

## Etude analytique d'une cellule solaire à hétérojonction $p^+$ (GaAs)/n (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As)/N (Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As)

H. Ben Slimane et A. Helmaoui

Laboratoire de Physique des Dispositifs à Semi-conducteurs  
Centre Universitaire de Béchar, B.P. 417, Béchar, Algérie

(reçu le 30 Mars 2008 – accepté le 30 Juin 2008)

**Résumé** – Afin de réduire les pertes par recombinaison dans la zone de charge d'espace pour les cellules GaAs, nous proposons une structure  $p^+$  (GaAs)/ n (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As)/ N (Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As) avec une interface à bande interdite graduelle entre l'émetteur  $p^+$  (GaAs) et la base N (Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As). Le courant de recombinaison dans une telle cellule est discuté, ainsi que l'influence de ce courant sur les caractéristiques photovoltaïques. L'épaisseur de la couche à bande interdite graduelle n (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As) a été étudié, il est de l'ordre de 800 à 900 Å.

**Abstract** – Because the losses of carrier recombination in the space region reduces the efficiency of a similar GaAs cell, and the conduction band discontinuity or spike in an abrupt heterojunction  $p^+$  (GaAs) / N(Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As) solar cell can hinder the separation of hole-electron by electric field, a graded layer inserted between the emitter  $p^+$  (GaAs) to base N (Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As) is used to eliminate the spike and reduces recombination in space charge region. This paper describes the role of the graded band gap layer between the emitter and base in decreasing the performance of the heterojunction cell. The structure  $p^+$  (GaAs)/ n (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As)/ N (Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As) with band gap gradient in space charge region has been studied. The recombination current is more discussed, the graded region width required to eliminate the spike and reduce the recombination in space charge region is on the order of 800 to 900 Å.

**Mots clés:** AlGaAs – Recombinaison – Cellule solaire à hétérojonction – hétérojonction graduelle.

### 1. INTRODUCTION

Durant les dernières années, les cellules solaires à base des matériaux III-V ont été largement utilisées, plus particulièrement aux applications spatiales, et ce à cause de leur rendement élevé et leur faible dégradation face aux irradiations dans l'espace [1].

Cependant, un problème important s'opposait au développement des piles solaires au AsGa, à savoir, celui de la vitesse de recombinaison en surface. C'est la raison pour laquelle le rendement réalisé pour les premières cellules solaires était seulement de l'ordre de 10 % [2].

Dans les cellules solaires à hétérojonction, à émetteur à bande interdite graduelle, le champ électrique créé par le gradient de bande interdite permet de réduire le processus de la recombinaison superficielle et dans un volume proche. Le courant fourni à la charge est la différence entre le photocourant et le courant d'obscurité. La minimisation de ce courant est souhaitable pour l'amélioration des performances des cellules. Le courant d'obscurité est déterminé par la combinaison des effets des mécanismes de transport des courants (injection, recombinaison).

Dans cet ordre d'idées, nous nous sommes proposés de traiter des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction,  $p^+$ (GaAs)/n(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As)/N(Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As).

### 2. ASPECT THEORIQUE

Le courant débité par la cellule solaire est le photocourant diminué du courant direct.

$$J = J_{ph} - J_d \quad (1)$$

Avec

$$J_d = J_s \left( e^{qV/kT} - 1 \right) + J_R \quad (2)$$

où:  $q$ ,  $V$ ,  $k$ ,  $T$  et  $J_s$  sont respectivement la charge de l'électron, la tension de polarisation, la constante de Boltzman, la température et le courant de saturation.  $J_R$  est le courant de recombinaison de la zone de charge d'espace.

Dans ce travail, on cherche à diminuer le terme  $J_R$ . On est donc amené à l'utilisation de  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  comme une base de la cellule à hétérojonction  $\text{p}^+(\text{GaAs})/\text{N}(\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As})$ . Cette structure permet de localiser la zone de charge d'espace dans un semi-conducteur à large bande interdite, ce qui diminue le courant de recombinaison  $J_R$  (Fig. 1).

Dans ce type d'hétérojonction, il apparaît aux niveaux de la jonction un pic (barrière de potentiel) qui influe sur la séparation des porteurs de charges excédentaires [3]

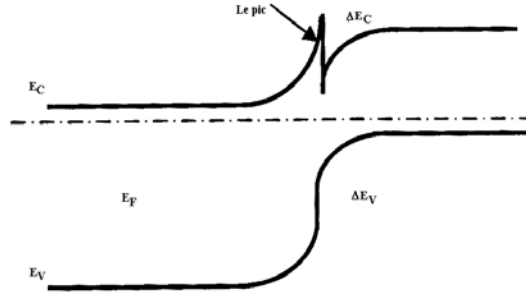


Fig. 1: Représentation de l'hétérojonction ( $\text{N-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As} / \text{p-GaAs}$ )

Pour éliminer ce pic, il faut que la transition entre l'émetteur et la base de l'hétérojonction se fasse d'une manière progressive, (Fig. 2), [4].

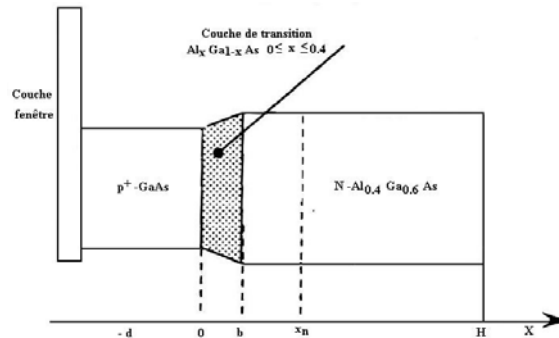


Fig. 2: Diagramme énergétique de la cellule ( $\text{p}^+\text{GaAs}/\text{nAl}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{NAl}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ )

$x_n$  : Largeur de la zone de charge d'espace du côté semi-conducteur de type

$b$  : Largeur de la couche de transition

La recombinaison dans la zone de charge d'espace est conditionnée par la présence d'un point ( $x_R$ ) pour lequel la concentration des électrons est égale à celle des trous. La position de ce point dépend de l'asymétrie de dopage et de la polarisation directe  $V$  [5].

La zone de charge d'espace de l'hétérojonction ( $\text{p}^+\text{GaAs} / \text{nAl}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / \text{NAl}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ ) se trouve localisée dans le semi-conducteur le moins dopé (Fig. 2), c'est-à-dire dans la région ( $\text{nAl}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{NAl}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ ).

Cela implique que le point de recombinaison maximale dans la région de type N ou dans la couche de transition à bande interdite graduelle.

La position de  $x_R$  est donnée par [6, 7]:

1 – pour  $0 < x_R < b$  ( $b$  : épaisseur de la couche de transition)

$$x_R = \frac{2 \xi_0}{\xi_C + \xi_S} \times \left( \frac{A-1}{A} \frac{x_n}{4} + \frac{1}{2\xi_0} \cdot \left( \frac{kT}{q} \ln A - \frac{\Delta E_C}{q} \right) \right) \quad (3)$$

2 – pour  $x_R > b$

$$x_R = \frac{A-1}{A} \frac{x_n}{4} + \frac{1}{2\xi_0} \cdot \left( \frac{kT}{q} \ln A - \frac{\Delta E_C}{q} \right) \quad (4)$$

$$A = \frac{N_a}{N_d} \quad \text{Coefficient d'asymétrie de dopage}$$

$$N_a, N_d \quad \text{Concentrations de dopage}$$

$$x_n = \frac{2(V_d - V)}{\xi_0} \frac{A}{A+1} \quad \text{Epaisseur de la zone de charge d'espace}$$

$$V_d \text{ est le potentiel de diffusion et } \xi_0 = \sqrt{\frac{2q N_d \cdot (V_d - V) \cdot A}{\epsilon(A+1)}} \text{ le champ électrique à}$$

l'interface métallurgique.

$$\epsilon \quad \text{Constante diélectrique des deux semi-conducteurs GaAs et Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As.}$$

$$\xi_C = \xi_0 - \frac{\Delta E_C}{qb} \quad \xi_V = \xi_0 - \frac{\Delta E_V}{qb}$$

On constate que pour ( $x_R = b$ ), les conditions (3) et (4) coïncident et donnent l'expression:  
 $b = b_V(A)$ .

$$\begin{cases} b_V(A) = \frac{A-1}{A} \frac{x_n}{4} - \frac{L_E}{2} \cdot \left( \frac{\Delta E_V}{kT} - 1 \right) \\ L_E = \frac{kT}{q \xi_0} \end{cases} \quad (5)$$

Le courant  $J_R$  prend deux formes selon la position du point  $x_R$  dans la zone de charge d'espace.

Si:  $x_R \in [b, x_n]$  alors

$$\begin{cases} J_R = \frac{\pi}{2} \frac{q n_{in}}{\tau} L_E \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \\ L_E = \frac{kT}{q \xi_0} \end{cases} \quad \text{(Courant de Shockley-Noyce-Sah [5])} \quad (6)$$

Si:  $x_R \in [0, b]$   $J_R$  est donné par [6]

$$J_R = \frac{\pi}{2} \frac{kT}{\tau \xi_V} n_{ip} f \left( 1 - \exp\left(-\frac{q \xi_C}{kT} x_R\right) \right) \exp\left(\frac{qV}{\beta kT}\right) \quad (7)$$

avec

$$f = \frac{2}{1 + \gamma} \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)} \left[ \frac{n_{ip}}{N_a} \exp\left(\frac{q V_d}{k T (A + 1)}\right) \right]^{-\theta} \quad (8)$$

où:

$$\gamma = \frac{\xi_C}{\xi_V}; \quad \theta = \frac{\alpha_V - \alpha_C}{\alpha_V + \alpha_C}; \quad \alpha_C = \frac{q \xi_C}{k T}; \quad \alpha_V = \frac{q \xi_V}{k T}; \quad \beta = \frac{A + 1}{A + \gamma} (1 + \gamma)$$

La figure 3 représente la courbe  $b_V(A)$ . L'espace hachuré représente le domaine de validité de l'expression de Shockley-Noyce-Sah où le point  $x_R$  se trouve dans la région à large bande interdite de la zone de charge d'espace.

A titre d'exemple, si l'épaisseur  $b = b_c$ , (Fig. 3), alors le point  $x_R$  se trouve dans le semi-conducteur à large bande interdite pour des tensions  $V < V_C$ .

Si la tension  $V$  dépasse la valeur  $V_C$ , le point de recombinaison maximale  $x_R$  va se déplacer vers la région de transition et le courant  $J_R$  sera donné par la formule (7). La condition pour que le pic soit complètement éliminé est donné par (6):  $b > b_{ml}$ , (avec  $b_{ml} = \frac{\Delta E_C}{b}$ ).

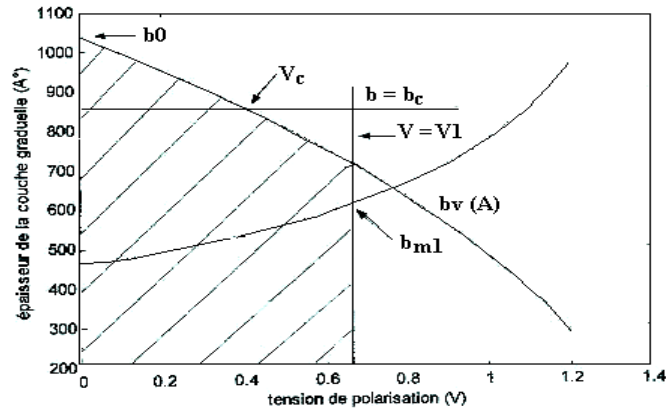


Fig. 3: Domaine de validité de l'expression de Shockley-Noyce-Sah

La figure 4 montre les caractéristiques (courant – tension) à l'obscurité de l'hétérojonction  $p^+$  (GaAs) /  $n$   $Al_xGa_{1-x}As/N$  ( $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ ) pour  $A = 100$ ,  $\Delta E_g = 0.5eV$  et pour différentes valeurs de l'épaisseur  $b$ .

Les courbes 1 et 2 représentent respectivement la densité du courant direct de l'homo jonction GaAs et de l'hétérojonction ( $p^+$  GaAs /  $N$  ( $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ )). Dans les deux cas, le courant direct est calculé par Sah-Noyce, [5]. Il est à noter que le courant direct de l'hétérojonction est moindre que le courant direct de l'homo jonction GaAs.

La courbe 3 décrit la densité de courant d'injection (courant de recombinaison négligé). Les lignes continues de (4) à (7) représentent les caractéristiques (courant – tension) des structures  $p^+$  (GaAs) /  $n$  ( $Al_xGa_{1-x}As$ ) /  $N$  ( $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ ) pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche de transition qui diminue de la courbe (4) à la courbe (7).

On remarque que le courant direct décroît avec la décroissance de l'épaisseur de la couche de transition. Une partie de la courbe (7) coïncide avec la courbe (2), ce qui montre que dans les faibles tensions, le courant direct est minimal, il est donné par la formule de Shockley-Noyce-Sah. C'est le cas où,  $b = b_c$  de la figure 3).

Pour des tensions peu élevées ( $V_C < V < V_1$ , Fig. 3), le courant direct est donné par la relation (7). Si la tension  $V$  dépasse la valeur  $V_1$ , le courant direct prend l'allure du courant d'injection.

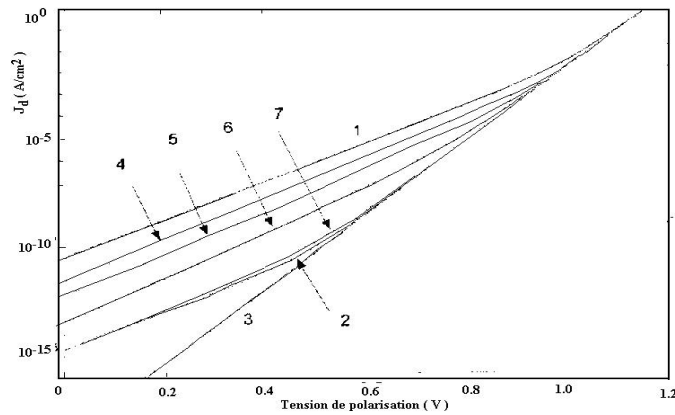


Fig. 4: Caractéristique courant – tension à l'obscurité de la cellule  $p^+(GaAs)/n(Al_xGa_{1-x}As)/N(Al_{0.4}Ga_{0.6}As)$

### 3. CELLULE SOLAIRE A HETEROJONCTION $p^+(GaAs)/n(Al_xGa_{1-x}As)/N(Al_{0.4}Ga_{0.6}As)$

Le diagramme énergétique de la cellule est représenté sur la figure (2).

- A la surface éclairée de l'hétérojonction, on dépose une couche fenêtre de type p, cette couche est très étroite d'une manière qu'on peut négliger son absorption de la lumière, donc contribution au photo courant.
- Entre les deux semi-conducteurs GaAs et  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$  à bandes interdites 1.42 eV et 1.92 eV respectivement, on a une couche de transition à bande interdite variable, cette couche est de type n, elle est localisée dans la zone de charge d'espace.
- Vitesse de recombinaison à l'interface entre la fenêtre et la couche  $p^+(GaAs)$  nulle.
- Puisque l'AsGa absorbe la quasi-totalité des photons incidents sur 2 à 3  $\mu m$  d'épaisseur [1] et si on prend une épaisseur de l'AsGa ( $d > 3 \mu m$ ), alors la lumière ne peut atteindre que la zone (absorbante)  $[d, -x_p]$ , [4].
- Dans le but de diminuer la résistance série, on va réduire l'épaisseur de la zone arrière  $[x_n, H]$ .

Finalement, le courant dans la région  $[-d, -x_p]$  est un courant de diffusion.

La densité de courant total dans la cellule aux points  $x = -x_p$ , s'écrit:

$$J_T = \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \tanh\left(\frac{d-x_p}{L_n}\right) \left( \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) - \frac{q\gamma(\lambda)(1-R(\lambda))\alpha^2(\lambda)}{\alpha^2(\lambda)-1/L_n^2} \times \left\{ \left( \frac{1}{\cosh\left(\frac{d-x_p}{L_n}\right)} \right) - \exp(-\alpha(d-x_p)) \cdot \left( \frac{\tanh\left(\frac{d-x_p}{L_n}\right)}{\alpha(\lambda)L_n} + 1 \right) \right\} \quad (9)$$

$W \approx x_n$  et  $x_p \approx 0$ , donc on peut simplifier l'expression du courant total comme:

$$J = J_{ph} - J_S \left( e^{eV/kT} - 1 \right) \quad (10)$$

$$J_S = \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \tanh\left(\frac{d}{L_n}\right)$$

$$J_{ph} = \frac{q\gamma(\lambda)F_0(\lambda)(1-R(\lambda))\alpha^2(\lambda)}{\alpha^2(\lambda)-1/L_n^2} \times \left\{ \left( \frac{1}{\cosh\left(\frac{d}{L_n}\right)} \right) - \exp(-\alpha(d)) \cdot \left( \frac{\tanh\left(\frac{d}{L_n}\right)}{\alpha(\lambda)L_n} + 1 \right) \right\} \quad (11)$$

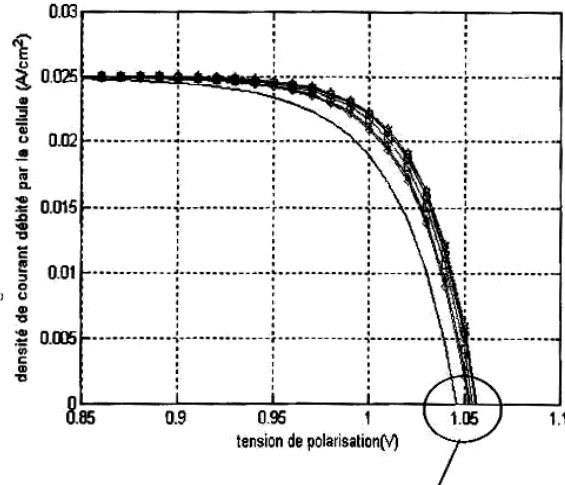
Certains porteurs de charges se recombinent en traversant la zone de charge d'espace. La densité de courant de recombinaison s'ajoute à la densité de courant  $J_T$ .

La figure 5 représente la caractéristique courant – tension de la cellule solaire à la base de l'hétérojonction  $p^+(\text{GaAs})/N(\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As})$  à interface graduelle.

La courbe 1 représente la caractéristique courant – tension d'une cellule à homojonction à base d'AsGa, où la zone de charge d'espace à une largeur de bande interdite constante, le courant direct de cette homojonction est calculé par le modèle de Shockley-Noyce-Sah, [5].

La courbe 2 représente la caractéristique courant – tension de la cellule solaire à base d'hétérojonction  $p^+(\text{GaAs})/N(\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As})$  où, on néglige le courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace.

Les courbes 3 à 6 montrent que le courant total débité par la cellule ( $p^+\text{GaAs}/n\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/N\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ ) croît avec la décroissance de l'épaisseur  $b$ .



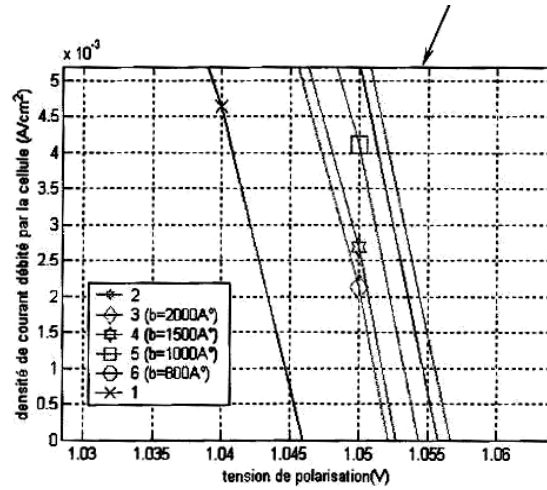


Fig. 5: Caractéristique courant – tension de la cellule  $p^+(\text{GaAs})/n(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})/N(\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As})$

La figure 6 montre la variation du rendement de conversion photovoltaïque avec l'épaisseur  $b$ . Cette augmentation est due essentiellement à ce que le courant direct a diminué.

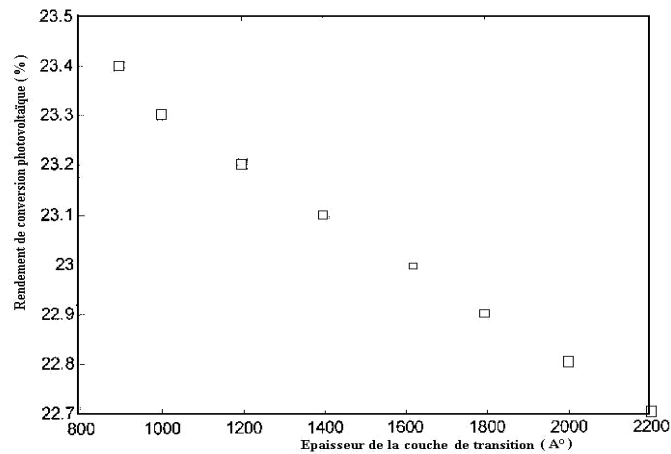


Fig. 6: Rendement de conversion photovoltaïque de la cellule  $p^+(\text{GaAs})/n(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})/N(\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As})$

#### 4. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons montré que nous pouvons diminuer le courant de recombinaison par l'utilisation des cellules à hétérojonctions à bande interdite variable dans la zone de charge d'espace.

Nous avons vu que la couche de transition graduelle permet d'éliminer le 'pic' qui apparaît au niveau de la jonction entre les deux semi-conducteurs de nature différente. Cette barrière influe sur la séparation des porteurs, qui est nécessaire pour le fonctionnement de la cellule.

L'étude de la recombinaison dans une zone de charge d'espace, comportant une couche de transition à bande interdite variable et une région à bande interdite large montre que le courant de

recombinaison diminue avec la diminution de l'épaisseur de la couche de transition. Cette diminution ne doit pas dépasser une valeur minimale à laquelle le pic est toujours éliminé.

### REFERENCES

- [1] M. Orgeret, '*Les piles Solaires, le Composant et ses Applications*', Edition Masson, 1985.
- [2] H.J. Hovel and J.M. Woodall, '*Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As - GaAs p-p-n Heterojunction Solar Cell*', Journal of Electrochemical Society, Vol. 120, p. 1246, 1973.
- [3] A.L. Fahrenbruch and R.H. Bube, '*Fundamentals of Solar Cells*', Photovoltaic Solar Energy Conversion, Academic Press, 1983.
- [4] D.T. Cheung, S.Y. Chiang and G.L. Pearson, '*A Simplified Model for Graded-Gap Heterojunctions*', Solid State Electronics, Vol. 18, pp. 263 - 266, 1975.
- [5] Chih-Tang Sah, Robert N. Noyce and W. Shockley, '*Carrier Generation and Recombination in p-n Junctions and p-n Junction Characteristics*', IRE 45, pp. 1228 - 1243, September 1957.
- [6] O.V. Konstantinov and O.A. Mezrin, '*Recombination in deep levels in the p-n Heterojunction*', Vol. 19, N°7, p. 796, 1986.
- [7] O.V. Konstantinov, O.A. Mezrin, B.V. Egorov, V.M. Lantratov and S.I. Troshkov, '*Theory of a Solar Cell with a Band-gap Gradient in the Space Charge Region of p-n Heterojunction*', Sov. Phys. Semicond., Vol. 20, N°7, p. 796, 1986.