

## Modélisation d'un système dichroïque couplé en série

Ben Slimane Hassane\*, Benmoussa Dennai et Abderrachid Hemlaoui

Laboratoire de Physique des Dispositifs à Semiconducteur,  
Département de Physique, Université de Béchar, Algérie

(reçu le 16 Septembre 2010 – accepté le 27 Décembre 2011)

**Résumé** - Ce travail présente un modèle de simulation pour prédire la performance d'un système multi spectral, dit système dichroïque fonctionnant dans les conditions terrestres. Nous avons utilisé le modèle à une diode pour simuler le fonctionnement de ce type des cellules tandem. L'étude du système AlGaAs/Si a montré qu'en négligeant les facteurs limitatifs un rendement avoisinant 34 % peut être obtenu. Nous avons étudié l'influence des facteurs limitatifs (irradiation, température, résistance série et résistance parallèle) sur le rendement photovoltaïque.

**Abstract** – This work presents a simulation model to predict the performance of a multispectral system called dichroic operating in terrestrial conditions. We used the model for a diode to simulate the operation of this type of tandem cells. The study of the system AlGaAs / Si has shown that neglecting the factors limiting, a yield of around 34 % can be obtained. We studied the influence of limiting factors (radiation, temperature, serie resistance and parallel resistance) on the photovoltaic efficiency.

**Mots clés:** Cellule solaire tandem - Mode dichroïque - Division du spectre.

### 1. INTRODUCTION

Dans la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, on peut diminuer les pertes par excès d'énergie et par non-absorption des photons en associant plusieurs photopiles (cellules solaires tandem) de matériaux différents comme l'ont montré différents auteurs [1-5].

Une des configurations, dite 'dichroïque', le spectre solaire incident est fractionné au moyen d'un système optique séparateur à miroirs dichroïques en plusieurs portions correspondant à des sous bandes du spectre.

Chacune de ces portions est envoyée sur une cellule solaire de type différent, optimisée pour une énergie de photon donnée (Fig. 1).

Le choix des matériaux pour la réalisation d'une structure dichroïque est guidé par les propriétés optiques et électriques des deux matériaux, en particulier par les valeurs de leur bande interdite [6].

Les deux cellules sont associées optiquement et électriquement. Dans ce cas, où les deux cellules sont mises en série électrique, le courant traversant le dispositif est imposé par la cellule qui en fournit le moins.

La tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  est la somme des tensions en circuit ouvert de chaque cellule.

---

\* [hassane\\_ben@yahoo.fr](mailto:hassane_ben@yahoo.fr)

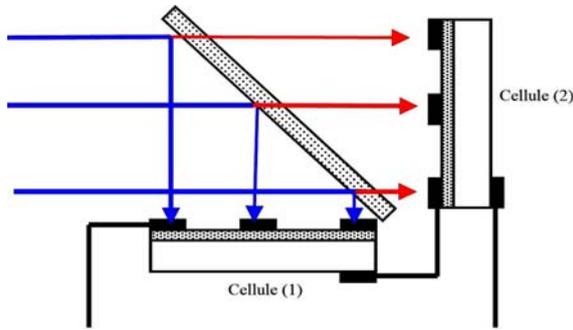


Fig. 1: Schéma du couplage électrique en série des deux cellules

## 2. MODELE MATHEMATIQUE

### 2.1 Caractéristique électrique d'une cellule solaire

Le schéma électrique d'une cellule solaire est représentée sur la figure 2.

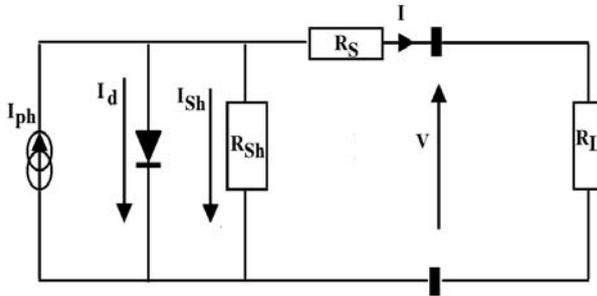


Fig. 2: Schéma équivalent d'une cellule solaire [5]

L'équation caractéristique d'une telle cellule est de la forme [3]:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{1}$$

Avec

$$I_d = I_0 \times \left( \exp \left[ \frac{q}{A.k.T} \times (V + I \times R_s) \right] - 1 \right)$$

$$I_{sh} = \frac{V + I \times R_s}{R_{sh}}$$

$I_{ph}$  représente le photo courant;  $I_d$  le courant direct;  $I_0$  le courant de saturation.  $R_s$  et  $R_{sh}$  sont respectivement la résistance série et la résistance shunt.  $A$  représente le facteur d'idéalité;  $q$  la charge électronique,  $k$  la constante de Boltzman et  $T$  la température.

Le courant de saturation peut s'exprimer en fonction de la température, selon l'expression suivante:

$$I_0 = K_e^{-E_g/k.T} \tag{2}$$

où

$$K_e = q \times N_c \times N_v \times \left[ \frac{1}{N_A} \times \left( \frac{D_n}{\tau_n} \right)^{1/2} + \frac{1}{N_D} \times \left( \frac{D_p}{\tau_p} \right)^{1/2} \right]$$

### 2.2 Photo courant

Dans le mode dichroïque, le spectre solaire est découpé par des miroirs, (on suppose dans ce travail, que les miroirs sont parfaits). Chaque miroir envoie une partie du spectre solaire sur la cellule correspondante.

En prenant d'une part, le rendement quantique de l'absorption et d'autre part, le rendement de collecte,  $Q$ , des porteurs minoritaires de la jonction p-n, tous deux égaux à 1, on obtient aisément une table de base [8, 9] donnant le photo courant calculé à partir du nombre de photons  $N_{ph}$  et du gap  $E_g$  du semi-conducteur.

Pour la cellule (1)

$$I_{ph} = Q \times q \times \int_{E_{g1}}^{E_{g2}} N_{ph} \times (E_{ph}) \times dE_{ph} \tag{3}$$

Pour la cellule (2)

$$I_{ph} = Q \times q \times \int_{E_{g2}}^{\infty} N_{ph} \times (E_{ph}) \times dE_{ph} \tag{4}$$

### 2.3 Caractéristique photovoltaïque

La puissance fournie au circuit extérieur par la cellule solaire sous éclairement dépend de la résistance de charge  $R_L$  (résistance externe placée aux bornes de la cellule).

Cette puissance est maximale,  $P_{max}$ , pour un point de fonctionnement  $P_m$  ( $I_m, V_m$ ) de la courbe courant- tension.

Pour ce point, on peut écrire:

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{V=V_m} = \left. \frac{d(I \times V)}{dV} \right|_{V=V_m} = \left. \frac{d \left[ \left( I_{ph} - I_0 \left( \exp \left[ \frac{q}{A.k.T} (V + I.R_s) \right] - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_{Sh}} \right) \times V \right]}{dV} \right|_{V=V_m} = 0 \tag{5}$$

Cette équation permet d'exprimer la tension  $V_m$

$$\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 = \exp\left[\frac{q}{A.k.T} \times (V_m + I \times R_s)\right] \times \left[\frac{q}{A.k.T} \times V_m + 1\right] \quad (6)$$

Le courant  $I_m$  sera donc exprimé par la relation  $I_m(V_m)$  {eq.(1)}.

Les valeurs respectives déterminent les performances de la cellule réelle.

i- Pour  $V = V_{oc}$  et  $I = 0$  ( $V_{oc}$  : tension à circuit ouvert)

$$0 = I_{ph} - I_0 \times \left( \exp\left[\frac{q}{A.k.T} \times (V_0)\right] - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (7)$$

ii- Pour  $I = I_{sc}$  et  $V = 0$  ( $I_{sc}$  : courant de court-circuit)

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \times \left( \exp\left[\frac{q}{A.k.T} \times (I_{sc} \times R_s)\right] - 1 \right) - \frac{I_{sc} \times R_s}{R_{sh}} \quad (8)$$

Lorsque les cellules sont liées entre elles par un fil conducteur, il faut alors noter qu'un même courant traverse toutes les cellules et que la tension électrique totale aux bornes du dispositif sera simplement la somme des tensions aux bornes de chaque cellule.

Après avoir déterminé le point de fonctionnement  $I_{mk}$ ,  $V_{mk}$  des cellules indépendantes, nous avons imposé un courant série  $I$  égal au plus petit des courants  $I_{mk}$ , soit  $I = \inf(I_{mk})$ , on obtiendra une tension d'utilisation  $V_{mk}$  et une puissance utile  $P_k = V_{mk} \times \inf(I_{mk})$ .

Le rendement global sera:

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^n P_k}{P_{incident}} \quad (9)$$

### 3. FACTEURS LIMITATIFS DU RENDEMENT

#### 3.1 Influence de la température

La variation du gap du semi-conducteur avec la température peut être décrite approximativement par la fonction universelle suivante [7] :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha \times T^2}{T + \beta} \quad (10)$$

Où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des constantes qui dépendent du semi-conducteur.

#### 3.2 Influence de l'irradiation

A des niveaux d'éclairement usuels, le photo courant est proportionnel à l'irradiation solaire ou au flux lumineux  $G$  ( $W/m^2$ ) [6]

$$I_{ph} = I_{ph0} \times \frac{G}{1000} \quad (11)$$

Où  $I_{ph0}$  est le photo courant pour une irradiation solaire standard de  $1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$ .

## 4. RESULTATS

Les figures 3a- et 3b- donnent respectivement les courbes des caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  de la cellule dichroïque AlGaAs/Si illustrant un accroissement très important des performances en comparaison avec la conversion mono spectrale.

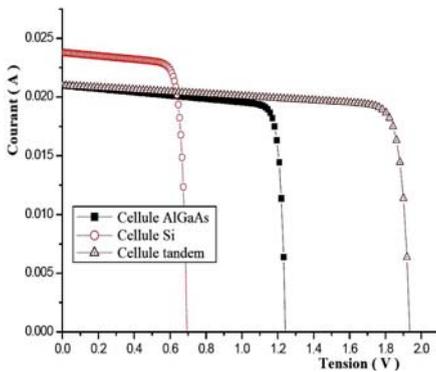


Fig. 3a-: Courbe  $I(V)$  de AlGaAs/Si

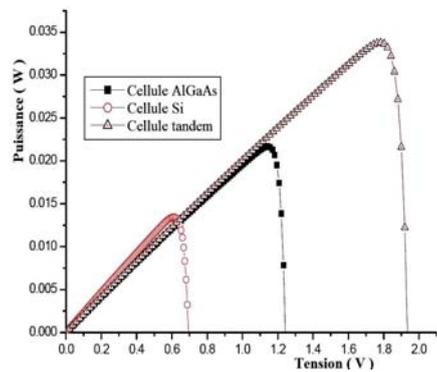


Fig. 3b-: Courbe  $P(V)$  de AlGaAs/Si

### 4.1 Effet de la température

L'influence de la température est très significative, et demandera des choix importants de conception des systèmes.

Malheureusement, la tension d'une cellule cristalline baisse assez fortement avec la température, comme le montre la relation (9). Cet effet est représenté à la figure 4 où l'on voit différentes courbes du système dichroïque (AlGaAs/Si) entre 300 K et 325 K sous un ensoleillement de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

La tension perd environ de  $3 \text{ mV}/^\circ\text{K}$ , ce qui donne un déficit de 82 mV entre 300 K et 325 K.

Sous l'effet d'une hausse de la température, le courant gagne, quant à lui, un petit peu d'intensité. Ceci peut être expliqué par une meilleure absorption de la lumière, le gap baissant lorsque la température augmente. Le courant direct de la jonction augmente aussi, mais beaucoup plus vite et entraînant une diminution de la tension de circuit ouvert qui justifie la diminution de la puissance fournie.

### 4.2 Effet de l'irradiation

La figure 5 présente les caractéristiques  $I(V)$  du système dichroïque AlGaAs/Si, on a tracé la variation du courant par rapport à la tension pour plusieurs intensité de rayonnement solaire.

Dans la partie gauche des caractéristiques, le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairement. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque la lumière baisse.

Dans les deux cellules AlGaAs/Si, la résistance shunt est assez élevée, ce qui permet du système dichroïque de fournir une tension correcte même à petit éclairage.

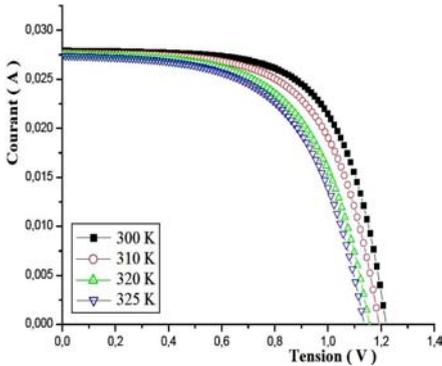


Fig. 4a-: Courbe I(V) de AlGaAs/Si à diverses températures

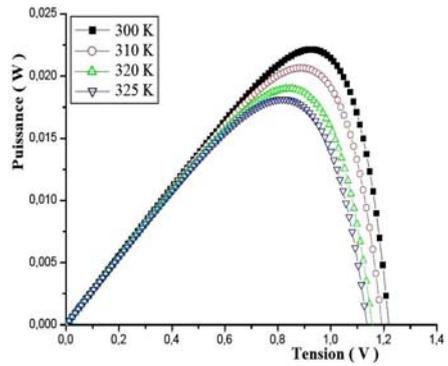


Fig. 4b-: Courbe P(V) de AlGaAs/Si à diverses températures

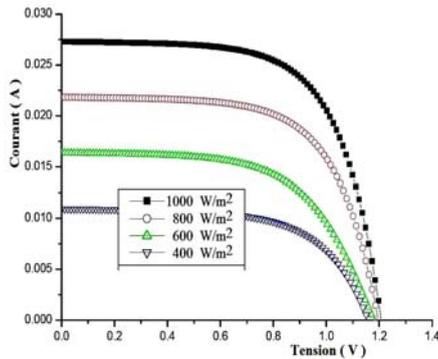


Fig. 5: Courbes I(V) du système AlGaAs/Si sous diverses intensités de rayonnement

### 4.3 Influence de la résistance parallèle (shunt)

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge d'espace.

L'influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I(V) des deux cellules couplées optiquement et électriquement est représentée sur la figure 6.

La résistance parallèle est directement liée au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs du courant (proche du courant de court-circuit).

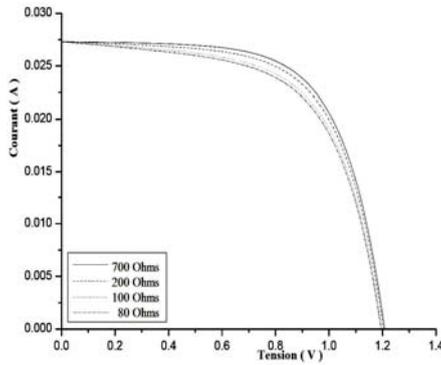


Fig. 6: Courbes I(V) du système AlGaAs/Si avec diverses valeurs de la résistance shunt

#### 4.4 Effet de la résistance série

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collecte et les mauvais contacts ohmiques de la cellule [7].

L'influence de la résistance série sur la caractéristique I(V) des deux cellules à couplage électrique est schématisée sur la figure 7. Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe I(V), dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension, à droite du point de puissance maximum.

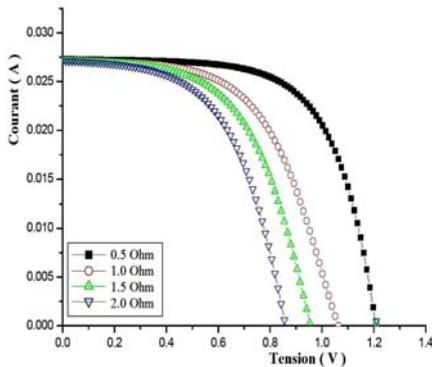


Fig. 7a-: Courbes I(V) du système dichroïque AlGaAs/Si avec diverses valeurs de la résistance série

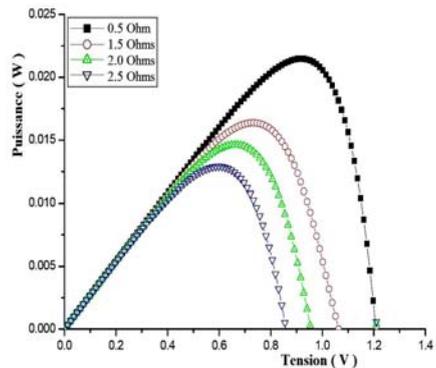


Fig. 7b-: Courbes P(V) du système dichroïque AlGaAs/Si avec diverses valeurs de la résistance série

## 5. CONCLUSION

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plupart des cas, dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Les pertes par

excès d'énergie et par non-absorption des photons ne peuvent diminuer que par l'utilisation des systèmes de plusieurs photopiles.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à exprimer les caractéristiques photovoltaïques de système dichroïque à couplage électrique. Nous avons utilisé le modèle à une diode pour simuler le fonctionnement de ce type des cellules tandem.

L'étude du système AlGaAs/Si a montré, en négligeant les facteurs limitatifs, un rendement avoisinant 34 % peut être obtenu.

Les influences de l'éclairement, de la température, de la résistance parallèle et de la résistance série sur le rendement de cellule solaire en mode dichroïque à couplage électrique sont importantes.

## REFERENCES

- [1] B. Beaumont, G. Nataf, F. Raymond, and C. Verie, '*A Four-Cell Photovoltaic System Based on InP and GaAs*', Proceedings 16<sup>th</sup> IEEE photovoltaic Specialist Conference, pp. 595 - 600, 1982.
- [2] A. Chave and J.R. Leguerre, '*Cellules Photovoltaïques Utilisées en Séparation Spectrale - I. Comparaison des Couplages de Photopiles Solaires du Type Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As-Si et GaAs-Ge Etude sous Concentration*', Revue Phys. Appl., Vol. 18, pp. 569 – 586, 1983.
- [3] J.R. Leguerre and M. Leroy, '*Une Etude Comparative de Dispositifs Photovoltaïques Multiples*', Revue Phys. Appl., Vol. 19, pp. 889 – 903, 1984.
- [4] C. Verie, '*A criterion for Selection of Semiconductors Used in Multispectral High Efficiency Solar Cells*', Proceedings 18<sup>th</sup> IEEE
- [5] M. Orgeret, '*Les Piles Solaires, le Composant et ses Applications*', Edition Masson, 1985.
- [6] T. Zdanowicz, T. Rodziewicz and M. Zabkowsk-Waclawek '*Theoretical Analysis of the Optimum Energy Band Gap of Semiconductors for Fabrication of Solar Cells for Applications in Higher Latitudes Locations*', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 87, N° , pp. 757 – 769, 2005.
- [7] S. Sze, '*Physics of Semiconductor Devices*', John Wiley & Sons, New York, NY, 1981.
- [8] <http://www.nrel.gov/highperformancepv/>
- [9] <http://rredc.nrel.gov/solar/standards/am1.5/>