



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

## INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI: 10.21474/IJAR01/14584  
DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/14584>



### RESEARCH ARTICLE

#### CAPACITE DE DIFFUSION D'UNE PHOTOPILE AU SILICIUM A MULTI-JONCTIONS VERTICALES CONNECTEES EN SERIE SOUS ECLAIREMENT MONOCHROMATIQUE EN MODULATION DE FREQUENCE: EFFET DU TAUX DOPAGE DE LA BASE

Malick Ndiaye<sup>1</sup>, Ousmane Sow<sup>2</sup>, Gora Diop<sup>1</sup>, Ibrahima Diatta<sup>1</sup>, Dibor Faye<sup>1</sup>, Oulimata Mballo<sup>1</sup>, Issa Diagne<sup>1</sup>  
and Gregoire Sissoko<sup>1</sup>

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.

#### Manuscript Info

##### Manuscript History

Received: 20 February 2022  
Final Accepted: 24 March 2022  
Published: April 2022

##### Key words:-

Photopile au Silicium-Verticales  
Multijonctions Series-Capacitance-  
Diagrammes de Bode et Nyquist

#### Abstract

La base de la photopile (n+/p/p+) au silicium à multi-jonctions verticales connectées en série (MJVS) de dopage Nb, est placée sous illumination monochromatique ( $\alpha(\lambda)$ ) en modulation de fréquence ( $\omega$ ). La résolution de l'équation de diffusion relative à la densité des porteurs de charge photogénérés  $\delta(x, t)$  est constituée de termes tels que: le coefficient de diffusion dynamique  $D(\omega, Nb)$  et les termes de recombinaison, fonction de la fréquence de modulation de l'excitation lumineuse et du taux de dopage Nb-le taux de génération  $G(\omega, t)$ . Les conditions aux limites d'espace prenant en compte les vitesses de recombinaison surfaciques ( $S_f$ ) et  $S_b$ , respectivement à la jonction (n+/p) à la face arrière (p/p+), ont permis de compléter la solution de l'équation de diffusion des porteurs de charge photogénérés. De la densité des porteurs minoritaires  $\delta(x, t)$  solution de l'équation de diffusion, obtenue d'une base de taux de dopage Nb, la capacité de diffusion  $C(\omega, \alpha(\lambda), S_f, S_b, Nb)$  est déduite. La réponse capacitive à travers son amplitude et de sa phase, est étudiée lorsque la photopile est en mode de fonctionnement de court-circuit ou de circuit ouvert, à travers le diagramme de Bode et de Nyquist, pour différents cas de taux de dopage de la base.

Copy Right, IJAR, 2022.. All rights reserved.

#### Introduction:-

Notre étude porte sur la caractérisation de la photopile au silicium cristallin [1, 2] à jonctions verticales [3-8] en particulier, celles connectées en série [3, 4].

Le mécanisme physique de la conversion photovoltaïque est l'interaction photon-matière suivie de la libération des charges électriques (de la bande de valence à la bande de conduction), qui diffusent dans le matériau et finalement collectés, pour fournir un photocourant au circuit externe.

En effet, plusieurs études sont consacrées à ce domaine recherche [9, 10, 11], qui va de la fabrication du matériau (Si) semi-conducteur, à l'élaboration de la photopile, dont les paramètres fondamentaux sont donnés ci-après.

1. Les paramètres phénoménologiques (électroniques) sont:

**Corresponding Author:- Gregoire Sissoko, [gssissoko@yahoo.com](mailto:gssissoko@yahoo.com)**

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

2. le dopage( $N_b$ ) donnant le coefficient de diffusion  $D(N_b)$  des porteurs minoritaires de charge dans la base, relié à la durée de vie( $\tau$ ) et à la longueur de diffusion( $L$ ) par la relation d'Einstein[12-21].
3. les taux de recombinaison surfaciques[22, 23] des porteurs minoritaires de charge  $S_f$  et  $S_b$ , respectivement aux frontières de base de la photopile[24-34] dans le modèle à une dimension et dans le modèle à trois dimension, la vitesse de recombinaison( $S_g$ ) aux joints de grain est prise en compte [15, 29, 35, 36, 37].
4. Les paramètres électriques sont obtenus par l'établissement d'un modèle équivalent électrique à la photopile (sous obscurité et/ou sous éclairage) qui permet de définir les résistances [38-45] série ( $R_s$ ) et shunt ( $R_{sh}$ ), ainsi que les capacités [46-55] de transition( $C_0$ ) et de diffusion.

#### Notre étude prend en compte :

- 1) les paramètres optiques[56, 57, 58] dont, la qualité du flux ( $F$ ) du photon (de longueur d'onde ( $\lambda$ ) de la lumière incidente (sur la photopile), le coefficient d'absorption ( $\alpha_t$ ) (associé à l'énergie de gap  $E_g$ ) et le coefficient de réflexion  $R(\lambda)$  monochromatique, qui introduisent un taux de génération (Loi de Beer Lambert ou Bouger) des charges électriques (photogénération).
- 2) La fréquence de modulation ( $\omega$ ) de cette lumière monochromatique incidente de flux ( $\Phi$ )
- 3) Le coefficient  $D$  de diffusion des porteurs minoritaires de charge [15, 23, 29, 34, 51] est influencé par plusieurs facteurs. Dans le cas que nous étudions, il est lié:
  - i) Au taux d'impuretés ( $N_b$ ) d'atomes de bore ( $B$ ) lors de la fabrication de la photopile [14].
  - ii) A la fréquence de modulation de la lumière incidente sur la photopile [59, 60, 61, 62].

L'importance de ce paramètre électrique dans la fabrication de la photopile, réside dans le fait qu'il est le « cœur » de ce dispositif.

En effet il est obtenu par migration des charges électriques (trous et électrons majoritaires) lors du contact entre le silicium de types (n) et (p). Ainsi les électrons majoritaires du matériau (n) migrent vers le matériau (p), s'y installent (charges fixes dans (p)) et laissent par conséquent derrière eux les charges positives (trous) dans le matériau (n), qui constitueront les charges fixes de ce côté. Ainsi se construit la jonction n/p, assimilable à un condensateur plan (de champ électrique interne et de capacité  $C_0 = \epsilon \cdot \frac{S}{x_0}$ , (avec  $x_0$  l'épaisseur séparant les armatures de surface  $S$  et de permittivité diélectrique  $\epsilon$ ), permettant de dissocier des charges électriques photogénérées et qui diffusent dans le matériau (selon la capacité de diffusion).

Notre étude consiste à étudier, l'effet de ces différents éléments ci-dessus cités sur le comportement de la capacité (de diffusion et de transition) de la photopile.

#### Théorie :-

##### Présentation de la photopile

La photopile à jonctions (n/p) verticales connectées en parallèle et à jonctions verticales (n+/p/p+) connectées en série [5, 41] sont conçues de telle sorte que la lumière incidente arrive parallèlement au plan de la jonction (OZ), identiquement sur toutes les parties. La connection en série permet d'accroître la photopotension[3], tandis que la connection en parallèle accroît le photocourant[5, 7]. La photopile considérée de type (n<sup>+</sup>-p- p<sup>+</sup>) au silicium et sa structure sont présentées par les figures (1 et 2):

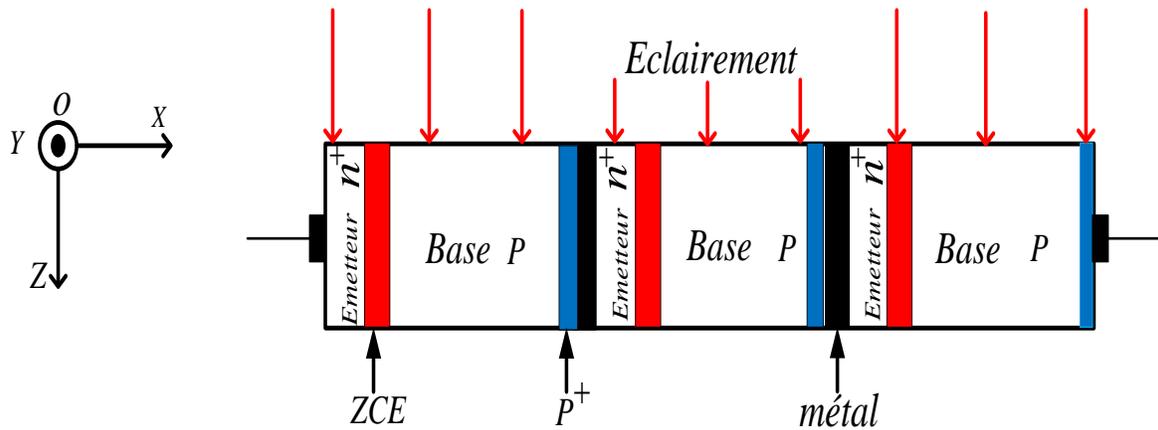


Figure 1:-Photopile à jonction verticale série.

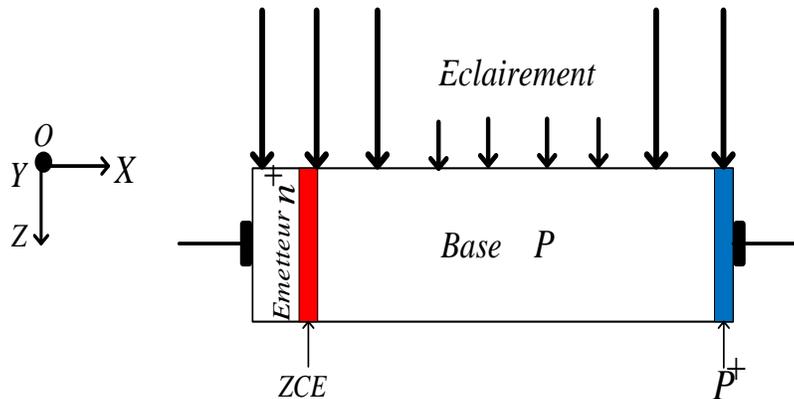


Figure 2:- Les parties d'une unité de la photopile à jonction verticale série.

La photopile à jonctions verticales connectées en serie est essentiellement constituée de:

1. L'émetteur de type  $n^+$  : l'épaisseur est faible (0,5 à 1  $\mu\text{m}$ ), elle est fortement dopée en atomes donneurs de phosphore ( $10^{17}$  à  $10^{19}$  atomes/ $\text{cm}^3$ ).
2. Une base : cette partie est peu dopée en atomes accepteurs ( $10^{15}$  à  $10^{17}$  atomes/ $\text{cm}^3$  de bore). Mais son épaisseur est beaucoup plus importante que celle de l'émetteur. Elle peut s'élever jusqu'à 250  $\mu\text{m}$  et de profondeur égale à 170  $\mu\text{m}$ . Cette partie type (p) de la structure est choisie de faible qualité électronique et peut répondre à l'avantage de l'éclairage à concentration de lumière [7, 8]. L'étude portera essentiellement sur cette partie qui est la zone de prédominance des phénomènes d'absorption de génération, de recombinaison et de diffusion.
3. Jonction Emetteur-Base (zone de charge d'espace ou jonction): à la jonction des deux matériaux semi-conducteurs dopés différemment (émetteur de type n et la base de type p), s'établit une jonction ou règne un champ électrique intense. Ce champ permet de séparer les parties électrons-trous qui arrivent à la jonction.
4. Le BSF (Back Surface Field): c'est la zone (de type  $p^+$ ) située en phase arrière à la base (p), elle est surdopée en atomes accepteurs ( $10^{17}$  à  $10^{19}$  atomes/ $\text{cm}^3$ ) par rapport à la base. Cela induit l'existence d'un champ électrique arrière qui permet de renvoyer vers l'interface émetteur-base les porteurs minoritaires générés près de la face arrière [1, 2] et permet d'augmenter la collecte des porteurs de charge.

#### Equation de continuité relative à la densité des porteurs minoritaires dans la base(p)

Sous l'effet de l'excitation lumineuse absorbée, des paires électron-trou sont générées dans toutes les régions de la photopile (l'émetteur, la jonction et la base).

Compte tenu des phénomènes de génération, de recombinaison et de diffusion au sein de la photopile, l'équation de continuité des porteurs minoritaires de charge dans la base à l'abscisse  $x$  en régime dynamique fréquentiel [59, 61, 62, 63] est de la forme :

$$D(\omega, Nb) \cdot \frac{\partial^2 \delta(x, \omega, Nb, t)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x, \omega, Nb, t)}{\tau} = -G(z, \omega, t) + \frac{\partial \delta(x, \omega, Nb, t)}{\partial t} \quad (1)$$

avec:

$$\delta(x, \omega, Nb, t) = \delta(x, Nb) e^{j\omega t} \quad (j \text{ complexe}) \quad (2)$$

$\delta(x, \omega, Nb, t)$  : Décrit la densité des porteurs minoritaires de charges photogénérées

$D(\omega, Nb)$ : est le coefficient dynamique de diffusion des porteurs minoritaires dans une base dopée ( $Nb$ ), relié à la longueur dynamique de diffusion par la relation suivante :

$$\frac{1}{L(\omega, Nb)^2} = \frac{1 + j\omega\tau}{\tau D(\omega, Nb)} \quad (3)$$

$G(z, t)$  : est le taux global de génération et son expression est de la forme:

$$G(z, \omega, t) = g(z) e^{j\omega t} \quad (4)$$

$g(z)$  : est la composante spatiale et  $e^{j\omega t}$  est la composante temporelle.

$$G(z, \omega, t) = \alpha_t (1 - R(\lambda)) F e^{-\alpha_t z} e^{-j\omega t} \quad (5)$$

La solution de l'équation générale est donnée par l'expression suivante:

$$\delta(x, t) = \left( A \cosh \frac{x}{L(\omega)} + B \sinh \frac{x}{L(\omega)} + \frac{L(\omega)}{D(\omega)} \alpha_t (1 - R(\lambda)) F e^{-\alpha_t t} \right) e^{j\omega t} \quad (6)$$

Les coefficients  $A$  et  $B$  sont déterminés à partir des conditions aux limites ci-dessous :

A la jonction ( $n^+/p$ ) en  $x = 0$ , il vient :

$$D(\omega, Nb) \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} = S_f \delta(x=0) \quad (7)$$

$S_f$  est la vitesse recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la jonction [24, 26, 34, 44].

A la face arrière ( $p/p^+$ ), en  $x=H$ ,  $H$  est l'épaisseur de la photopile à la base:

$$D(\omega, Nb) \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \Big|_{x=H} = -S_b \delta(x=H) \quad (8)$$

$S_b$  : est la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la face arrière [2, 24, 25, 29, 30, 60, 64, 65, 66].

## Resultatset Discussions:-

### Coefficient de diffusion

Le coefficient de diffusion est donné par l'expression suivante [14]:

$$D(N_b) = \frac{1350 \times Vt}{\sqrt{1 + 81 \times \frac{N_b}{N_b + 3,2 \times 10^{18}}}} \quad (9)$$

Tenant compte de l'expression du coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la photopile en régime dynamique fréquentiel [20, 59, 61, 62] :

$$D(\omega) = D \times \left( \frac{1 - j \cdot \omega^2 \cdot \tau^2}{1 + (\omega\tau)^2} \right) \quad (10)$$

$D$  est le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la photopile de dopage donné, en régime stationnaire.

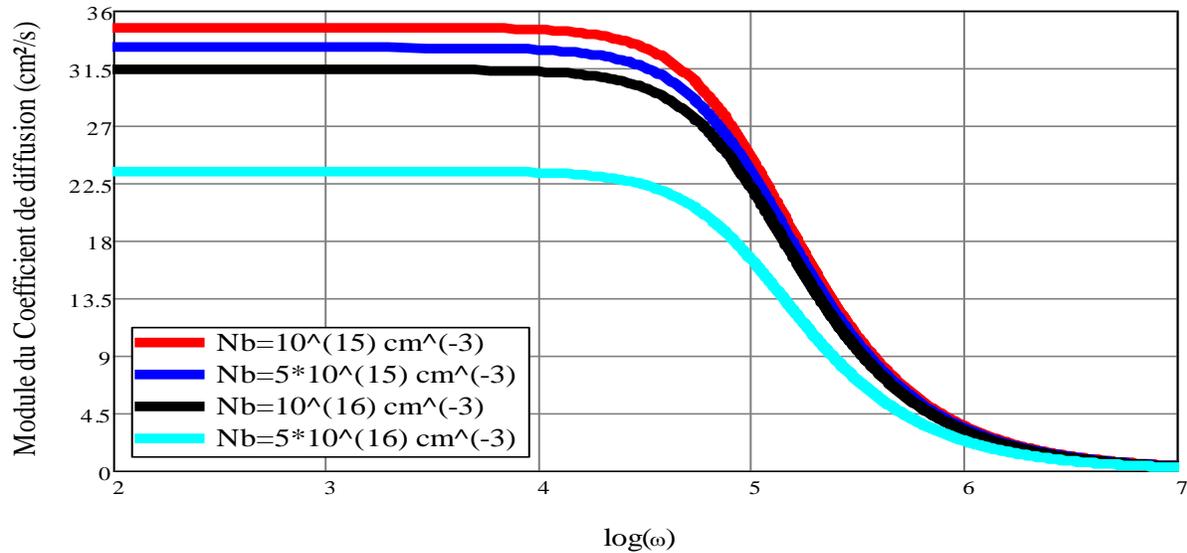
Ainsi la relation suivante s'établit:

$$D(\omega, Nb) = D(Nb) \cdot \left( \frac{1 - j \cdot \omega^2 \cdot \tau^2}{1 + (\omega\tau)^2} \right) \quad (11)$$

Elle donne l'expression du coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base de la photopile de taux de dopage ( $Nb$ ), en régime dynamique fréquentiel

### Profil du module du coefficient de diffusion en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du taux de dopage :

Nous représentons à la figure 3, le profil du module du coefficient de diffusion en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du taux de dopage (Equation. 11).

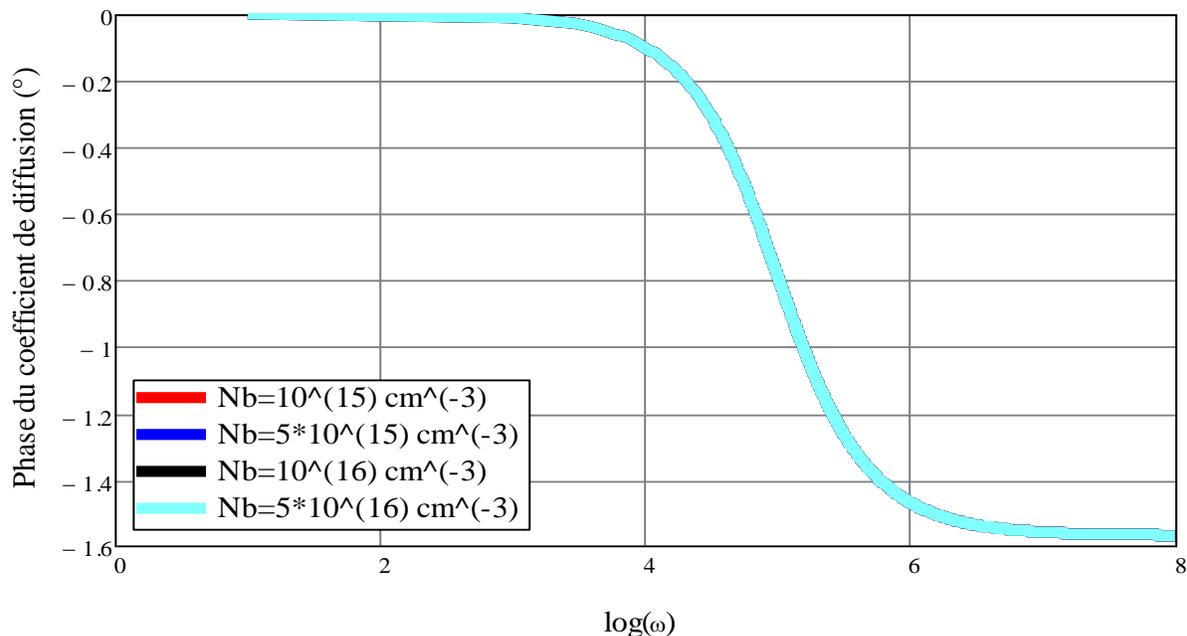


**Figure 3:-** Module du coefficient de diffusion en fonction de logarithme décimal de la pulsation pour différentes valeurs du taux de dopage ( $D_0 = 35 \text{ cm}^2/\text{s}$ ).

La figure 3 montre que le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base de la photopile est d'amplitude constante aux basses fréquences (régime stationnaire :  $\omega \ll \omega_c$ , fréquence de coupure) et décroît avec le taux de dopage de la base  $N_b$ . Aux grandes fréquences (régime dynamique :  $\omega \gg \omega_c$ ), l'amplitude du coefficient de diffusion des porteurs minoritaires décroît très rapidement avec la fréquence. En effet, plus le dopage est grand, plus la probabilité qu'un porteur de charge se recombine est élevée et plus la fréquence est grande plus le temps de relaxation du porteur de charge est faible, alors ceci a comme conséquence : la diminution drastique du coefficient de diffusion.

#### Phase du coefficient de diffusion en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du taux de dopage

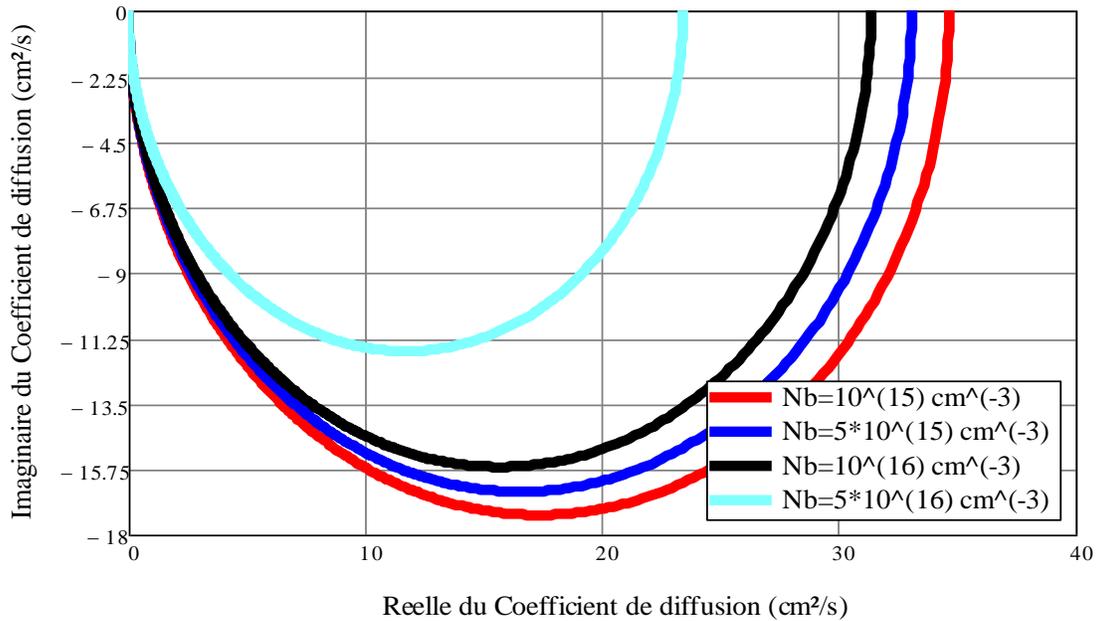
Nous représentons à la figure 4, la phase du coefficient de diffusion en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du taux de dopage.



**Figure 4:-** Phase du coefficient de diffusion en fonction de logarithme décimal de la pulsation pour différentes valeurs du taux de dopage ( $D_0 = .35 \text{ cm}^2/\text{s}$ ).

**Diagramme de Nyquist du coefficient de diffusion**

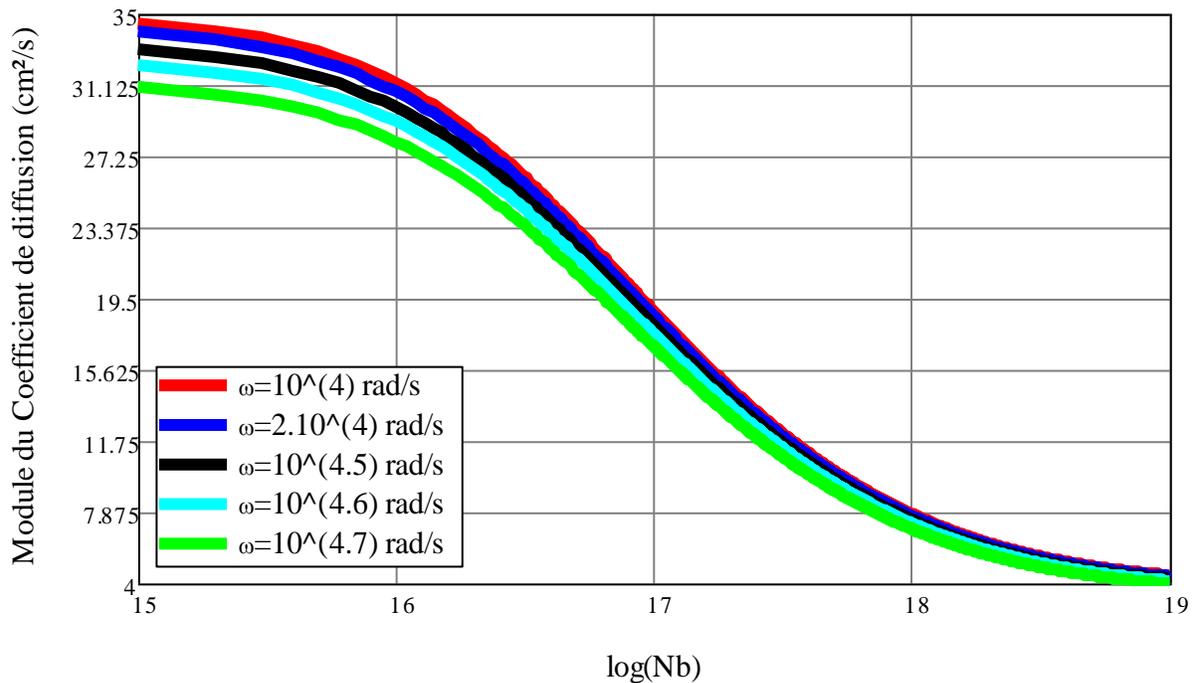
Sur la figure 5, nous représentons le diagramme de Nysquist du coefficient de diffusion en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du taux de dopage.



**Figure 5:-** Partie Imaginaire du coefficient de diffusion en fonction de sa partie Réelle pour différentes valeurs du taux de dopage ( $D_o = .35\text{cm}^2/\text{s}$ ).

**Profil du module du coefficient de diffusion en fonction du taux de dopage pour différentes valeurs de la fréquence:**

Nous représentons à la figure 6, le profil du module du coefficient de diffusion en fonction logarithme décimal du taux dopage pour différentes valeurs de la pulsation.



**Figure 6:-** Module du coefficient de diffusion en fonction de logarithme décimal du taux de dopage pour différentes valeurs de la fréquence.

Le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires décroît en fonction du logarithme décimal du taux de dopage. Il est maximal pour de faibles valeurs du dopage, puis diminue. Cette diminution est due au fait que la fréquence de modulation réduit le temps de vie des porteurs.

### Etude du phototension

Lorsque la photopile est éclairée, il apparaît une phototension dont l'expression est donnée par la relation de Boltzmann :

$$V_{ph}(\omega, Nb, Sf) = V_T \ln \left( 1 + \frac{N_b}{n_0^2} \cdot \delta(0, \omega, Nb, Sf) \right) \quad (12)$$

Avec :  $n_0$  est la densité intrinsèque des porteurs minoritaires

$V_T = \frac{K \cdot T}{q}$  est appelé la tension thermique ;  $K$  est la constante de Boltzmann

$q$  : est la charge de l'électron ;  $T$  est la température absolue à l'équilibre thermique

$$\delta(0, \omega, Nb, Sf) = A(\omega, Nb, Sf) + \frac{L(\omega)}{D(\omega)} \alpha_t (1 - R(\lambda)) Fe^{-\alpha_t t} \quad (13)$$

$$V_{ph}(\omega, Nb, Sf) = \frac{K \cdot T}{q} \ln \left[ 1 + \frac{N_b}{n_0^2} \left( A(\omega, Nb, Sf) + \frac{L(\omega)}{D(\omega)} \alpha_t (1 - R(\lambda)) Fe^{-\alpha_t t} \right) \right] \quad (14)$$

### Etude de la Capacité de diffusion

Les équations ci-dessus permettent l'étude de la capacité de diffusion de la photopile éclairée par une lumière monochromatique en modulation de fréquence. Ainsi nous proposons le module de la capacité en fonction de la vitesse recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du taux de dopage puis de la pulsation. Nous terminons par l'étude de la représentation de Nyquist de la capacité.

Lorsque la photopile est illuminée, les porteurs de charges photogénérés diffusent dans la base. La capacité qui apparaît est alors assimilée à une capacité de diffusion, l'équation de la capacité totale est alors donnée par :

$$C(\omega, Nb, Sf) = q \cdot \frac{\delta(0, \omega, Nb, Sf)}{V_{ph}(\omega, Nb, Sf)} \quad (15)$$

Le développement de cette expression fait apparaître deux termes :

$$C(\omega, Nb, Sf) = \frac{q \cdot (n_i^2)}{N_b \cdot V_T} + \frac{q \cdot \delta(0, \omega, Nb, Sf)}{V_T} \quad (16)$$

$$C(\omega, Nb, Sf) = C_0(N_b) + C_d(\omega, Nb, Sf) \quad (17)$$

$$\text{Avec } C_0(N_b) = \frac{q \cdot (n_i^2)}{N_b \cdot V_T} \quad (18)$$

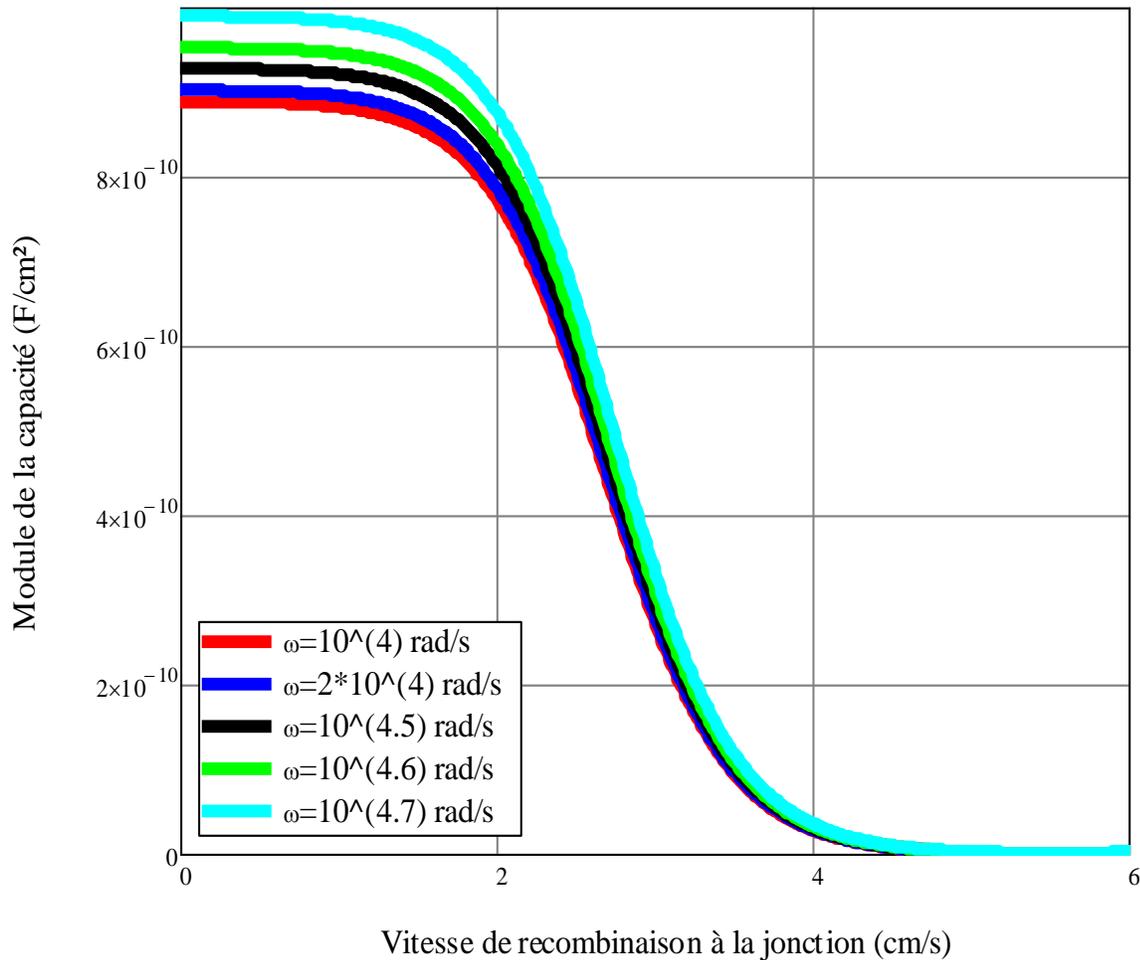
$$C_d(\omega, Nb, Sf) = \frac{q \cdot \delta(0, \omega, Nb, Sf)}{V_T} \quad (19)$$

Le premier terme représente la capacité de transition et le second, la capacité de diffusion

### Capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction

#### Effet de la fréquence de modulation de la lumière incidente

A la figure 7, nous représentons le module de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la fréquence.

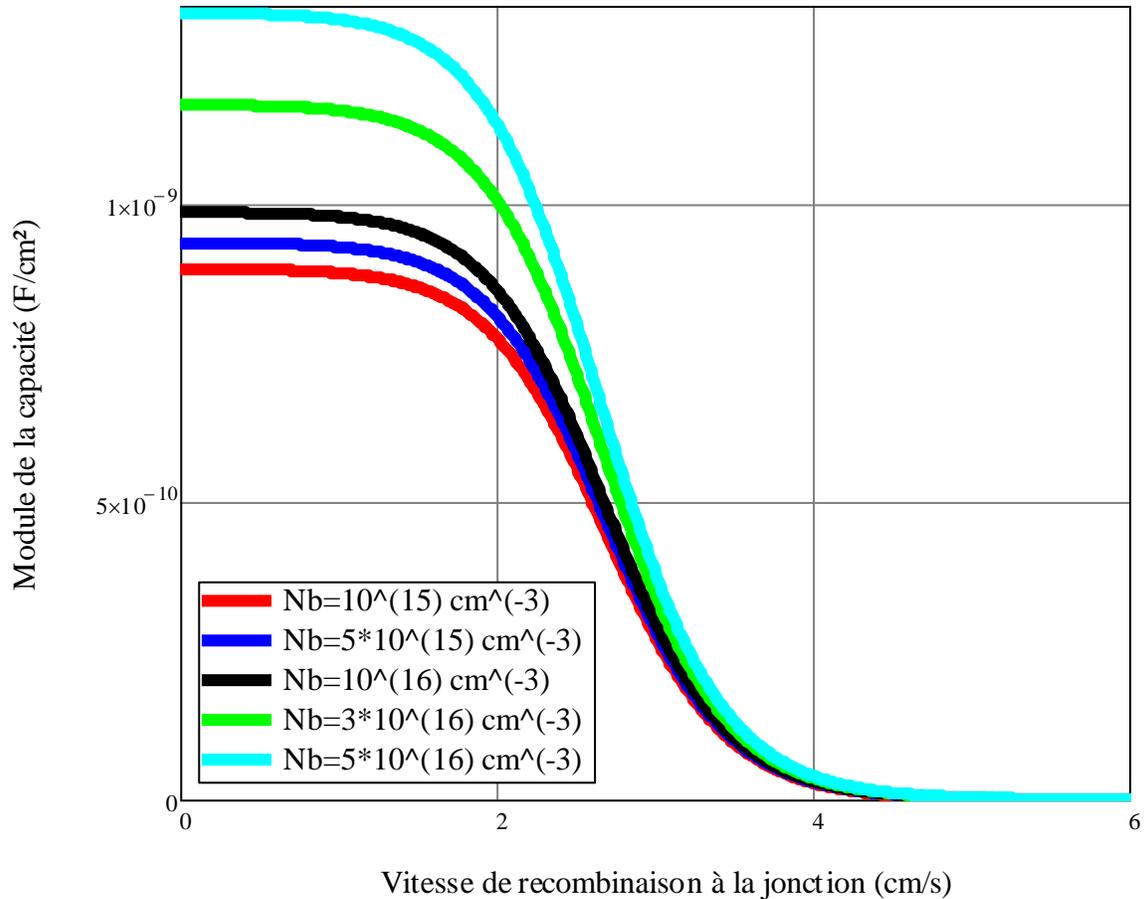


**Figure 7:-** Module de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction ( $Sf = j \cdot 10^j$  cm/s) pour différentes valeurs de la fréquence ( $z=0.002$  cm ;  $\lambda=0,58$   $\mu\text{m}$ ,  $N_b=10^{15}$   $\text{cm}^{-3}$ ).

La capacité est un plateau ( $C_{co}$ ) aux faibles  $Sf$  (circuit ouvert) et décroît rapidement vers un plateau inférieur ( $C_{cc}$ ) aux grandes valeurs de  $Sf$  (court-circuit). Alors ( $C_{co}$ ) est supérieure à ( $C_{cc}$ ), et par conséquent l'épaisseur associée respectivement, ( $X_{co}$ ) est inférieure à ( $X_{cc}$ ), montrant ainsi l'extension de la zone de charge d'espace [48, 49, 55] de la photopile en passant du circuit ouvert au court-circuit. Aux faibles valeurs de  $Sf$ , le module de la capacité augmente avec la fréquence, conséquence de l'accumulation des charges électriques près de la jonction aux grandes fréquences ( $\omega\tau \gg 1$ ) [50, 52, 54, 64, 66, 67], et de la courte longueur d'onde correspondant aux fortes absorptions ( $\alpha(\lambda)$ ) [57, 58].

#### Effet du taux de dopage ( $N_b$ ) de la base

A la figure 8, nous représentons le module de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction ( $Sf$ ) pour différentes valeurs du taux de dopage.



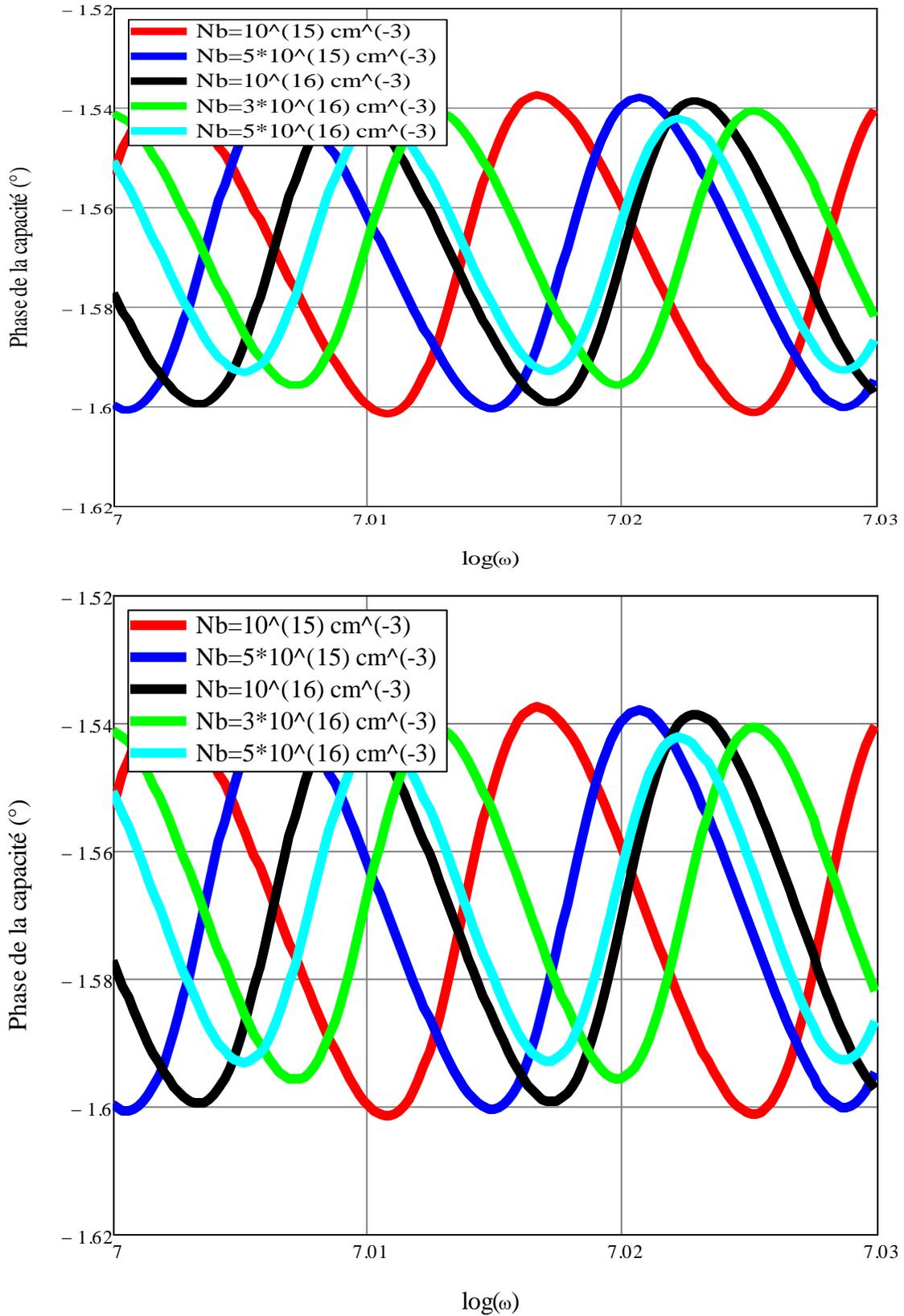
**Figure 8:-** Module de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison ( $Sf = j \cdot 10^j \text{ cm/s}$ ) à la jonction pour différentes valeurs du taux de dopage ( $z=0.002 \text{ cm}$  ;  $\lambda=0,58 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $\omega=10^4 \text{ rad/s}$ ).

Aux faibles valeurs de la vitesse ( $Sf$ ) de recombinaison à la jonction (Circuit ouvert), la diffusion des porteurs minoritaires de charge est faible ou bloquée, alors la capacité est grande et augmente avec le taux dopage ( $N_b$ ) de la base, soumise également à des fréquences de modulation élevée ( $\omega\tau \gg 1$ ) [64, 65] (Eq. 9, 11 et fig. 3). Aux grandes vitesses de la vitesse ( $Sf$ ) de recombinaison à la jonction (Court-Circuit), la diffusion des porteurs augmente, la capacité décroît et devient faible avec la décroissance du taux dopage ( $N_b$ ) de la base, soumise cumulativement à des fréquences de modulation faible ( $\omega\tau \ll 1$ ).

**Phase de la capacité et sa représentation de Nyquist lorsque la photopile est en situation de circuit ouvert ou de court circuit défini par ( $Sf$ ).**

**La phase de la capacité pour la photopile en circuit ouvert (faibles  $Sf$ )**

A la figure 9, nous représentons la phase de la capacité en fonction de logarithme décimal de la pulsation pour différentes valeurs du taux de dopage de la photopile en situation de circuit ouvert.

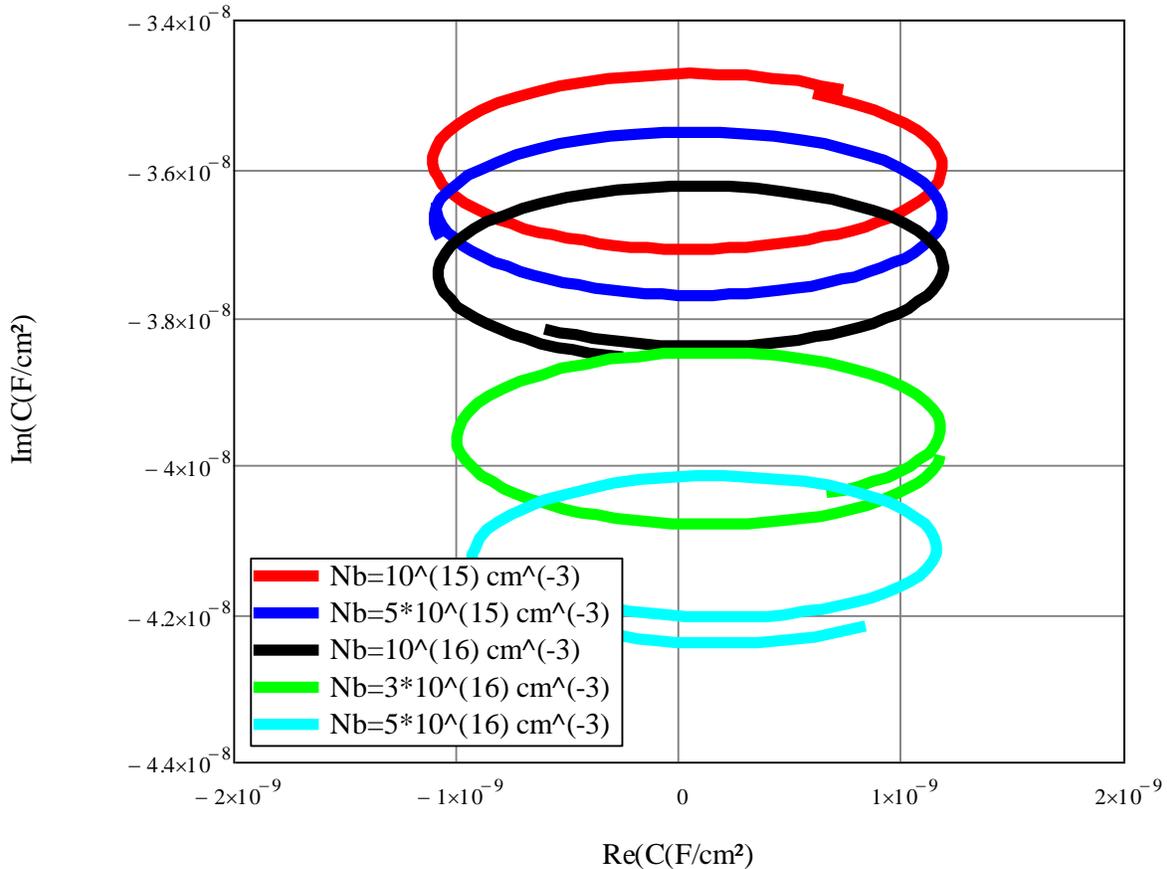


**Figure 9** :- Phase de la capacité en fonction de logarithme decimal de la pulsation pour différentes valeurs du taux de dopage.

La phase est négative et constituée de sinusoides de même période et d’amplitudes décroissantes avec la diminution du taux de dopage(Nb)

**Représentation de Nyquist de la capacité de la photopile en circuit ouvert (faibles Sf)**

A la figure 10, nous représentons la représentation de Nyquist de la capacité de la photopile en situation de circuit ouvert pour différentes valeurs du taux de dopage de sa base.



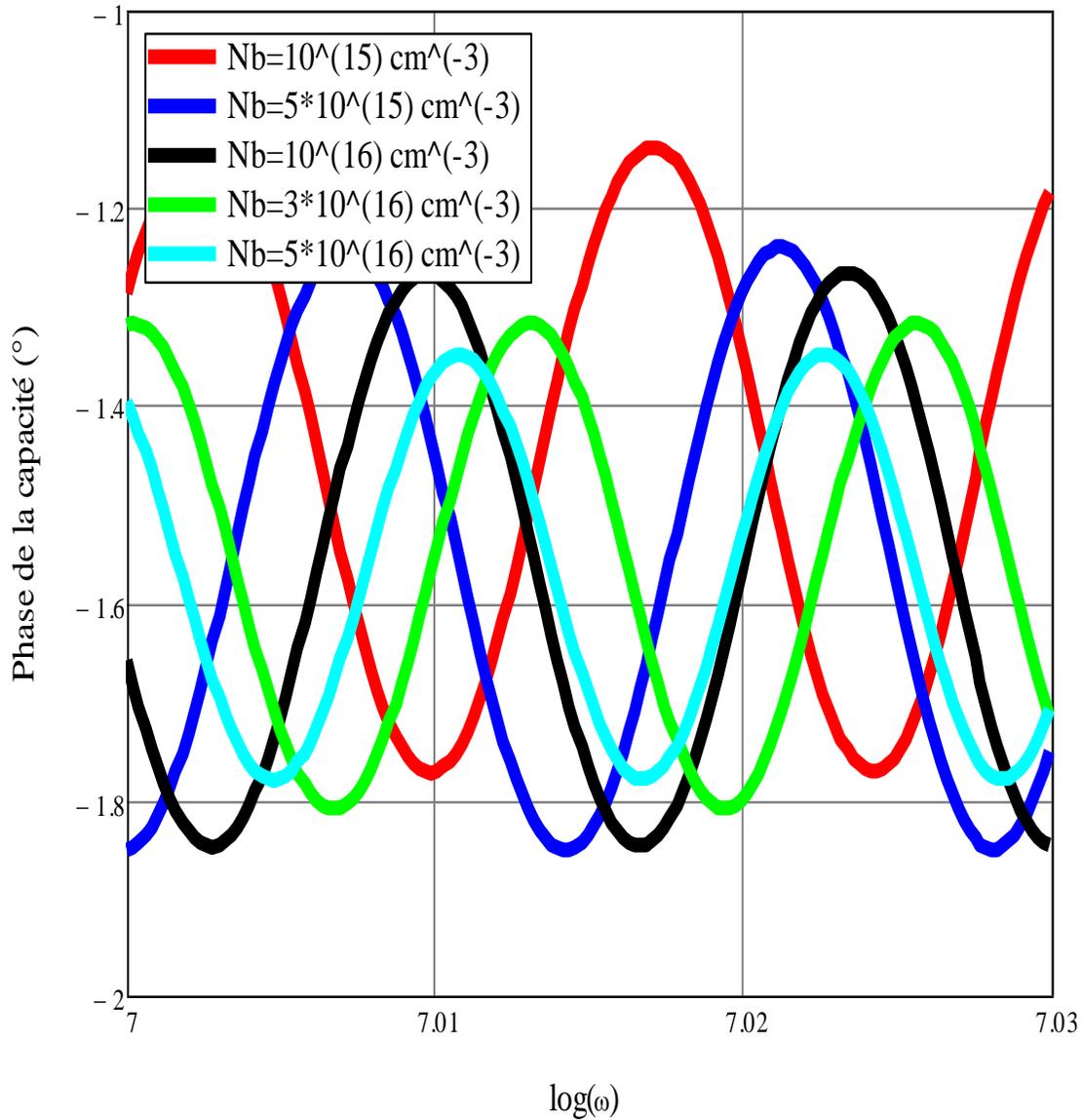
**Figure 10:-** La partie imaginaire de la capacité en fonction de sa partie Réelle pour différents taux de dopage de la photopile en situation de circuit ouvert. Sf = 2.10<sup>7</sup> cm/s.

Lafigure 10 donne la représentation de Nyquist de la capacité, pour differentstaux de dopage(Nb). Le diamètre horizontal de l’elilipse décroît avec le taux de dopage [50, 60, 64, 67].

**Diagrammes de la phase et de Nyquist de la capacité de la photopile en situation de court-circuit**

**Phase de la capacité en fonction de logarithme decimal de la pulsation pour différentes valeurs du taux de dopage.**

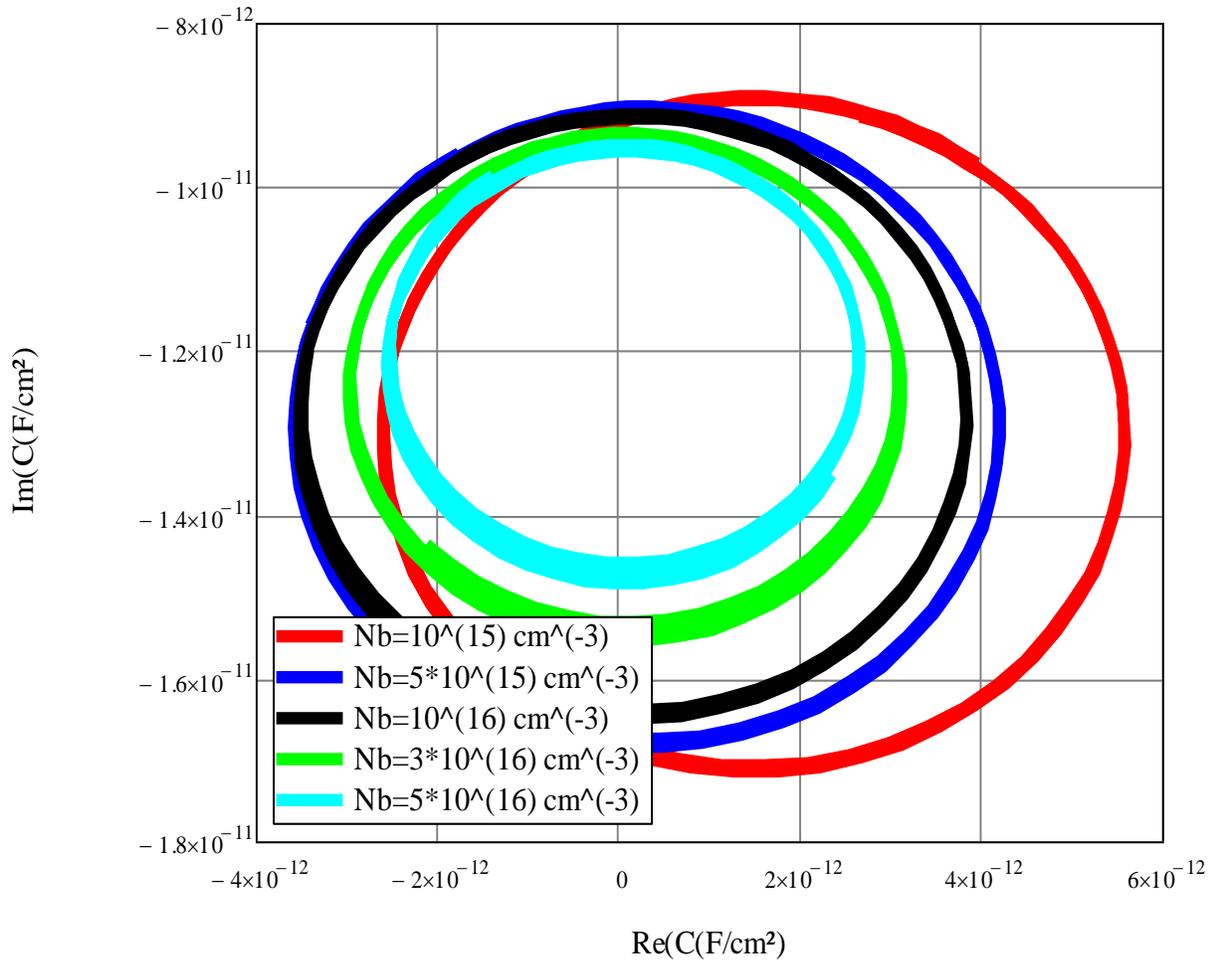
A la figure 11, est représentée la phase (negative) de la capacité en fonction de logarithme decimal de la pulsation pour différentes valeurs du taux de dopage de la photopile en situation de court circuit. Les sinusoides ont la meme période et d’amplitude décroissante avec le taux de dopage(Nb)



**Figure 11:-** Phase de la capacité en fonction logarithme décimal de la pulsation pour différents taux de dopage en situation de court-circuit.  $S_f=6.10^6$ cm/s.

#### Représentation de Nyquist de la capacité de la photopile en court-circuit

A la figure 12, donne la représentation de Nyquist de la capacité pour différentes valeurs du taux de dopage de la base de la photopile en situation de court-circuit.



**Figure 12:-** la Partie Imaginaire de la capacité en fonction de sa partie réelle pour différents taux de dopage de la photopile en situation de court-circuit.  $S_f=6.10^6$  cm/s.

La représentation de Nyquist de la capacité de la photopile en court-circuit montre des cercles légèrement aplatis de centre se déplaçant vers l'origine, de rayon de plus en plus faible avec le taux de dopage de la base. Ceci indique un changement de mécanisme physique de diffusion [50, 60, 67], conformément à l'équation. 11.

### Conclusion:-

L'étude de la capacité de la photopile à jonction verticale série au silicium cristallin, sous éclairage monochromatique en modulation de fréquence et pour différents taux de dopage de la base a été effectuée en résolvant l'équation de continuité relative à la densité des porteurs minoritaires dans la base en régime dynamique fréquentiel, pour différents taux de dopage.

En établissant l'équation de la capacité (transitionnelle et de diffusion) de la photopile, nous avons alors présenté son évolution à travers les diagrammes de Bode (amplitude et phase) et Nyquist pour les points de fonctionnement de circuit ouvert et de court-circuit.

Les effets du taux de dopage et de la fréquence sont présentés à travers le profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction qui indique les points de fonctionnement de la photopile correspondant au circuit ouvert et au court-circuit. La capacité croît avec le taux de dopage, de même avec la fréquence.

En partant du fonctionnement de circuit ouvert au court-circuit, la capacité de diffusion de la photopile décroît et confirme l'extension de la zone de charge d'espace.

Aussi à travers le diagramme de Nyquist de la capacité, cette variation est observée, par un déplacement horizontalement (court-circuit) et verticalement (circuit-ouvert) du centre des cercles.

Les diagrammes de Bode de la capacité et de la phase présentent des sinusoïdes, comportant des harmoniques, en demeurant dans des valeurs négatives.

### References:-

1. 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>
2. J.G. Fossum (1977). Physical Operation of Back-Surface-Field Silicon Solar Cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2, 322-325. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1977.18735>
3. J.F. Wise (1970). Vertical Junction Hardened Solar Cell. *US Patent*, 3, 690-953
4. B. Terheiden, G. Hahn, P. Fath and E. Bucher (2000). The Lamella Silicon Solar Cell. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, pp. 1377-1380.
5. A. Gover and P. Stella. Vertical Multijunction Solar-Cell One-Dimensional Analysis. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1974, 21, 351-356. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1974.17927>
6. G.E. Ayvazian, G.H. Kirakosyan and G.A. Minasyan. Characteristics of Solar Cells with Vertical p-n Junction. *Proceedings of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Paris, 7-11 June 2004, 117-119.
7. Sarfaty, R., Cherkun, A., Pozner, R., Segev, G., Zeierman, E., Flitsanov, Y., Kribus, A. and Rosenwaks, Y. (2011) Vertical Junction Si Micro-Cells for Concentrating Photovoltaics. *Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Hamburg, 5-6 September 2011, 145-147.J
8. M.A. Green. *Silicon Solar Cells: Advanced Principles & Practice*. Bridge Printer Pty, Ltd., Roseberry, 1995.
9. Manav Sheoran, Ajay Upadhyaya, Ajeet Rohatgi (2008). Bulk lifetime and efficiency enhancement due to gettering and hydrogenation of defects during cast multicrystalline silicon solar cell fabrication. *Solid-State Electronics* volume 52 issue 5, Pp. 612-617; <http://dx.doi.org/10.1016/j.sse.2007.10.001>
10. M.P. Deshmukh, J. Nagaraj (2005). Measurement of silicon and GaAs/Ge solar cell device parameters. *Solar Energy Materials and Solar Cells* volume 89 issue 4. Pp. 403-408 <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2005.01.005>
11. 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>
12. S.R. Dhariwal and N.K. Vasu. A Generalized Approach to Lifetime Measurement in pn Junction Solar Cells. *Solid-State Electronics*, 1981, 24, 915-927. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(81\)90112-X](https://doi.org/10.1016/0038-1101(81)90112-X)
13. E.D. Stokes and T.L. Chu, Diffusion Lengths in Solar Cells from Short-Circuit Current Measurements. *Applied Physics Letters*, 1977, 30, 425-426. <https://doi.org/10.1063/1.89433>
14. 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/10.1063/1.1666666>
15. J. Ducas, 3D Modelling of a Reverse Cell Made with Improved Multicrystalline Silicon Wafer. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 1994, 32, 71-88. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(94\)90257-7](https://doi.org/10.1016/0927-0248(94)90257-7)
16. Mohamed Lemine Ould Cheikh, Boureima Seibou, Mohamed Abderrahim Ould El Moujtaba, Khady Faye, Mamadou Wade, Grégoire Sissoko (Jan 2015). Study of base doping rate effect on parallel vertical junction silicon solar cell under magnetic field. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)* – Volume 19 Number 1 – P. 44-55 - ISSN: 2231-5381 (<http://www.ijettjournal.org>)
17. 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
18. Rosling, M., Bleichner, H., Lundqvist, M. and Nordlander, E. (1989) A Novel Technique for the Simultaneous Measurement of Ambipolar Carrier Lifetime and Diffusion Coefficient in Silicon. *Solid-State Electronics*, 35, 1223-1227.
19. O.J. Antilla and S.K. Hahn. Study on Surface Photovoltage Measurement of Long diffusion Length Silicon: Simulation Results. *Journal of Applied Physics*, 1993, 74, 558-569. <https://doi.org/10.1063/1.355343>

20. S.Gupta, P. Ahmed and S.Garg . A Method for the Determination of the Material parameters D, L, S and  $\tau$  from Measured Short-Circuit Photocurrent. Solar Cells, 1988,25, 61-72. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(88\)90058-0](https://doi.org/10.1016/0379-6787(88)90058-0)
21. N.Honma and C. Munakata. Sample Thickness Dependence of Minority Carrier Lifetimes Measured Using an ac Photovoltaic Method. Japanese Journal of Applied Physics, 1987, 26, 2033-2036. <https://doi.org/10.1143/JJAP.26.2033>
22. P.DeVischere, Comment on G.J. Rees “Surface Recombination Velocity —A Useful Concept”. Solid-State Electronics,1986,29, Pp.1161-1165.[https://doi.org/10.1016/0038-1101\(86\)90059-6](https://doi.org/10.1016/0038-1101(86)90059-6)
23. Arora, J.D, Singh, S.N. and Mathur, P.C. (1981) Surface Recombination Effects on the Performance of n+-p Step and Diffused Junction Silicon Solar Cells. Solid State Electronics, 24, 739-747. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(81\)90055-1](https://doi.org/10.1016/0038-1101(81)90055-1)
24. G. Sissoko, C. Museruka, A. Corr ea, I. Gaye and A.L.Ndiaye, Spectral Light Effect on Recombination Parameters of Silicon Solar Cell. World Renewable Energy Congress, Denver, 1996, 15-21 June 1996, Part III, 1487-1490.
25. B. H. Rose and H. T. Weaver. (1983) Determination of effective surface recombination velocity and minority carrier lifetime in high-efficiency Si solar cells. J. Appl. Phys. 54. Pp 238-247
26. G.Sissoko, S. Sivoththanam, M. Rodo 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.
27. K.Denise, L.B. Mamadou, A.B. Mamour, D., Gora, S. El Hadj, M. Oulimata and S. Gregoire, AC Back Surface Recombination in n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup> Silicon Solar Cell: Effect of Temperature. International Journal of advanced Research (IJAR),2020, 8, 140-151.<https://doi.org/10.21474/IJAR01/11273>
28. G. Sissoko, E. Nan ma, A. Corr ea, P. M. Biteye, M. Adj, A. L. Ndiaye, Silicon Solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic. Renewable Energy, Elsevier Science Ltd, 0960-1481/98/#.1998,3, 1848 – 51.
29. H.L.Diallo, A.S. 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, 193-211. <http://dx.doi.org/10.1051/epjap:2008085>
30. 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. <https://doi.org/10.4236/jmp.2018.92012>
31. K. Joardar, R.C. Dondero and D.K.Schroda (1989). Critical Analysis of the Small-Signal Voltage-Decay Technique for Minority-Carrier Lifetime Measurement in Solar Cells. Solid State Electronics,, 32, 479-483. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(89\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0038-1101(89)90030-0)
32. T.W. Jung, F.A. Lindholm and A.Neugroschel, Unifying View of Transient Responses for Determining Lifetime and Surface Recombination Velocity in Silicon Diodes and Back-Surface-Field Solar Cells, with Application to Experimental short-Circuit-Current decay. IEEE Transactions on Electron Devices,1984, 31, 588-595. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1984.21573>
33. A. Zondervan, L.A. Verhoef and F.A.Lindholm, Measurement Circuits for Silicon-Diode and Solar Cells Lifetime and Surface Recombination Velocity by Electrical Short-Circuit Current Delay. IEEE Transactions on Electron Devices, 35, 85-88.<https://doi.org/10.1109/16.2419>
34. N.ElHadji, G. Sahin, M. Dieng, A. Thiam, H. Ly Diallo, M. Ndiaye and G.Sissoko, Study of the Intrinsic Recombination Velocity at the Junction of Silicon Solar Cell under Frequency Modulation and Radiation. Journal of Applied Mathematics and Physics,2015, 3, 1522-1535. <https://doi.org/10.4236/jamp.2015.311177>
35. A Dieng, I Zerbo, M Wade, A S Maiga And G Sissoko(2011). Three-dimensional study of a polycrystalline silicon solar cell: the influence of the applied magnetic field on the electrical parameters. Semicond. Sci. Technol. 26, 095023 (9pp)
36. Muzeyyen Saritas and Harry D. Mckell. Comparison of minority carrier diffusion length measurements in silicon by the photoconductive decay and surface photovoltage methods. J. Appl. Phys.1988, 63 (9) pp. 4561-67.
37. Xing, Y., Han, P., Wang, S., Liang P., Lou, S., Zhang, Y., Hu, S., Zhu, H., Mi, Y. and Zhao, C. (2013) Analysis of Effects of Front and Back Surface of One Vertical Silicon Dopants Multi-Junction Solar Cell by 2D Numerical Simulation. Science China Technological Sciences, 56, 2798-2807.

38. 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/>
39. M. Bashahu and A. Habyarimana (1995). Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance. Renewable Energy, 6, 2, pp. 127-138, [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)E0021-V](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)E0021-V)
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. M. M. Dione, H. Ly Diallo, M. Wade, I. Ly, M. Thiame, F. Toure, A. GueyeCamara, N. Dieme, Z. NouhouBako, S. Mbodji, F. I. Barro, G. Sissoko (2011). Determination of the shunt and series resistance of a vertical multijunction solar cell under constant multispectral light. Proceedings of 26<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp 250-254; <http://www.eupvsec-proceedings.com> (40)
42. D. Chenvidhya, K. Kirtikara, C. Jivacate (2003). A new characterization method for solar cell dynamic impedance. Volume 80, Issue 4, Déc. 2003, Pages 459-464. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2003.06.011>
43. 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>
44. S. Mbodji, I. Ly, H. L. Diallo, M.M. Dione, O. Diasse 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), pp. 1 -7.
45. F. I. Barro, S. Gaye, M. Deme, H. L. Diallo, M. L. Samb, A. M. Samoura, S. Mbodji And G. Sissoko (2008). Influence of grain size and grain boundary recombination velocity on the series and shunt resistances of a polycrystalline silicon solar cell », Proceedings of the 23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 612-615
46. S. Mbodji, B. Mbow, M. Dieng, F. I. Barro and G. Sissoko (2010). 3D modelling of polycrystalline silicon bifacial solar cell determination of thickness and diffusion capacitance of emitter base junction. AMSE Journal-Modeling, Measurement and Control- Series A- General Physics and Electrical Application, Volume 83, Issue 2, pp 47-62. <http://www.amse-modeling.com>
47. Mbodji, S., Dieng, M., Mbow, B., Barro, F.I. and Sissoko, G. (2010) Three Dimensional Simulated Modelling of Diffusion Capacitance of Polycrystalline Bifacial Silicon Solar Cell. Journal of Applied Sciences and Technology, 15, 109-114.
48. Mbodji, S., Mbow, B., Barro, F.I. and Sissoko, G. (2010) A 3D Model for Thickness and Diffusion Capacitance of Emitter-Base Junction in a Bifacial Polycrystalline Solar Cell. Global Journal of Pure and Applied Sciences, 16, 469-477.
49. Balde, F., Diallo, H.L., Ba, H.Y., Traore, Y., Diatta, I., Diouf, M.S., Wade, M. and Sissoko, G (2018). External Electric Field as Applied to Determine Silicon Solar Cell Space Charge Region Width. Journal of Scientific and Engineering Research, 5, 252- 259. <https://jsaer.com/>
50. Mint Sidihanena Selma, YoussouTraore, IbrahimaDiatta, Marcel SitorDiouf, Mamadou Wade, LemrabottOuldHabiboullahandGrégoireSissoko(2018). Diffusion capacitance in a silicon solar cell under frequency modulated illumination: Magnetic field and temperature effects. Journal of Scientific and Engineering Research, 5(7), 317-324.
51. Diatta, I., Ly, I., Wade, M., Diouf, M.S., Mbodji, S. and Sissoko, G. (2016) Temperature Effect on Capacitance of a Silicon Solar Cell under Constant White Biased Light. World Journal of Condensed Matter Physics, 6, 261-268. Diatta, I., Diagne, I., Sarr, C., Faye, K., Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2015) Silicon Solar Cell Capacitance: Influence of Both Temperature and Wavelength. International Journal of Computer Science, 3, 1-8.
52. Sahin, G., Dieng, M., Moujtaba, M.A.O.E., Ngom M.I., Thiam, A. and Sissoko, G. (2015) Capacitance of Vertical Parallel Junction Silicon Solar Cell under Mono- chromatic Modulated Illumination. Journal of Applied Mathematics and Physics, 3, 1536-1543.
53. B. R. Chawla and H. K. Gummel, (1970). Transition region capacitance of diffused p-n junctions IEEE Transactions On Electron Devices, vol. ED-17, pp. 178-195.
54. M. Dieng, B. Seibou, I. Ly, M. SitorDiouf, M. Wade and G. Sissoko (2017). Silicon Solar Cell Emitter Extended Space Charge Region Determination under Modulated Monochromatic Illumination by using Gauss's Law. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, , 6, 17-20.
55. G.Sissoko, B. Dieng, A. Corréa, M. Adj and D.Azilinin. Silicon (2004). Solar Cell Space Charge Region Width Determination by a Study in Modeling. Renewable Energy, 3, pp. 1852-1855.

56. Ray, U.C. and Agarwal, S.K. (1988). Wavelength Dependence of Short-Circuit Current Decay in Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, 63, 547-549. <https://doi.org/10.1063/1.340084>
57. K.Rajkanan, R. Singh and J. Schewchun. Absorption coefficient of silicon for solar cell calculations. *Solid-State Electronics*, 1979, 22, 793-795. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(79\)90128-X](https://doi.org/10.1016/0038-1101(79)90128-X)
58. 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>
59. A. Mandelis. Coupled Ac Photocurrent and Photothermal Reflectance Response Theory of Semiconducting p-n Junctions. I. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66, 5572-5583. <https://doi.org/10.1063/1.343662>
60. YoussouTraore, NdeyeThiam, MoustaphaThiame, AmaryThiam, MamadouLamine Ba, Marcel SitorDiouf, IbrahimaDiatta, OulymataMballo, El Hadji Sow, Mamadou Wade, GrégoireSissoko, (2019). AC Recombination Velocity in the Back Surface of a Lamella Silicon Solar Cell under Temperature. *Journal of Modern Physics*, 10, 1235-1246
61. C.H.Wang and A. Neugroschel. Minority-Carrier Lifetime and Surface Recombination Velocity Measurement by Frequency-Domain Photoluminescence. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1991, 38, 2169-2180. <https://doi.org/10.1109/16.83745>
62. B. Luc, M. Shahriar, H. Dean, S. Marco, A. Manuela, and N.Claudio, Investigation of Carrier Transport through Silicon Wafers by Photocurrent Measurement. *Journal of Applied Physics*, 1994, 75, 4000-4008. <https://doi.org/10.1063/1.356022>
63. M.Kunst and A. Sanders. Transport of Excess Carriers in Silicon Wafers. *Semiconductor Science and Technology*, 1992, 7, 51-59. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/7/1/009>
64. I.Ly, I. Zerbo, M. Wade, M. Ndiaye, A. Dieng, A. Diao, N. Thiam, A. Thiam, M.M. Dione, F.I. Barro, A.S. Maiga and G.Sissoko, Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation and Monochromatic Illumination: Recombination Velocities and Associated Equivalent Electrical Circuits. *Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 5-9 September 2011*, 298-301.
65. I. Zerbo, F.I. Barro, B. Mbow, A. Diao, S. Madougou, F.Zougmore and G. Sissoko, Theoretical Study of Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulate white Light: Determination of Recombination Parameters. *Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 7-11 June 2004*, 258-261
66. Thiam, A. Diao, M. Ndiaye, A. Dieng, A.Thiam, M. Sarr, A.S. Maiga and G.Sissoko, 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*, 2012, 4, 4646-4655.
67. NoriakiHonma, ChusukeMunakata and Hirofimi Shimizu (1988). Calibration of minority carrier lifetimes measured with an ac photovoltaic method. *Japanese journal of applied physics*, 27, 7 1322-1326.