22

A la **figure. 7**, nous représentons le profil de l'épaisseur optimum de la base en fonction du champ magnétique pour les différentes longueurs d'onde choisies.



**Figure 7:-** Epaisseur optimum de la base en fonction du champ magnétique.

Les courbes de la **figure.7** sont modélisées en fonction du champ magnétique par les équations suivantes :

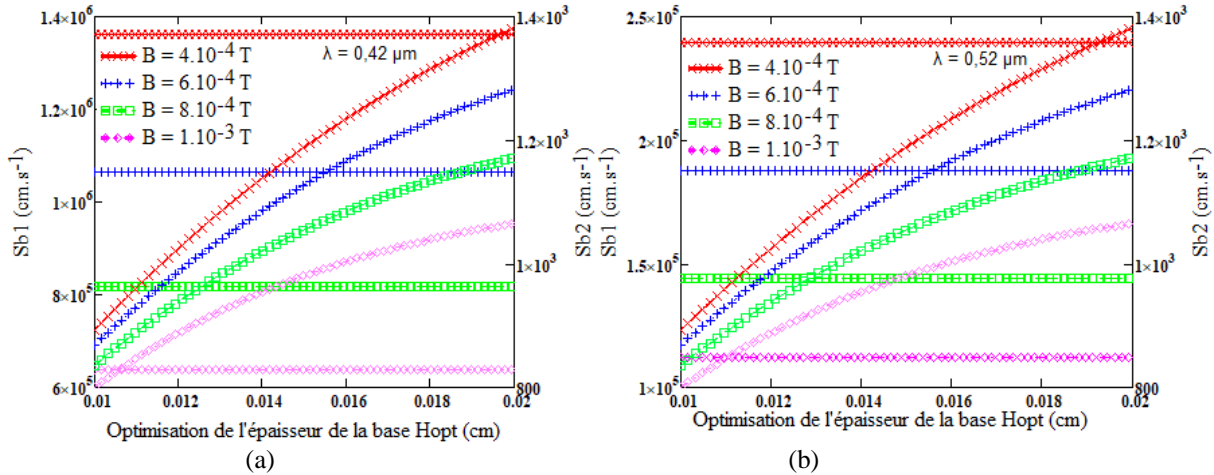
Pour  $\lambda = 0.88\mu\text{m}$

$$Hopt(B) = 6625 \cdot B^2 - 18.385 \cdot B + 0.0237 \quad (14)$$

Pour  $\lambda = 0.98\mu\text{m}$

$$Hopt(B) = 2625 \cdot B^2 - 7.745 \cdot B + 0.0172 \quad (15)$$

L'optimisation de l'épaisseur de la base est aussi effectuée pour les faibles longueurs d'onde. Pour cela, nous avons présenté à la **figure. 8**, les profils des deux vitesses de recombinaison en face arrière Sb1 et Sb2 en fonction de l'épaisseur de la base de la photopile, pour différentes valeurs du champ magnétique et pour des longueurs d'onde respectivement égale à :  $\lambda = 0.42 \mu\text{m}$  et  $\lambda = 0.52 \mu\text{m}$  et déduit les valeurs optimales de l'épaisseur de la base.



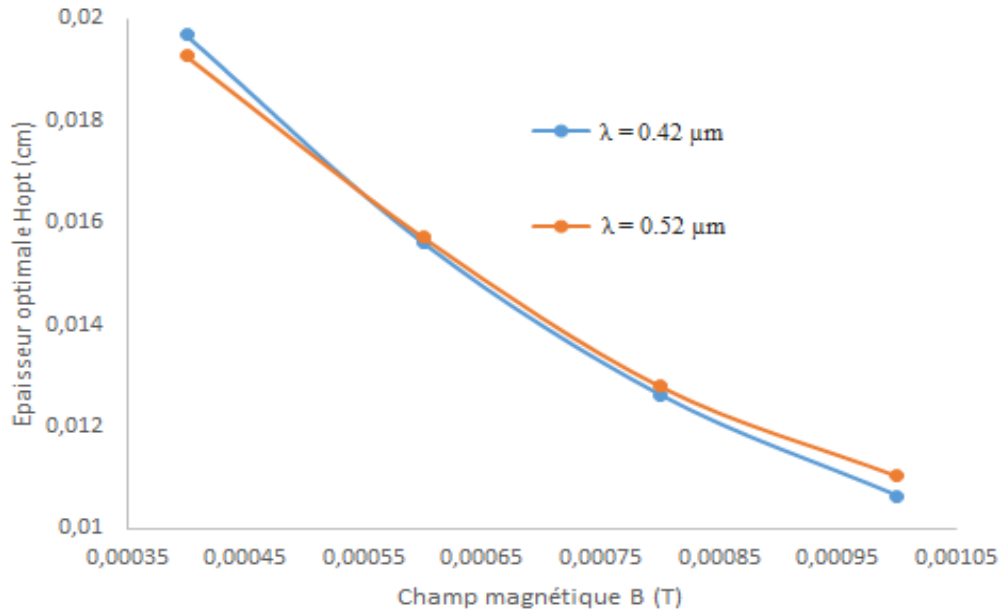
**Figure 8:-** Vitesse de recombinaison en face arrière Sb1 et Sb2 en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du champ magnétique: (a)  $\lambda = 0.42 \mu\text{m}$  et (b)  $\lambda = 0.52 \mu\text{m}$ .

Les résultats sont présentés dans le **tableau.2** suivant.

**Tableau 2:-** Valeurs optimales de l'épaisseur de la base pour de faibles longueurs d'onde :  $\lambda = 0.42 \mu\text{m}$  et  $\lambda = 0.52 \mu\text{m}$

Longueur d'onde	B (T)	Hopt (cm)	Sb1 (cm.s <sup>-1</sup> )	Sb2 (cm.s <sup>-1</sup> )
$\lambda = 0.42 \mu\text{m}$	0.0004	0.01968	$1.3617 \cdot 10^6$	1371.3
	0.0006	0.0156	$1.0660 \cdot 10^6$	1149.5
	0.0008	0.01262	$8.1752 \cdot 10^5$	963.4
	0.0010	0.01064	$6.4169 \cdot 10^5$	831.27
$\lambda = 0.52 \mu\text{m}$	0.0004	0.01928	$2.3966 \cdot 10^5$	1358.6
	0.0006	0.01572	$1.8762 \cdot 10^5$	1150.5
	0.0008	0.01280	$1.4388 \cdot 10^5$	970.39
	0.0010	0.01104	$1.1213 \cdot 10^5$	848.53

A la **figure 9**, nous présentons les profils de l'épaisseur optimum de la base en fonction du champ magnétique pour l'éclairage effectué par de faibles longueurs d'onde.



**Figure 9:-** Epaisseur optimale de H (Hopt) en fonction du champ magnétique.



Les courbes de la figure 9 sont modélisées en fonction du champ magnétique par les équations suivantes :

Pour  $\lambda = 0.42\mu\text{m}$

$$H_{opt}(B) = 13125 \cdot B^2 - 33.425 \cdot B + 0.0309 \quad (16)$$

Pour  $\lambda = 0.52\mu\text{m}$

$$H_{opt}(B) = 11250 \cdot B^2 - 29.57 \cdot B + 0.0293 \quad (17)$$

Nous notons que, quelle que soit la longueur d'onde choisie, l'épaisseur optimale de la base de la photopile décroît avec le champ magnétique [48, 49, 50, 52].

### Conclusion:-

Dans ce travail, nous avons proposé une étude pour déterminer l'épaisseur optimum de la base d'une photopile au silicium cristallin soumise à un champ magnétique et éclairée par la face arrière par une lumière monochromatique, en utilisant la technique du concept des vitesses de recombinaison à la face arrière.

La résolution de l'équation de magnéto-transport des porteurs minoritaires de charge, nous a permis de déterminer l'expression de la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base. A partir de cette expression, la densité de photocourant est déduite en fonction, de la vitesse de recombinaison à la jonction et à la face arrière, du coefficient de diffusion, de l'épaisseur de la base, et du champ magnétique. Pour les grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la densité de photocourant présente un gradient nul, cela nous a permis de déduire deux expressions de la vitesse de recombinaison à la face arrière.

En traçant le profil des deux expressions des vitesses de recombinaison en face arrière en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs de champ magnétique, et de longueurs d'onde, nous avons pu déterminer l'épaisseur optimum de la base de la photopile pour différentes valeurs de champ magnétique appliqué et lorsqu'elle est éclairée par la face arrière, par une lumière monochromatique de différentes longueurs d'onde.

Nous notons que, quelle que soit la longueur d'onde, l'épaisseur optimale de la base diminue lorsque le champ magnétique augmente. Cette diminution est plus remarquable lorsque la photopile est éclairée par une lumière de grandes longueurs d'onde.

Enfin, une corrélation entre cette épaisseur optimum de la base et le champ magnétique pour différentes longueurs d'onde est établie. Ces modèles établis permettent de réduire l'épaisseur optimum de la base de la photopile, lors de son élaboration industrielle pour des usages spécifiques.

### References:-

- [1] 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, 22, 593-602. <https://doi.org/10.1002/pip.2283>
- [2] 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>
- [3] Liou, J.J. and Wong, 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)
- [4] E.Gaubas and J. Vanhellefont (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>
- [5] K. Taretto, U. Rau, Thomas A. Wagner, Jens Werner (2003). A Simple Method to Extract the Diffusion Length from the Output Parameters of Solar Cells - Application to Polycrystalline Silicon. Solid State Phenomena Vol. 93, Pp 399-404 <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.93.399>
- [6] Dhariwal, S.R. and Vasu, N.K. (1981). A Generalized Approach to Lifetime Measurement in pn Junction Solar Cells. Solid-State Electronics, 24, 915-927. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(81\)90112-X](https://doi.org/10.1016/0038-1101(81)90112-X)

- [7] Gupta, S., Ahmed, F. and Garg, S. (1988). A Method for the Determination of the Material Parameters,  $D$ ,  $L_0$ ,  $S$  and  $\alpha$  from Measured A.C. Short-Circuit Photocurrent. *Solar Cells*, 25, 61-72. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(88\)90058-0](https://doi.org/10.1016/0379-6787(88)90058-0)
- [8] Vardanyan, R.R., Kerst, U., Wawer, P., Nell, M.E. and Wagemann, H.G. (1998). Method for Measurement of All Recombination Parameters in the Base Region of Solar Cells. 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, 6-10 July 1998, 191-193.
- [9] 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>.
- [10] Omar Dia, Mamadou Lamine Ba, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Mor Sarr, Mamadou Wade And Gregoire Sissoko (2021). Effet de l'énergie d'irradiation sur la résistance série dans une photopile ( $n^+/p/p^+$ ) au silicium à jonctions verticales séries. *International Journal of Advanced Research*, 8(07), 100-109. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/13832>
- [11] 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.
- [12] Garland, J.E., Crain, D.J., Zheng, J.P., Sulyma, C.M. and Roy, D. (2011) Electro-Analytical Characterization of Photovoltaic Cells by Combining Voltammetry and Impedance Spectroscopy: Voltage Dependent Parameters of a Silicon Solar Cell under Controlled Illumination and Temperature. *Energy & Environmental Science*, 4, 485-498. <https://doi.org/10.1039/C0EE00307G>
- [13] 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>
- [14] 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.
- [15] Suresh, M.S. (1996) Measurement of Solar Cell Parameters Using Impedance Spectroscopy. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 43, 21-28. [http://dx.doi.org/10.1016/0927-0248\(95\)00153-0](http://dx.doi.org/10.1016/0927-0248(95)00153-0)
- [16] 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>
- [17] 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://ljsacademicdirect.org/>).
- [18] Sissoko, G., Nanéma, E., Corrúa, 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.
- [19] S. Kumar, P. K. Singh, and G. S. Chilana, (2009) Study of Silicon Solar Cell at Different Intensities of Illumination and Wavelengths Using Impedance Spectroscopy. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93, pp1881-1884. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.07.002>
- [20] Wang, C.H. and Neugroschel, A. (1991) Minority-Carrier Lifetime and Surface Recombination Velocity Measurement by Frequency-Domain Photoluminescence. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 38, 2169-2180. <https://doi.org/10.1109/16.83745>
- [21] Kunst, M., Muller, G., Schmidt, R. and Wetzel, H. (1988) Surface and Volume Decay Processes in Semiconductors Studied by Contactless Transient Photoconductivity Measurements. *Applied Physics A*, 46, 77-85. <https://doi.org/10.1007/BF00615912>
- [22] Fredrik A. Lindholm, Juin J. Liou, Arnost Neugroschel, And Taewon W. Jung, (1987) Determination of Lifetime and Surface Recombination Velocity of p-n Junction Solar Cells and Diodes by Observing Transients. *IEEE Transactions On Electron Devices*, Vol.34, N°2, pp277-283
- [23] G.Sissoko, S. Sivoththanam, M. Rodot and P. Mialhe, Constant Illumination-Induced Open Circuit Voltage Decay (CIOCVD) Method, as Applied to High Efficiency Si Solar Cells for Bulk and Back Surface Characterization. 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Montreux, 12-16 October 1992, 352-354.
- [24] F.I.Barro, A.Seidou Maiga, A.Wereme, G.Sissoko (2010). Determination of recombination parameters in the base of a bifacial silicon solar cell under constant multispectral light. *Phys.Chem.News* 56 (2010) 76-84.

- [25] 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.
- [26] Traore, Y. , Thiam, N. , Thiame, M. , Thiam, A. , Ba, M. , Diouf, M. , Diatta, I. , Mballo, O. , Sow, E. , Wade, M. and Sissoko, G. (2019). AC Recombination Velocity in the Back Surface of a Lamella Silicon Solar Cell under Temperature. Journal of Modern Physics, **10**, 1235-1246. doi: 10.4236/jmp.2019.1010082
- [27] Gueye, M. , Diallo, H. , Moustapha, A. , Traore, Y. , Diatta, I. and Sissoko, G. (2018) Ac Recombination Velocity in a Lamella Silicon Solar Cell. World Journal of Condensed Matter Physics, **8**, 185-196. doi: 10.4236/wjcmp.2018.84013.
- [28] 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>
- [29] 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>
- [30] H.L.Diallo, A.S. Maiga, A. Wereme and G. Sissoko, (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**, 193-211. <http://dx.doi.org/10.1051/epjap:2008085>
- [31] Martin A. Green (2013). High-Efficiency Silicon Solar Cell Concepts. Chapter published 2013 in Solar Cells, Pp. 87-113 <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-386964-7.00005-6>
- [32] Le Quang Nam, M. Rodot, M. Ghannam, J. Coppye, P. de Schepper, J. Nijs, D. Sarti, I. Perichaud & S. Martinuzzi.(1992). Solar cells with 15.6% efficiency on multicrystalline silicon, using impurity gettering, back surface field and emitter passivation. International Journal of Solar Energy, vol. 11, pp. 273-279 .<https://doi.org/10.1080/01425919208909745>
- [33] A. Cuevas, R.A. Sinton and R. R. King. A Technology-Based Comparison between Two-Sided and Back-Contact Silicon Solar Cells. The 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Lisbon, 1991, 8-12, 23-26. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3622-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3622-8_6)
- [34] 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. [https://doi.org/10.1002/1099-159X\(200007/08\)8:4<385::AID-PIP340>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/1099-159X(200007/08)8:4<385::AID-PIP340>3.0.CO;2-B)
- [35] Sissoko, A. Correa, E. Nanema, M. N. Diarra, A. L. Ndiaye, M. Adj (1998). Recombination Parameters measurement in silicon double sided surface field cell. Proceeding of the World Renewable Energy Congress, 20 – 25 September, Pp.1856 – 1859.
- [36] 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>
- [37] Khady Faye, Idrissa Gaye, Sega Gueye, Mamadou Wade, Grégoire Sissoko (2014).Silicon Solar Cell Under Back Side Illumination: Effect Of Magnetic Field. IPASJ- International Journal of Electrical Engineering (IJEE), Volume 2, Issue 9, September 2014, pp 1-9.
- [38] Heinbockel, J.H. and Walker, G.H. (1988) Three-Dimensional Models of Conventional and Vertical Junction Laser-Photovoltaic Energy Converters. NASA-TM-403919880014727
- [39] Suk-Ho Choi Graphene-Based Vertical-Junction Diodes and Applications. Journal of the Korean Physical Society, Vol. 71, No. 6, September 2017, pp. 311~318.
- [40] A.Gover and P. Stella (1974). Vertical Multijunction Solar-Cell One-Dimensional Analysis. IEEE Transactions on Electron Devices. Pp. 21, 351-356.<https://doi.org/10.1109/T-ED.1974.17927>
- [41] J. F.Wise. Vertical Junction Hardened Solar Cell. US Patent, 1970. 3, 690-953.
- [42] B.Terheiden, G. Hahn, P. Fath and E.Bucher (2000). The Lamella Silicon Solar Cell. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, 1-5 May, pp.1377-1380.
- [43] D. J. Paez, E. Huante-Ceron, A. P. Knights (2013). A Vertical PN Junction Utilizing the Impurity Photovoltaic Effect for the Enhancement of Ultra-thin Film Silicon Solar Cells MRS Proceedings Vol. 1536, Pp.39 to 44 <http://dx.doi.org/10.1557/opl.2013.750>
- [44] Nobuyuki Andoh, Kenichi Hayashi, Takatoshi Shirasawa, Toshiyuki Sameshima, Koichi Kamisako (2001) .Effect of film thickness on electrical property of microcrystalline silicon. Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 66 issue 1-4 Pp. 437-441

- [45] A. A. Sayem, Y. Arafat and M. M. Rahman (2014). 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, pp. 524-527, doi: 10.1109/ICECE.2014.7026952.
- [46] Yasar S., Kahraman S., Cetinkaya S., Apaydin S., Bilican I., Uluer I. (2016). Numerical thickness optimization study of CIGS based solar cells with wxAMPS, Optik, 127 (20), pp. 8827-8835.
- [47] Chung F; Chung-Feng Jeffery Kuo, Hung-Min Tu, Shin-Wei Liang, Wei-Lun Tsai (2010). Optimization of microcrystalline silicon thin film solar cell isolation processing parameters using ultraviolet laser. Optics & Laser Technology, Vol. 42 issue 6, Pp. 945-955. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.01.013>
- [48] Ould Mohamed, N.M.M., Sow, O., Gueye, S., Traore, Y., Diatta, I., Thiam, A., Ba, M.A., Mane, R., Ly, I. and Sissoko, G. (2019). Influence of Both Magnetic Field and Temperature on Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness Determination. Journal of Modern Physics, 10, 1596-1605. <https://doi.org/10.4236/jmp.2019.1013105>
- [49] Maimouna Mint ELY, Ndeye Thiam, Mor Ndiaye, Youssou Traore, Richard Mane, El hadji Sow, Oulimata Mballo, Masse Samba Dieng, Cheikh Tidiane Sarr, Ibrahima Ly, Gregoire Sissoko, (2020). Surface recombination velocity concept as applied to determinate back surface illuminated silicon solar cell base optimum thickness, under temperature and external magnetic field effects. Journal of Scientific and Engineering Research, 7(2), pp.69-77, [www.jsaer.com](http://www.jsaer.com)
- [50] Gora Diop, Hamet Yoro Ba, Ndeye Thiam, Youssou Traore, Babou Dione, Mamour Amadou Ba, Pape Diop, Masse Samba Diop, Oulimata Mballo and Gregoire Sissoko (2019). Base thickness optimization of a vertical series junction silicon solar cell under magnetic field by the concept of back surface recombination velocity of minority carrier. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 14, No. 23, pp.4078-4085.
- [51] Mamadou Sall, Mame Faty Mbaye Fall, Ousmane Diasse, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Oumar Dia, Khady Loum, Mamadou Wade And Gregoire Sissoko (2022). Determination of optimum thickness of the base of  $n^+/p/p^+$  silicon solar cell, illuminated by the rear face by a monochromatic light of long wavelength in frequency modulation. Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences, Vol. 11, N<sup>o</sup> 4, 064-077. <https://doi.org/10.24214/jcbps.C.11.4.06477>
- [52] Sega Diagne, Ousmane Sow, Gora Diop, Richard Mane, Ibrahima Diatta, Djiby Ndongue, Youssou Traore, Lemrabott Habiboullah, Mamadou Wade and Gregoire Sissoko. (2022) Optimization of silicon solar cell base thickness, while illuminated by a long wavelength monochromatic light: influence of both Lorentz law and Umclapp process. International Journal of Advanced Research, 10(08), 133-143. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/151508>
- [53] Dede, M.M.S., Ba, M.L., Ba, M.A., Ndiaye, M., Gueye, S., Sow, E. H., Diatta, I., Diop, M.S., Wade, M. and Sissoko, G. (2020). Back Surface Recombination Velocity Dependent of Absorption Coefficient as Applied to Determine Base Optimum Thickness of an  $n^+/p/p^+$  Silicon Solar Cell. Energy and Power Engineering, 12, 445-458. <https://doi.org/10.4236/epe.2020.127027>
- [54] Gilbert Ndiassé Dione, Hamet Yoro BA, Gora Diop, Malick Ndiaye, Ibrahima Diatta, Khady Loum, Youssou Traore, Moustapha Thiame, Ousmane Sow, Mamadou Wade and S. Gregoire. Bifacial ( $n^+-p-p^+$ ) Silicon Solar Cell base thickness optimization, while illuminated by the rear face with monochromatic light of short wavelengths. International Journal of advanced Research (IJAR), 2022, 10(09), 409-418. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/15372>
- [55] Loum, K., Sow, O., Diop, G., Mane, R., Diatta, I., Ndiaye, M., Gueye, S., Thiame, M., Wade, M. and Sissoko, G. (2023) AC Back Surface Recombination Velocity as Applied to Optimize the Base Thickness under Temperature of an ( $n^+-p-p^+$ ) Bifacial Silicon Solar Cell, Back Illuminated by a Light with Long Wavelength. World Journal of Condensed Matter Physics, 13, 40-56. doi: 10.4236/wjcmp.2023.131003.
- [56] 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 Energy Conference, Lisbon, 8-12 April 1991, 66-67. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3622-8\\_17](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3622-8_17)
- [57] R. Van Steenwinkel, M.C. Carotta, G. Martinelli, M. Mercli, L. Passari and D. Palmeri (1990). Lifetime Measurement in Solar Cell of Various Thickness and Related Silicon Wafer. Solar Cells, 28, 287-292. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(90\)90063-BG](https://doi.org/10.1016/0379-6787(90)90063-BG).
- [58] Betsler, Y., Ritter, D., Bahir, G., Cohen, S. and Serling, J. (1995) Measurement of the Minority Carrier Mobility in the Base of Heterojunction Bipolar Transistors Using a Magneto Transport Method. Applied Physics Letters, 67, 1883-1884. <https://doi.org/10.1063/1.114364>
- [59] 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.

- [60] Madougou, S., Made, F., Boukary, M.S. and Sissoko, G. (2007) I-V Characteristics for Bifacial Silicon Solar Cell Studied under a Magnetic Field. *Advanced Materials Research*, 18-19, 303-312.<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.18-19.303>
- [61] 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/pip.4670030303>
- [62] K.Rajkanan, R. Singh and J. Schewchun (1979). Absorption coefficient of silicon for solar cell calculations. *Solid-State Electronics*, 22, 793-795. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(79\)90128-X](https://doi.org/10.1016/0038-1101(79)90128-X)
- [63] Misiakos, K. and Tsamakis, D. (1994) Electron and Hole Mobilities in Lightly Doped Silicon. *Applied Physics Letters*, 64, 2007-2009. <https://doi.org/10.1063/1.111721>.
- [64] N.D. Arora, J. R. Hauser, D. J. Roulston (1982). Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature. *IEEE. Trans. Electron devices*, vol. ED-29, pp.292-295.