Classification
Physics Abstracts
73.40L

Cellules photovoltaïques utilisées en séparation spectrale — I. Comparaison des couplages de photopiles solaires du type Ga_{1-x}Al_xAs-Si et GaAs-Ge étude sous concentration

A. Chave (*) et J. R. Leguerre (**)

Laboratoire d'Energie Solaire, Faculté des Sciences, Avenue Ibn Batota, Rabat, Maroc

(Reçu le 17 juin 1982, révisé le 23 mars 1983, accepté le 25 mars 1983)

Résumé. — On étudie les systèmes de photopiles Ga_{1-x}Al_xAs-Si et GaAs-Ge, formés chacun de deux cellules couplées par un miroir dichroïque. La modélisation de chaque système permet de mettre en évidence l'influence des paramètres physiques et technologiques sur les photo-courants et les rendements des cellules. L'étude sous concentration prend en compte l'influence des pertes par résistance série et taux d'ombrage ainsi que l'effet de la température. La minimisation des pertes conduit à dimensionner au mieux le profil de la grille collectrice. On montre qu'avec un spectre AM1 le système Ga_{0,7}Al_{0,3}As-Si permet d'obtenir 30,4 % de rendement avec 750 soleils alors que le couplage GaAs-Ge est maximum à 25,5 % pour 600 de concentration.

Abstract. — We present a study of the photovoltaic behaviour of a set two systems each of which has two solar cells Ga_{1-x}Al_xAs-Si and GaAs-Ge coupled with a dichroic mirror in sunlight. The model of each system shows the influence of physical and technological parameters on the photo-currents and efficiency of the cells. The analysis is performed under concentrated light taking into account the losses due to series resistance, shadowing ratio and temperature effect. The minimization of losses gives the optimum of the grid metallic pattern profile. The Ga_{0,7}Al_{0,3}As-Si system under air-mass one yields a maximum efficiency of 30.4 % with solar concentration of 750, and the GaAs-Ge coupled system yields a maximum efficiency of 25.5 % with solar concentration of 600.

Liste des symboles			
AM1	spectre solaire air masse 1	<i>e</i>	épaisseur du radiateur, cm
<i>α</i>	coefficient d'absorption, cm ⁻¹	<i>e_G</i>	épaisseur de la grille collectrice, cm
<i>c</i>	vitesse de la lumière dans le vide, cm/s	<i>ε₀</i>	constante diélectrique du vide, F/m
<i>CR</i>	concentration solaire, non dimensionnée	<i>ε_r</i>	constante diélectrique relative, n.d.
<i>DH</i>	épaisseur de la couche fenêtre, cm	<i>η</i>	rendement de conversion du système, n.d.
<i>D_n, D_p</i>	constante de diffusion des électrons, trous, cm ² /s	<i>FF</i>	facteur de courbe, n.d.
<i>E</i>	champ électrique interne, V/cm	<i>φ₀</i>	flux solaire incident pour Δλ, photon/cm ² .s
<i>E_c</i>	énergie de coupure du miroir <i>E_c</i> = 1,24/λ _c , eV, λ _c en microns	<i>g(α)</i>	taux de génération des porteurs minoritaires, paire/cm ² .s
<i>E_{cm}</i>	énergie de coupure du miroir au maximum de rendement du système, eV	<i>h</i>	constante de Planck, J.S.
<i>E_g</i>	hauteur de bande interdite pour les transitions directes, eV	<i>I_{li}</i>	radiance associée à Δλ, W/m ² /μm
<i>E_{gi}</i>	hauteur de bande interdite pour les transitions indirectes, eV	<i>I_{ph}</i>	densité de photo-courant, A/cm ²
		<i>I_{max}</i>	courant au point de puissance maximum de la caractéristique I(V), A/cm ²
		<i>J_n, J_p, J_{wt}</i>	densités spectrales de courants, A/cm ²
		<i>k</i>	constante de Boltzmann, J/K
		<i>K_T</i>	conductivité thermique du radiateur W/°C/cm
		<i>κ</i>	coefficient caractéristique des pertes thermiques du radiateur W/cm/°C
		<i>2 L_D</i>	espacement entre les lignes de métallisation de la grille, cm
		<i>L_n, L_p</i>	<i>L_{n,p}</i> = √τ _{n,p} <i>D_{n,p}</i> longueur de diffusion des électrons et des trous, cm

(*) Adresse en France : L.A.I.A.T., Université de Toulon, R.N. 98, 83130 La Garde, France.
(**) Adresse permanente en France : L.A.A.S., 7, avenue du Colonel Roche, 31400 Toulouse, France.

λ	longueur d'onde de la lumière dans le vide, cm
λ_c	longueur d'onde de coupure du miroir, cm
λ_{cm}	longueur d'onde de coupure du miroir, au point de rendement maximum du système, cm
m_n^*, m_p^*	masse effective des électrons et des trous, kg
m_0	masse de l'électron, kg
μ_n, μ_p	mobilité des électrons, trous, $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
N_a, N_d	concentration en accepteurs, donneurs, cm^{-3}
n_i	concentration intrinsèque des porteurs de charge, cm^{-3}
$\Delta n, \Delta p$	concentration en excès d'électrons et de trous, cm^{-3}
P	pente du miroir, unité/ μm
P_{tot}	puissance totale fournie par le spectre solaire, $\text{W}/\text{cm}^2/\text{s}$
q	charge de l'électron (valeur absolue), C
Q_0	énergie incidente sur une cellule, W
RC	coefficient de réflexion de la cellule, n.d.
RF	rayon du radiateur, cm
RM	coefficient de réflexion du miroir, n.d.
RS	résistance série équivalente de la cellule Ω/cm^2
ρ_c	résistance de contact entre la grille et la zone diffusée, Ω/cm^2
ρ_M	résistance carrée de la grille, $\Omega/\square$
ρ_s	résistivité de la zone diffusée, Ω/cm
S_u, S_t	surface utile et totale de la cellule, cm^2
$s_{n,p}$ ou $s_{1,2}$	vitesse de recombinaison en surface des électrons ou des trous, cm/s
$S_{1,2}$	taux d'ombrage approché, n.d.
T	température absolue, K
T_0, T_1	température ambiante et température du radiateur, K
τ_n, τ_p	durée de vie des électrons, trous, s
τ_s	taux d'ombrage, n.d.
U_T	$U_T = kT/q$, potentiel thermodynamique, V
V	tension aux bornes de la cellule, V
V_{co}	tension en circuit ouvert, V
V_{max}	potentiel au point de puissance maximum de la caractéristique $I(V)$
W_B	épaisseur de la zone de base, cm
W_D	largeur de la grille de métallisation, cm
W_T	extension de la zone de charge d'espace, cm
x	fraction de mole d'AlAs dans $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, n.d.
X	épaisseur de la zone diffusée, cm
y	fraction de mole d'AlAs dans $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$, n.d.
Z	longueur de la cellule, cm

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 de matériaux différents comme l'ont montré différents auteurs [1-3].

Dans cette première partie de l'étude les deux cellules associées optiquement sont électriquement indépendantes, dans une deuxième partie on envisagera le cas de deux cellules mises en série électrique.

Le couplage optique des cellules peut se concevoir de deux manières :

Dans un premier cas les cellules sont superposées par ordre décroissant des valeurs des hauteurs de bande interdite E_g , le dispositif ayant la plus grande se trouvant en tête et recevant tout le rayonnement [1]. Pour un spectre solaire donné, et un nombre fini de matériaux il existe des valeurs imposées de E_g donnant un rendement maximum au système [4]; par exemple le couplage optimum pour deux cellules et avec un spectre AM1 serait obtenu pour des valeurs de E_g égales à 1,798 eV et 1,127 eV, valeurs qui correspondent sensiblement à celles du $\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$ et du Si.

Toute combinaison différente de valeurs de E_g présentera un rendement inférieur.

Dans un deuxième cas pour un système de deux cellules, un miroir dichroïque répartit le spectre entre les deux photopiles. Par la définition de sa pente et de sa longueur d'onde de coupure, le miroir permettra une meilleure adaptation du spectre au système de cellules utilisées. On appliquera ce mode de couplage à l'association $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{Si}$ qui sera comparée au couplage GaAsGe . La variation de la concentration molaire x d'AlAs modifie le « gap » de la première cellule. On recherchera donc en fonction de x la hauteur de bande interdite de cette cellule qui sera la mieux adaptée dans le couplage avec le silicium.

Dans le premier couplage, la cellule $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ est du type (P^+ , N); sa face d'entrée est recouverte d'une couche « fenêtre » d'épaisseur DH , et de type P , qui permet de limiter la vitesse de recombinaison des porteurs de charges à la surface de la cellule $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ (Fig. 1). La cellule au silicium est de type (N^+ , P). Pour le deuxième couplage on a un système GaAs (P^+ , N)/ Ge (N^+ , P).

Dans la première partie on expose le modèle d'analyse qui permet de déterminer pour des taux de

Fig. 1. — Schéma des cellules couplées par le miroir.

[Schematic representation of a set two solar cells coupled with a dichroic mirror.]

concentration allant de 1 à 2 000 les évolutions du photo-courant I_{ph} et du rendement du système en fonction de la longueur d'onde de coupure du miroir. Différents résultats sont obtenus lorsque varient la pente P du miroir, la concentration molaire d'AlAs de la cellule $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ et les paramètres technologiques des cellules tels que l'épaisseur de la fenêtre, de la zone diffusée et les vitesses de recombinaison en surface. De plus le modèle permet d'étudier le comportement du système en fonction du taux de concentration solaire en tenant compte des pertes par résistance série et taux d'ombrage, et de l'échauffement de la cellule. Une particularité de notre étude concerne la recherche permanente des dimensions optimales de la grille collectrice lorsque la température des photopiles varie.

Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans la deuxième partie. L'appendice A donne les relations qui permettent de traiter l'influence de x et de la température sur les paramètres physiques de la cellule $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$.

L'appendice B fournit les équations des photocourants et des courants d'obscurité traversant les différentes zones des jonctions des cellules $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ (P^+ , N), Si (N^+ , P), GaAs (P^+ , N) et Ge (N^+ , P). De manière générale, l'indice 1 fait référence à la cellule de « gap » le plus élevé, l'indice 2 à l'autre.

2. 1^{re} partie : modèle d'étude.

2.1 COEFFICIENTS DE RÉFLEXION DU MIROIR ET DE LA CELLULE. — Le spectre solaire incident est divisé en deux zones spectrales par un miroir dichroïque. Chaque partie du spectre est utilisée par une cellule et le comportement du miroir est décrit de la manière suivante (Fig. 2) :

$$\begin{aligned} \text{Si } \lambda < \lambda_M & \quad RM(\lambda) = 1. \\ \text{Si } \lambda \geq \lambda_c & \quad RM(\lambda) = 0. \\ \text{Si } \lambda_M < \lambda < \lambda_c & \quad RM(\lambda) = -P + P_0 \end{aligned} \quad (1)$$

où $P = |\lambda_M(\lambda_c) - \lambda_c|^{-1}$ et $P_0 = P\lambda_c$.

Fig. 2. — Variation du coefficient de réflexion du miroir. [Mirror reflexion coefficient versus the wavelength.]

Pour une valeur de P et de λ_c donnée, $RM(\lambda)$ est calculé pour chaque valeur de λ du spectre utilisé.

Les coefficients de réflexion des cellules sont fonction de la longueur d'onde du rayonnement et dépendent du matériau utilisé. Cependant, des traitements de surface [6] permettent de minimiser la réflexion et nous avons tenu compte globalement de celle-ci

en prenant $RC = 0,04$ indépendamment de la longueur d'onde.

2.2 COEFFICIENTS D'ABSORPTION DES MATÉRIAUX. — Les coefficients d'absorption α des matériaux sont fonction de la longueur d'onde et de la température. Les courbes données par W. C. Dash et R. Newman [6], H. Philipp et E. A. Taft [7], J. A. Hutchby et R. L. Fudurich [8], fournissent respectivement les valeurs numériques des $\alpha(\lambda)$ pour le Ge, Si et $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$. Les coefficients d'absorption seront supposés indépendants de la température.

En effet, pour un radiateur de dimensions constantes, lorsque la concentration augmente, les dimensions de la cellule doivent être modifiées de manière à maintenir la température de la cellule dans des limites acceptables. Dans ces conditions, les coefficients d'absorption ne sont pas sensiblement affectés [10].

2.3 EXPRESSIONS DES COURANTS. — La cellule au $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ possède une couche superficielle DH , de $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As(P)}$, formant hétérojonction avec la couche diffusée P^+ . La teneur y en AlAs est fixée à 0,90. L'épaisseur $X1$ de la zone diffusée du GaAl_xAs est fixée à $0,3 \mu\text{m}$ et la vitesse de recombinaison à l'interface (P , P^+) est prise égale à $S_1 = 10^4 \text{ cm/s}$. La teneur en aluminium x dans le $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ est un paramètre d'étude. Les relations donnant les variations du gap, des masses effectives, des mobilités et de la constante diélectrique sont données dans l'appendice A. Les relations établies dans l'appendice B permettent d'écrire les densités de courant présentes dans chaque cellule sous éclaircissement de longueur d'onde λ .

Pour la cellule $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As(P)}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As(P}^+, \text{N})$, les expressions (B, 3), (B, 6) et (B, 13) conduisent à la densité de courant

$$J_1(\lambda) = J'_{n1} + J'_{p1} + J_{G1} + (J''_{n1} + J''_{p1}) \times (\exp(V/U_T) - 1) - J_{R1} \quad (2)$$

où l'on met en évidence le photo-courant et le courant d'obscurité ainsi que le courant dans la zone de charge d'espace. L'expression 2 peut alors s'écrire :

$$J_1(\lambda) = J_{ph1}(\lambda) + J_{D1} \quad (3)$$

avec :

$$J_{ph1}(\lambda) = J'_{n1} + J'_{p1} + J_{G1}$$

$$J_{D1} = (J''_{n1} + J''_{p1})(e^{V/U_T} - 1) - J_{R1}.$$

Pour la cellule $\text{GaAs(P}^+, \text{N)}$ pour laquelle on n'a pas « défenêtré » en surface, l'expression du photo-courant se déduit de la relation 3 avec $DH = 0$.

Pour les cellules au $\text{Si(N}^+, \text{P)}$ et $\text{Ge(N}^+, \text{P)}$ les relations (B. 5), (B. 9) et (B. 13) conduisent à la densité de courant

$$J_2(\lambda) = J'_{p2} + J'_{n2} + (J''_{p2} + J''_{n2})(e^{V/U_T} - 1) - J_{R2} + J_{G2} \quad (4)$$

que l'on écrira :

$$J_2(\lambda) = J_{ph2}(\lambda) + J_{D2} \quad (5)$$

avec

$$J_{ph2}(\lambda) = J'_{p2} + J'_{n2} + J_{G2}$$

$$J_{D2} = (J''_{p2} + J''_{n2})(e^{V/U_T} - 1) - J_{R2}.$$

Les valeurs des paramètres physiques utilisées sont données dans le tableau III.

2.4 EXPRESSIONS DES PERTES. CALCUL DE LA TEMPÉRATURE DE LA CELLULE.

2.4.1 *Pertes.* — Les pertes dont on tient compte sont :

- a) Les chutes de tension :
  - dans la zone diffusée,
  - au contact de la grille collectrice et de zone diffusée,
  - le long du doigt métallique de la grille collectrice.

b) Les pertes par ombrage dues au profil de métallisation de la grille.

La grille utilisée est constituée de bandes métalliques de largeur $2W_D$, régulièrement réparties à la surface de la zone diffusée, et distantes de $2L_D$ (Fig. 3).

Fig. 3. — Paramètres de la grille collectrice des cellules.
[Grid metallization patterns for solar cells.]

Si l'on suppose une densité de courant J , constante en tout point de la surface éclairée, la chute de tension dans la zone diffusée V_{ZD} s'exprime par [9] :

$$V_{ZD} = \int_0^{L_D} J \rho_s x dx = \rho_s J L_D^2 / 2 \quad (6)$$

ρ_s résistance carrée de la zone diffusée.

La densité de courant le long du doigt métallique est J/S où $S = W_D/L_D$. Si ρ_c ($\Omega \cdot \text{cm}^2$) est la résistivité de contact entre la couche métallique et la zone diffusée, la chute de tension au contact s'écrit :

$$V_c = \rho_c J / S. \quad (7)$$

La chute de tension le long du doigt métallique de la grille sera :

$$V_{DG} = \int_0^{Z/2} \frac{\rho_M z L_D}{W_D e_G} J dz = \frac{\rho_M J Z^2}{2 L_D S^2} \quad (8)$$

ρ_M étant la résistivité de la grille et e_G son épaisseur. On peut raisonnablement supposer vraie la relation $W_D = 4 e_G$, relation qui tient compte des possibilités de réalisation de la grille. En introduisant alors le paramètre S on aboutit à (8).

La tension réelle aux bornes de la cellule sera alors celle qu'on aurait en l'absence de pertes, diminuée des chutes de tensions internes, soit :

$$V = V_{\max} - V_{ZD} - V_c - V_{DG} = V_{\max} - \Sigma \Delta V. \quad (9)$$

Dans les expressions 3 et 5 des courants, on a mis en évidence un terme de photo-courant J_{ph} fonction du taux d'ombrage $\tau_s = S_0/S_t$ indépendant de la tension aux bornes de la cellule, et un terme J_D courant d'obscurité fonction uniquement de la tension aux bornes de la cellule.

Si S_0 , S_u , S_t sont respectivement la surface ombrée, utile et totale de la cellule en présence de la grille de métallisation, on peut écrire :

$$S_u = S_t(1 - \tau_s).$$

Si le réseau de grille est linéaire :

$$\tau_s = \frac{S_0}{S_t} = \frac{W_D}{W_D + L_D} = \frac{S}{1 + S} \neq S$$

et $S_u \neq S_t(1 - S)$.

L'introduction de la grille de métallisation a pour effet de multiplier le photo-courant par le rapport S_u/S_t . La densité de courant réel dans la cellule s'écrit alors :

$$J = J_{ph}(1 - S) - J_D(V). \quad (10)$$

Pour une cellule carrée de n éléments identiques et de côté Z la puissance recueillie P s'écrit avec $2 n L_D = Z$:

$$P = Z^2 [J_{ph}(1 - S) - J_D(V)] [V_{\max} - \Sigma \Delta V]. \quad (11)$$

La puissance optimale sera obtenue pour les valeurs de S et L_D qui annulent les dérivées partielles de P par rapport à S et L_D .

Ces deux conditions conduisent au système d'équations 12

$$L_D = [2 Z^2 \rho_M / \rho_s S^2]^{1/3}$$

$$J_{ph} V_{\max} = J_{ph}^2 (1 - S) \left[\frac{A}{S^3} + \frac{(1 + S)}{S^2} \rho_c + B \right] - 2 J_{ph} J_D \left[A \frac{(2 - S)}{2 S^3} + \frac{\rho_c}{S^2} + \frac{B}{2} \right] + J_D^2 \left[\frac{A}{S^3} + \frac{\rho_c}{S^2} \right], \quad (12)$$

avec

$$A = \frac{Z^2 \rho_M}{L_D} \quad \text{et} \quad B = \frac{\rho_s L_D^2}{4}.$$

Les valeurs de J_{ph} et J_D , sont prises ici en valeur absolue. Le système est résolu de la manière suivante : la détermination de la caractéristique $I(V)$ sans pertes permet de connaître V_{max} , tension au maximum de puissance, et la valeur de J_D , courant d'obscurité correspondant. A partir de ces valeurs de base on peut faire une première détermination approchée de L_D et S en résolvant le système d'équations 12. Les valeurs de S et L_D obtenues permettent alors de redéfinir la caractéristique $I(V)$ et un nouveau couple V_{max} , J_D qui permettent de recalculer par (12) de nouvelles valeurs de S et L_D .

Lorsque S et L_D satisfont aux critères de convergence choisis (variation ΔS de S entre deux itérations inférieure à 10^{-6}), les solutions $S = S_{op}$ et L_{Dop} sont alors fixées pour la poursuite du calcul. Ce calcul permet donc de tenir compte de l'influence du taux d'ombrage sur le photo-courant, sans influencer la valeur du courant d'obscurité.

Le choix de Z obéit à différents critères. Il faut d'une part limiter la chute de tension le long du doigt métallique de la grille lorsque la densité de courant augmente avec la concentration, d'autre part, limiter à des valeurs acceptables l'échauffement de la cellule. Ces deux conditions sont réunies dans la relation 13, [10] :

$$Z = [300/CR]^{1/2} \quad (13)$$

dont on tiendra compte pour $CR > 1$. Si $CR = 1$, Z est fixée à 4 cm.

2.4.2 Effet de la température. — L'augmentation de température de la cellule influence les valeurs de ses paramètres physiques et principalement : le « gap » E_G , les densités d'états, les concentrations intrinsèques, les mobilités, et les durées de vie des porteurs de charge, les constantes et les longueurs de diffusion. On trouvera dans l'appendice A les expressions de ces paramètres en fonction de la température. L'augmentation de la température entraînera forcément une dégradation du rendement des cellules. Il est donc important de déterminer la température de la cellule lorsque la concentration solaire augmente. Si l'on suppose un refroidisseur d'épaisseur e , de conductivité thermique K_T , et de rayon RF , supportant une cellule de diamètre Z , et recevant une énergie Q_0 (Fig. 4), le calcul approché

Fig. 4. — Paramètres du radiateur supportant la cellule.
[Heater parameters.]

de l'écart de température entre le refroidisseur et l'ambiante est classique, et donné par [9] :

$$\Delta T = \frac{Q_0}{\pi K_T e \delta Z} \cdot \frac{K_1(\delta RF) \cdot I_0(\delta Z/2) + I_1(\delta RF) \cdot K_0(\delta Z/2)}{K_1(\delta Z/2) \cdot I_1(\delta RF) - I_1(\delta Z/2) \cdot K_1(\delta RF)} \quad (14)$$

avec $\delta = (\kappa/K_T e)^{1/2}$, κ ($\text{W} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) constante caractéristique des pertes thermiques par rayonnement et convection du refroidisseur. K_0 , I_0 , K_1 , I_1 sont les fonctions de Bessel modifiées d'ordre zéro et un.

2.5 SIMULATION NUMÉRIQUE. — Le spectre solaire AM1 donné par Thekaekara [11] fournit la radiance associée à une petite bande $d\lambda$ autour d'une longueur d'onde λ_i .

Le flux de photons associé à une variation $\Delta\lambda_i$ autour de λ_i s'écrit :

$$\phi_0(\lambda_i, CR) = CR \frac{\Delta\lambda_i}{hC} \lambda_i I(\lambda_i) \quad (15)$$

qui interviendra dans le calcul des photo-courants

(relations 3 et 5). $I(\lambda_i)$ ($\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$) est la radiance associée à λ_i , CR la concentration solaire. Si RC est le coefficient de réflexion d'une cellule la densité de photo-courant pour l'ensemble des radiations utiles sera :

$$I_{ph1} = (1 - RC) \int_0^{\lambda_{g1}} RM(\lambda_c, P, \lambda_i) \times J_{ph1}(\alpha_i(\lambda_i)) \cdot d\lambda_i \quad (16)$$

RM est exprimé par la relation 1, mais pourrait être une valeur numérique relevée à partir de la réponse d'un filtre miroir. J_{ph1} est fourni par la relation 3. λ_{g1} est la longueur d'onde associée au « gap » de la cellule qui reçoit le flux de photon par réflexion

sur le miroir. Pour la cellule éclairée en transmission on aura :

$$I_{ph2} = (1 - RC) \int_0^{\lambda_{g2}} [1 - RM(\lambda_c, P, \lambda_i)] \times J_{ph2}(\alpha_i(\lambda_i)) d\lambda_i \quad (17)$$

J_{ph2} fourni par la relation 5.

La détermination de la caractéristique sans pertes $I(V)$ d'une cellule sous éclairage est obtenue à partir des relations 3 et 5 et permet de connaître les coordonnées I_{max} , V_{max} au maximum de puissance.

Le rendement sans perte sera alors :

$$\eta_{sp} = V_{max} I_{max} / P_{tot}$$

le rendement avec pertes peut s'obtenir après détermination des caractéristiques de grille, des chutes de tension interne, et du taux d'ombrage. La puissance calculée est alors d'après 11 :

$P(S_{op}, L_{Dop})$ et le rendement avec pertes s'exprime par :

$$\eta_p = P(S_{op}, L_{Dop}) / P_{tot}$$

La connaissance de l'énergie incidente pour la cellule travaillant en réflexion, soit :

$$Q_{01} = S_i(1 - RC) \sum_{\lambda_i=0,290}^{\lambda_i=\lambda_c} RM(\lambda_c, P, \lambda_i) \phi_0(\lambda_i) \frac{hc}{\lambda_i}$$

et de celle travaillant en transmission soit :

$$Q_{02} = S_i(1 - RC) \sum_{0,290}^{\lambda_i=\lambda_{g2}} [1 - RM(\lambda_c, P, \lambda_i)] \times \phi_0(\lambda_i) \cdot \frac{hc}{\lambda_i}$$

permet de déterminer à l'aide de la relation 14 l'écart ΔT_i de température entre la cellule et l'ambiante, et sa température

$$T_i = T_0 + \Delta T_i$$

Si $T_{i+1} - T_i > 1^\circ\text{C}$ on recalcule les caractéristiques du système, c'est-à-dire les photo-courants, les puissances et rendements de chaque cellule, ainsi que leur nouvelle température.

3. 2^e partie : résultats de la modélisation.

Les résultats obtenus par la modélisation des couplages $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{Si}$ et GaAs/Ge seront présentés dans l'ordre suivant :

— Etude de l'influence du pourcentage molaire d'AlAs, sur les caractéristiques de la cellule $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ et sur les propriétés de l'association $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{Si}$.

— Effet de la pente du miroir, des vitesses de recombinaison en surface et de l'épaisseur de la zone diffusée sur les caractéristiques des cellules.

— Etude des rendements du système en fonction de la concentration solaire.

— Dimensionnement optimal de la grille de métallisation.

— Influence des dimensions du radiateur sur la température des cellules et sur le rendement des couplages.

3.1 PROPRIÉTÉS DU COUPLAGE $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ (P^+ , N)- Si (N^+ , P) EN FONCTION DE x .

3.1.1. — La cellule $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ est recouverte d'une couche « fenêtre » $DH = 0,1 \mu\text{m}$ de composé $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$ pour lequel $y = 0,9$.

Une épaisseur $DH = 1 \mu\text{m}$ ne change pas la nature des résultats obtenus avec $0,1 \mu\text{m}$. Lorsque x varie de 0 % à 40 %, la hauteur de bande interdite suit la loi (A.1) et pour $x \geq 0,5$ la loi (A.3). La bande de longueur d'onde utile du spectre AM1 varie alors de la manière suivante :

$$x = 0 \quad 0,290 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,870 \mu\text{m},$$

$$x \leq 0,40 \quad 0,290 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,640 \mu\text{m},$$

$$x \leq 0,70 \quad 0,290 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,595 \mu\text{m}.$$

Fig. 5. — Variation des courants au maximum de puissance de la cellule $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ et pour $0,0 \leq x \leq 0,4$ et de la cellule au silicium ($X_2 = 0,3 \mu\text{m}$, $s_2 = 10^4 \text{ cm/s}$) en fonction de E_c .

[Variation of the current at the maximum power of the $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ cell for $0.0 \leq x \leq 0.4$ and for the Si ($X_2 = 0.3 \mu\text{m}$, $s_2 = 10^4 \text{ cm/s}$) cell, versus E_c .]

L'augmentation de x entraîne une diminution progressive du photo-courant maximum, et une augmentation de la valeur de E_c produisant la saturation.

Sur la figure 5 on représente les valeurs des courants au maximum de puissance $I_{\max 1}$ et $I_{\max 2}$ pour $0,0 \leq x \leq 0,4$ en fonction de E_c et pour des concentrations de 1 et 10^3 . La position de E_{cm} pour x fixé ne dépend pas de la concentration solaire et se trouve toujours au voisinage de la valeur de saturation de $I_{\max 1}$. On peut donc considérer que la cellule $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ impose la valeur de E_{cm} au couplage puisque E_{cm} est toujours voisin de son « gap » (les « gaps » calculés à partir de l'expression (A.1) donnent respectivement E_g en eV : pour $x = 0$, $E_g = 1,424$; $x = 0,1$, $E_g = 1,548$; $x = 0,2$, $E_g = 1,678$; $x = 0,3$, $E_g = 1,798$; $x = 0,4$, $E_g = 1,922$). La concentration ne fait que translater verticalement la zone utile des courbes et la valeur de E_{cm} reste pratiquement inchangée.

Pour $x = 0,3$ et $E_c = E_{cm}$ les valeurs de $I_{\max 1}$ et $I_{\max 2}$ sont peu différentes alors que pour toute autre valeur de x elles diffèrent fortement. La figure 7 donne la variation de E_{cm} avec x et les rendements correspondants pour le couplage. La valeur de $x = 0,3$

donne au système un rendement maximum et sera fixée à cette valeur dans la suite de l'étude.

3.1.2. — Les rendements du couplage $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-Si}$ représentés sur les réseaux des figures 6a et 6b pour des concentrations solaires de 1 et 10^3 , et pour des pentes du miroir de 5 et $40 \text{ u}/\mu\text{m}$ en fonction de E_c

Fig. 6. — Influence de x sur le rendement du couplage $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-Si}$. $DH = 0,1 \mu\text{m}$, $X_2 = 0,3 \mu\text{m}$, $s_2 = 10^4 \text{ cm/s}$.

[Influence of the value of x on the efficiency of $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-Si}$ coupled cells system. $DH = 0,1 \mu\text{m}$, $X_2 = 0,3 \mu\text{m}$ and $s_2 = 10^4 \text{ cm/s}$.]

Fig. 7. — On représente simultanément la variation de E_{cm} en fonction de x (courbe (1) $P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$ et (2) $P = 5 \text{ u}/\mu\text{m}$) et la variation du rendement maximum du couplage $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-Si}$, $CR = 1$: (3) $P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$; (4) $P = 5 \text{ u}/\mu\text{m}$ — $CR = 10^3$; (5) $P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$; (6) $P = 5 \text{ u}/\mu\text{m}$. Pour $\text{Si } X_2 = 0,3 \mu$ et $s_2 = 10^4 \text{ cm/s}$, $DH = 0,1 \mu\text{m}$.

[Simultaneous representation of the variation of E_{cm} versus x (curve (1) $P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$ and (2) $P = 5 \text{ u}/\mu\text{m}$) and the variation of the maximum efficiency of $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-Si}$ coupled cells system, $CR = 1$: (3) $P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$; (4) $P = 5 \text{ u}/\mu\text{m}$ — $CR = 10^3$; (5) $P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$; (6) $P = 5 \text{ u}/\mu\text{m}$. For $\text{Si } X_2 = 0,3 \mu$ and $s_2 = 10^4 \text{ cm/s}$, $DH = 0,1 \mu\text{m}$.]

montrent une augmentation de E_{cm} avec x de même qu'avec P . Par contre, pour $x = \text{cte}$, E_{cm} est indépendante de la concentration solaire. Les résultats sont résumés sur le tableau I.

3.2 INFLUENCE DES PARAMÈTRES PHYSIQUES ET TECHNOLOGIQUES SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES CELLULES.

3.2.1 *Courant au maximum de puissance.* — La détermination point par point de la caractéristique $I(V)$ de chaque cellule permet de connaître les coordonnées $I_{\max}$, $V_{\max}$ du point où la puissance des cellules est maximum.

Les figures 8a et 8b représentent le comportement de $I_{\max}$ pour les quatre cellules en fonction de E_c lorsque P , CR , $X_{1,2}$ ou $s_{1,2}$ varient. Il n'y a pas proportionnalité entre les courants $I_{\max 1,2}$ et la concentration solaire, ceci dû au fait que les pertes varient de façon non linéaires avec la concentration.

Tableau I. — Variations de E_{cm} et du rendement du couplage $Ga_{1-x}Al_xAs-Si$ en fonction de x .

		x	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	
$CR = 1$	$P = 40$	E_{cm}	1,44	1,55	1,68	1,78	1,90	2,04	2,19	2,31	eV
		η	24,6	26,35	26,95	27,7	27,0	24,42	22,64	21,68	%
	$P = 5$	E_{cm}	1,34	1,40	1,51	1,59	1,68	1,78	1,93	2,08	
		η	24,19	25,72	26,20	26,4	25,7	22,82	21,21	20,48	
$CR = 10^3$	$P = 40$	E_{cm}	1,44	1,55	1,68	1,78	1,90	2,04	2,19	2,31	
		η	26,80	28,6	29,15	29,7	28,9	26,00	23,86	22,69	
	$P = 5$	E_{cm}	1,34	1,40	1,51	1,59	1,68	1,78	1,93	2,08	
		η	26,45	27,85	28,25	28,4	27,6	24,40	22,33	21,30	

Fig. 8a.

<u>Ga_{0,7}Al_{0,3}As</u>			<u>Si</u>				
<i>CR</i> = 1		<i>CR</i> = 1	<i>CR</i> = 10 ³	<i>CR</i> = 1			<i>CR</i> = 10 ³
<i>P</i> = 40 u/μm		<i>P</i> = 5 u/μm	<i>P</i> = 40 u/μm	<i>P</i> = 5		<i>P</i> = 40	<i>P</i> = 40
<i>DH</i> = 0,1 μm	(1)	(3)	(6)	<i>X</i> ₂ = 0,3 μm <i>s</i> ₂ = 10 ⁴ cm/s	(8)	(10)	(12)
<i>DH</i> = 1 μm	(2)	(4)	(7)	<i>X</i> ₂ = 1 μm <i>s</i> ₂ = 10 ⁶ cm/s	(9)	(11)	(13)
<i>DH</i> = 2 μm	(2)	(5)					

Variation des courants au point de puissance maximum en fonction de E_c pour les cellules $Ga_{0,7}Al_{0,3}As$ et Si .

[Variation of the currents at the maximum power point, versus E_c for $Ga_{0,7}Al_{0,3}As$ and Si solar cells.]

Fig. 8b.

$\text{GaAs}(X_1, s_1)\text{-Ge}(X_2, s_2)$

	$CR = 1$		$CR = 1$		$CR = 10^3$	
	$P = 40$	$u/\mu\text{m}$	$P = 5$	$u/\mu\text{m}$	$P = 40$	$u/\mu\text{m}$
$X_{1,2} = 0,3 \mu\text{m}; s_{1,2} = 10^4 \text{ cm/s}$	(1)	(5)	(3)	(7)	(9)	(11)
$X_{1,2} = 0,3 \mu\text{m}; s_{1,2} = 10^6 \text{ cm/s}$	(2)	(6)	(4)	(8)	(10 ⁸)	(12)

Variation des courants au point de puissance maximum en fonction de E_c pour les cellules GaAs et Ge.

[Variation of the currents at the maximum power point, *versus* E_c for GaAs and Ge solar cells.]

3.2.2 Rendements du système pour un soleil. — Le réseau de la figure 9 montre la variation du rendement du système en fonction de E_c pour des pentes de 5 et 40 $u/\mu\text{m}$, et différents paramètres technologiques des cellules. Les deux types de couplages étudiés sont comparés sur la figure. Le rendement d'un système et la valeur de E_{cm} augmente avec la pente. L'accroissement du rendement avec P peut s'expliquer de la manière suivante : si P diminue, E_c étant fixée, le nombre de photons que reçoit la cellule de front ($\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ ou GaAs) diminue, et son rendement défini comme le rapport de la puissance fournie par la cellule à la puissance totale présente sur le spectre décroît. Pour la raison inverse le rendement de la deuxième cellule (Si ou Ge) va augmenter. Mais cependant, la perte de rendement de la première cellule n'est pas compensée par l'augmentation du rendement de la deuxième, étant donné la dissymétrie de ceux-ci au voisinage de E_{cm} . Une diminution de la pente du miroir entraîne alors une diminution du rendement du système. On retrouve ici encore l'effet d'entraînement de la cellule de plus fort rendement.

Pour une pente $P = 100 \text{ u}/\mu\text{m}$, l'amélioration du rendement maximum du système $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-Si}$ par rapport à $P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$ est de 0,25 % environ avec

un glissement de E_{cm} à 1,80 eV, et de 0,1 % pour le système GaAs/Ge avec $E_{cm} = 1,40 \text{ eV}$ (Fig. 9).

Le tableau II résume l'effet de la pente sur le rendement des couplages.

Tableau II. — Valeur de E_{cm} et η en fonction de la pente du miroir sous concentration unité.

		$P = 5$	$P = 40$	$P = 100$
$\text{Ga}_{0,3}\text{Al}_{0,7}\text{As-Si}$	$E_{cm} \text{ (eV)}$	1,59	1,78	1,80
	$\eta \text{ (\%)}$	26,4	27,6	27,9
GaAs-Ge	E_{cm}	1,26	1,38	1,40
	η	25,5	25,8	25,9

3.2.3 Influence de l'épaisseur de la zone diffusée sur le rendement. — La figure 10 montre la variation du rendement de chaque cellule en fonction de l'épaisseur de la zone diffusée $X_{1,2}$. La valeur du $X_{1,2}$ optimal est fonction de la vitesse de recombinaison en surface des porteurs de charges $s_{1,2}$ et peu dépendante de la concentration solaire.

La cellule $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ présente un maximum de

Fig. 9.

Système $\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}(\text{DH})\text{-Si}(X_2, s_2)$

	$P = 5 \text{ u}/\mu\text{m}$	$P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$	$P = 100 \text{ u}/\mu\text{m}$
$DH = 0,1 \text{ } \mu\text{m}; X_2 = 0,3 \text{ } \mu\text{m}; s_2 = 10^4 \text{ cm/s}$	(1)	(2)	(11)
$DH = 1 \text{ } \mu\text{m}; X_2 = 0,3 \text{ } \mu\text{m}; s_2 = 10^4 \text{ cm/s}$	(3)	(4)	
$DH = 0,1 \text{ } \mu\text{m}; X_2 = 1 \text{ } \mu\text{m}; s_2 = 10^6 \text{ cm/s}$	(5)	(6)	
$DH = 1 \text{ } \mu\text{m}; X_2 = 1 \text{ } \mu\text{m}; s_2 = 10^6 \text{ cm/s}$		(13)	

Système $\text{GaAs}(X_1, s_1)\text{-Ge}(X_2, s_2)$

	$P = 5 \text{ u}/\mu\text{m}$	$P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$	$P = 100 \text{ u}/\mu\text{m}$
$X_{1,2} = 0,3 \text{ } \mu\text{m}; s_{1,2} = 10^4 \text{ cm/s}$	(7)	(8)	(12)
$X_{1,2} = 0,3 \text{ } \mu\text{m}; s_1 = 10^6 \text{ cm/s}; s_2 = 10^4 \text{ cm/s}$	(9)	(10)	
$X_1 = 0,5 \text{ } \mu\text{m}; X_2 = 0,3 \text{ } \mu\text{m}; s_{1,2} = 10^4 \text{ cm/s}$		(14)	

Rendements des systèmes couplés pour des pentes de 5,40 et 100 u/μm et pour différentes valeurs de DH , $X_{1,2}$ et $s_{1,2}$, en fonction de E_c .

[Efficiency for the coupled system when the slope of the mirror P has the values 5.40 and 100 u/μm and for different values of the parameters DH , $X_{1,2}$ and $s_{1,2}$, versus E_c .]

rendement pour $X_1 = 0,5 \text{ } \mu\text{m}$ la valeur de s_1 est fixée à 10^4 cm/s valeur admissible du fait de la couche « fenêtre ».

Pour la cellule au silicium, le rendement est maximum pour $X_2 = 6 \text{ } \mu\text{m}$ si $CR = 1$ et $X_2 = 5 \text{ } \mu\text{m}$ si $CR = 10^3$ lorsque $s_2 = 10^4 \text{ cm/s}$. Si $s_2 = 10^6 \text{ cm/s}$, ces valeurs sont pratiquement inchangées.

Le GaAs présente un maximum bien marqué pour $X_1 = 0,8 \text{ } \mu\text{m}$ et $s_1 = 10^4 \text{ cm/s}$, ce maximum disparaît lorsque $s_1 = 10^6 \text{ cm/s}$ et la valeur optimale de $X_1 = 0,3 \text{ } \mu\text{m}$.

Enfin, pour le germanium si $s_2 = 10^4 \text{ cm/s}$ le rendement varie peu avec X_2 mais si $s_2 = 10^6 \text{ cm/s}$ le maximum se situe à $X_2 = 0,3 \text{ } \mu\text{m}$ la concentration ne changeant pas cette valeur.

3.3 VARIATION DU RENDEMENT AVEC LA CONCENTRATION SOLAIRE. — D'une manière générale le rendement d'un système passe par un maximum lorsque la concentration solaire augmente. La figure 11 représente $\eta = f(CR)$ pour des paramètres $X_{1,2}$ et $s_{1,2}$ différents

et des pentes de 40 et 5 u/μm du miroir. Dans chaque cas E_c est fixé à E_{cm} . Dans les conditions optimales, le couplage $\text{Ga}_{0,3}\text{Al}_{0,7}\text{As-Si}$ a un rendement $\eta = 30,4 \%$ pour $CR \simeq 750$ (courbe 1, Fig. 11) alors que le système GaAs-Ge avec $s_1 = 10^4 \text{ cm/s}$ pour le GaAs, $\eta = 29,6 \%$ pour $CR \simeq 600$ (courbe 5, Fig. 13) et chute à $\eta = 25,5 \%$ si $s_1 = 10^6 \text{ cm/s}$ (courbe 7, Fig. 11) valeur cependant plus réaliste pour le GaAs.

3.4 CARACTÉRISTIQUES DE LA GRILLE DE MÉTALLISATION. — La résolution du système d'équation 12, intégrée au programme de calcul permet pour chaque valeur de E_c et quelle que soit la concentration de déterminer le taux d'ombrage $S_{1,2}$ et la distance interligne de grille $L_{D1,2}$.

Le réseau de la figure 12 représente $S_{1,2}$ et $L_{D1,2}$ en fonction de la concentration solaire. Pour chaque valeur de CR , E_c est fixé à E_{cm} .

La cellule $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ a le plus petit taux d'ombrage quelle que soit la concentration solaire; pour les cellules GaAs et Si il diffère d'environ 0,6 %.

Fig. 10.

$\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$ ($DH = 0,1 \mu\text{m}$; $s_1 = 10^4 \text{ cm/s}$)
 (1) $CR = 1$ (2) $CR = 10^3$

	Silicium		GaAs		Ge	
	$s_2 = 10^4 \text{ cm/s}$	$s_2 = 10^6 \text{ cm/s}$	$s_1 = 10^4 \text{ cm/s}$	$s_1 = 10^6 \text{ cm/s}$	$s_1 = 10^4 \text{ cm/s}$	$s_2 = 10^6 \text{ cm/s}$
$CR = 1$	(3)	(4)	(7)	(8)	(11)	(12)
$CR = 10^3$	(5)	(6)	(9)	(10)	(13)	(14)

Variation du rendement des cellules en fonction de l'épaisseur de la zone diffusée.

[Cell efficiency variation *versus* the thickness of the diffused zone.]

Fig. 11.

$\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As-Si}$ ($s_1 = s_2 = 10^4 \text{ cm/s}$; $X_1 = 0,3 \mu\text{m}$)

$P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$ $DH = 0,1 \mu\text{m}$; $X_2 = 5 \mu\text{m}$ (1)

$P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$ $DH = 0,1 \mu\text{m}$; $X_2 = 0,3 \mu\text{m}$ (2)

$P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$ $DH = 1 \mu\text{m}$; $X_2 = 0,3 \mu\text{m}$ (4)

$P = 5 \text{ u}/\mu\text{m}$ $DH = 0,1 \mu\text{m}$; $X_2 = 0,3 \mu\text{m}$ (3)

GaAs-Ge ($X_2 = 0,3 \mu\text{m}$; $s_2 = 10^4 \text{ cm/s}$)

$P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$ $X_1 = 0,5 \mu\text{m}$ $s_1 = 10^4 \text{ cm/s}$ (5)

$P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$ $X_1 = 0,5 \mu\text{m}$ $s_1 = 10^6 \text{ cm/s}$ (6)

$P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$ $X_1 = 0,3 \mu\text{m}$ $s_1 = 10^6 \text{ cm/s}$ (7)

$P = 40 \text{ u}/\mu\text{m}$ $X_1 = 0,3 \mu\text{m}$ $s_1 = 10^4 \text{ cm/s}$ (8)

$P = 5 \text{ u}/\mu\text{m}$ $X_1 = 0,3 \mu\text{m}$ $s_1 = 10^4 \text{ cm/s}$ (9)

Etude du rendement de chaque système en fonction de la concentration solaire.

[Efficiency of each system *versus* the solar concentration.]

Fig. 12.

$\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As-Si}$ ($DH = 0,1 \mu\text{m}$; $X_{1,2} = 0,3 \mu\text{m}$; $s_{1,2} = 10^4 \text{ cm/s}$); GaAs-Ge ($X_{1,2} = 0,3 \mu\text{m}$; $s_{1,2} = 10^4 \text{ cm/s}$). Variation du taux d'ombrage S (courbes 1, 2, 3, 4) et de la demi-distance interligne de grille L_D (courbes 5, 6, 7, 8), respectivement pour les cellules $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$, Si , GaAs et Ge en fonction de la concentration solaire et au point de rendement maximum du système ($E_c = E_{cm}$).

[Variation of the shadowing ratio S (curves 1, 2, 3, 4) and of the half distance of the grid interline distance L_D (curves 5, 6, 7, 8) for respectively the cells $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$, Si , GaAs , Ge , versus the solar concentration at the point of maximum efficiency ($E_c = E_{cm}$).]

Par contre, pour le germanium S_2 est plus important et croît plus rapidement que pour les autres cellules, ceci du fait des plus fortes densités de courant qu'il transite.

3.5 INFLUENCE DES DIMENSIONS DU RADIATEUR. — L'étude faite jusqu'à présent suppose les cellules montées sur un radiateur de rayon $RF = 25 \text{ cm}$, ce qui leur assure un régime de température voisin de l'ambiante prise à 300 K . Il est cependant important de voir comment varie la température des cellules lorsqu'on change les dimensions du radiateur et qu'elles sont les baisses de performance des couplages.

Le réseau de la figure 13 donne la variation de température des cellules en fonction du rayon du radiateur pour différentes concentrations.

Les températures données sont celles au point de puissance maximum $E_c = E_{cm}$. Pour un rayon du radiateur inférieur à 10 cm la croissance de la température est très forte et atteindra rapidement des valeurs prohibitives.

Fig. 13. — Variation de la température des cellules $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$, Si , GaAs et Ge (lorsque $E_c = E_{cm}$) pour $CR = 1$ (courbes 1, 2, 3, 1); $CR = 25$ (courbes 4, 5, 6, 7); $CR = 10^2$ (courbes 8, 9, 10, 11) et $CR = 10^3$ (courbes 12, 13, 14, 15) en fonction du rayon RF du radiateur. Les paramètres des cellules sont identiques à ceux de la figure 12.

[Variation of the temperature of the $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$, Si , GaAs and Ge cells (when $E_c = E_{cm}$) and for $CR = 1$ (curves 1, 2, 3, 1) $CR = 25$ (curves 4, 5, 6, 7), $CR = 10^2$ (curves 8, 9, 10, 11) and $CR = 10^3$ (curves 12, 13, 14, 15) versus the radius of the heat exchanger. The parameters are the same as in figure 12.]

Fig. 14. — Variation du rendement des deux couplages en fonction du diamètre des radiateurs (pour $E_c = E_{cm}$) et pour différentes concentrations solaires. Couplage $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As-Si}$: courbes 1, 2, 3 pour $CR = 25, 10^2, 10^3$ respectivement. Couplage GaAs-Ge : courbes 4, 5, 6 pour $CR = 25, 10^2, 10^3$ respectivement. Les paramètres de cellules sont de la figure 12.

[Coupled system efficiency, versus the radius of the heat exchanger (when $E_c = E_{cm}$) and for different solar concentration. $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As-Si}$ coupled system : curves 1, 2, 3 for $CR = 25, 10^2, 10^3$ respectively. The parameters of the cells are the same as in figure 12.]

Enfin le réseau de la figure 14 permet de remarquer une meilleure tenue en température du couplage $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As/Si}$ que celui du couplage GaAs/Ge . Il faut noter que le « splitting » a pour effet de répartir le spectre entre les deux cellules et donc d'obtenir un échauffement de chaque cellule inférieur à celui qu'elle aurait en fonctionnant isolément.

4. Conclusion.

La présente étude a permis de dégager l'influence des principaux paramètres agissant sur les rendements des couplages ($\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$) $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-Si}$ et GaAs-Ge , particulièrement l'influence de x , des vitesses de recombinaisons en surface, des épaisseurs des zones

diffusées. Notre modèle d'étude tient compte des pertes par résistance série et taux d'ombrage ainsi que de l'effet de la température et permet d'optimiser les dimensions de grille de manière à minimiser les pertes.

La comparaison des deux couplages met en évidence la prépondérance du couplage $\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As-Si}$ sur le couplage GaAs-Ge avec un écart de rendement maximum d'environ 5 % pour une vitesse de recombinaison en surface du GaAs , $s_1 = 10^6$ cm/s. Cet écart peut être réduit à 1 % si s_1 chute à 10^4 cm/s.

Les résultats présentés peuvent servir de guide pour une éventuelle réalisation pratique des couplages de cellules solaires mentionnés ci-dessus.

Appendice A.

L'ensemble des paramètres du $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ sont fonction du pourcentage molaire d'aluminium x .

A1 - La hauteur de bande interdite directe E_{gd} ou indirecte E_{gi} est donnée de façon empirique par :

$$E_{gd} = 1,424 + 1,247 x \quad \text{si } 0 \leq x \leq 0,45 \quad (\text{A.1})$$

$$E_{gd} = 1,424 + 1,247 x + 0,992(x - 0,45)^2 \quad \text{si } 0,45 < x \leq 1 \quad \text{d'après la référence 12} \quad (\text{A.2})$$

$$E_{gi} = 1,87 + 0,29 x \quad \text{si } 0 \leq x \leq 1 \quad \text{d'après la référence 13.} \quad (\text{A.3})$$

La variation du gap avec la température s'exprime par :

$$E_{gd}(x, T) = E_{gd}(x, 300 \text{ K}) + 4 \times 10^{-4}(1 + 0,6 x)(300 - T) \quad \text{d'après la référence 14}$$

expression valable pour $0 \leq x \leq 0,45$ et établie empiriquement.

A2 - Les masses effectives des électrons et des trous du $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ sont obtenues par interpolation entre les masses effectives m_1^* de l'AlAs et m_2^* du GaAs [15] soit :

$$\frac{1}{m_p^*} = \frac{x}{m_{p1}^*} + \frac{1-x}{m_{p2}^*} \quad \text{masse effective des trous du } \text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$$

$$\frac{1}{m_{nd}^*} = \frac{x}{m_{nd1}^*} + \frac{1-x}{m_{nd2}^*} \quad \text{masse effective des électrons du } \text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$$

$$\frac{1}{m_{ni}^*} = \frac{x}{m_{ni1}^*} + \frac{1-x}{m_{ni2}^*} \quad \text{masse effective des électrons du } \text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$$

Les masses effectives des composants de l'alliage s'expriment par [16] :

$$\begin{aligned} m_{p1}^* &= 0,85 m_0 & m_{p2}^* &= 0,68 m_0 & \text{pour les trous} \\ m_{nd1}^* &= 0,128 m_0 & m_{nd2}^* &= 0,0636 m_0 & \text{pour les électrons de la vallée directe} \\ m_{ni1}^* &= 0,37 m_0 & m_{ni2}^* &= 0,39 m_0 & \text{pour les électrons de la vallée indirecte.} \end{aligned}$$

Les densités effectives d'états pour les bandes de conduction et de valence s'écrivent :

$$N_c = \frac{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}}{(h^2)^{3/2}} \quad N_v = \frac{2(2\pi m_p^* kT)^{3/2}}{(h^2)^{3/2}}$$

avec :

$$m_n^* = \left[m_{nd}^{*3/2} \exp \frac{(E_g - E_{gd})}{kT} + m_{ni}^{*3/2} \exp \frac{(E_g - E_{gi})}{kT} \right]^{2/3}.$$

A3 - La mobilité des électrons et des trous dépend de la composition x et du dopage. Les expressions des mobilités s'écrivent [13] :

$$\mu_p(N_a, x) = \mu_{p2}(N_a) \frac{(m_{p2})^{3/2}}{(m_p)^{3/2}} \quad \text{mobilité des trous}$$

$$\mu_{nd}(N_a, x) = \mu_{n2}(N_a) \frac{(m_{nd2})^{3/2}}{(m_{nd})^{3/2}} \quad \text{mobilité des électrons pour les transitions directes}$$

$$\mu_{ni}(N_a, x) = \mu_{n1}(N_a) \frac{(m_{ni1})^{3/2}}{(m_{ni})^{3/2}} \quad \text{mobilité des électrons pour les transitions indirectes.}$$

Les coefficients $\mu_{p2}(N_a)$, $\mu_{n2}(N_a)$ et $\mu_{n1}(N_a)$ sont définis par les relations empiriques suivantes :

$$\mu_{p2}(N) = \frac{380}{[1 + 3,17 \times 10^{-17} N]^{0,266}};$$

$$\mu_{n1}(N) = \frac{165}{[1 + 8,1 \times 10^{-17} N]^{0,13}};$$

$$\mu_{n2}(N) = \frac{7\,200}{[1 + 5,51 \times 10^{-17} N]^{0,233}};$$

où N est la densité d'impuretés.

La mobilité effective résulte de la composition des mobilités directe et indirecte pondérées par les densités d'électrons des bandes respectives soit :

$$\mu_n(N, x) = \mu_{nd} R_d + \mu_{ni}(1 - R_d)$$

où :

$$R_d = \frac{n_d}{n_d + n_i} = \frac{1}{1 + \frac{(m_{ni})^{3/2}}{(m_{nd})^{3/2}} \exp \frac{(E_{gd} - E_{gi})}{kT}}.$$

A4 - Les mobilités et la hauteur de bande interdite sont des fonctions de la température [17] :

$$\begin{array}{lll} \mu_p = \mu_{p0}(T/300)^{-2,3} & \mu_n = \mu_{n0}(T/300)^{-2,6} & \text{pour le silicium} \\ \mu_p = \mu_{n0}(T/300)^{-2,1} & \mu_n = \mu_{n0}(T/300)^{-1} & \text{pour le GaAs} \\ \mu_p = \mu_{p0}(T/300)^{-2,3} & \mu_n = \mu_{n0}(T/300)^{-1,6} & \text{pour le germanium} \end{array}$$

μ_{p0} et μ_{n0} représentent les mobilités respectives à 300 K.

La hauteur de bande interdite varie avec T comme :

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

Pour GaAs : $E_g(0) = 1,522$; $\alpha = 5,8 \times 10^{-4}$; $\beta = 300$.

Pour Si : $E_g(0) = 1,16$; $\alpha = 7,2 \times 10^{-4}$; $\beta = 1\,108$.

Pour Ge : $E_g(0) = 0,741$; $\alpha = 4,56 \times 10^{-4}$; $\beta = 210$.

A5 - On suppose que la constante diélectrique du $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ varie linéairement entre celle de l'AlAs, et celle du GaAs [12].

Soit : $\varepsilon_r = 13,1 - 3x$.

Appendice B.

Dans ce paragraphe on donne les équations qui permettent de calculer les courants sous éclairage dans les deux types de cellules (P^+ , N) et (N^+ , P) et provenant des : zone « fenêtre », zone de diffusion, zone de base, zone de charge d'espace.

B1 - Courant généré dans la zone « fenêtre » du $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$.

Cette zone est choisie de type P.

La résolution des équations de continuité permet d'écrire le photo-courant injecté dans la zone diffusée P^+ de la cellule, soit :

$$J_{n3}(DH) \frac{q\alpha_3(\lambda) \phi_0(\lambda) L_{n3}}{\alpha_3^2 L_{n3}^2 - 1} \left[\alpha_3 L_{n3} e^{-\alpha_3 DH} + \frac{(s_{n3} L_{n3}/D_{n3}) \left(e^{-\alpha_3 DH} \cosh \frac{DH}{L_{n3}} - 1 \right) + e^{-\alpha_3 DH} \sinh \frac{DH}{L_{n3}} - \alpha_3 L_{n3}}{\frac{s_{n3} L_{n3}}{D_{n3}} \sinh \frac{DH}{L_{n3}} + \cosh \frac{DH}{L_{n3}}} \right] \quad (\text{B.1})$$

On a négligé le courant d'obscurité dans cette expression.

B2 - Courant dans une zone diffusée P^+ ou N^+ .

B.2.1. - *Zone diffusée P^+ .* — En présence d'une couche fenêtre d'épaisseur DH , si α_1 est le coefficient d'absorption de la zone diffusée, X_1 son épaisseur, s_{n1} la vitesse de recombinaison des électrons à l'interface (P, P^+) le courant généré dans la zone diffusée pour une radiation, est :

$$J_{n1}(DH + X_1) = \frac{q\alpha_1 \phi_0 e^{-\alpha_1 DH}}{\alpha_1^2 - 2\alpha_1\gamma - \frac{1}{L_{n1}^2}} \left[(\alpha_1 - \gamma) e^{-\alpha_1 X_1} + \frac{\left[\left(\frac{s_{n1}}{D_{n1}} - \gamma \right) \cosh fX_1 + f \sinh fX_1 \right] e^{-\alpha_1 X_1} - \left(\alpha_1 + \frac{s_{n1}}{D_{n1}} - 2\gamma \right) e^{-\gamma X_1}}{\left(\frac{s_{n1}}{D_{n1}} - \gamma \right) \sinh fX_1 + f \cosh fX_1} \right] - \frac{fJ_{n3}(DH) e^{-\gamma X_1}}{\left(\frac{s_{n1}}{D_{n1}} - \gamma \right) \sinh fX_1 + f \cosh fX_1} + \frac{qn_i^2 D_{n1}}{N_a} \times \left[\frac{\left(\frac{s_{n1}}{D_{n1}} - \gamma \right) \cosh fX_1 + f \sinh fX_1}{\left(\frac{s_{n1}}{D_{n1}} - \gamma \right) \sinh fX_1 + f \cosh fX_1} + \gamma \right] (e^{V/U_T} - 1) \quad (\text{B.2})$$

où

$$\gamma = \frac{\mu_{n1} E}{2 D_{n1}} \quad \text{et} \quad f^2 = \gamma^2 + \frac{1}{L_{n1}^2}$$

expression valable tant que la différence des niveaux d'énergie des bandes de conduction des couches P et P^+ est grande [18]. Les deux premiers termes de (B.2) sont relatifs au photo-courant, le 3^e est celui du courant d'obscurité. On posera :

$$J_{n1}(DH + X_1) = J'_{n1} + J''_{n1}(e^{V/U_T} - 1). \quad (\text{B.3})$$

Si la cellule ne comporte pas de couche fenêtre, l'expression du courant généré se déduit de (B.2) en faisant $DH = 0$.

B.2.2. — *Zone diffusée* N^+ . — On ne considère pas de couche fenêtre en surface. Les équations de continuité pour des porteurs de type P, conduisent à la solution :

$$J_{p2}(X_2) = \frac{-q\alpha_2 \phi_0}{\alpha_2^2 + 2\alpha_2\gamma - \frac{1}{L_{p2}^2}} \left[(\alpha_2 + \gamma) e^{-\alpha_2 X_2} + \right. \\ \left. + f \frac{\left[\left(\frac{s_{p2}}{D_{p2}} + \gamma \right) \cosh fX_2 + f \sinh fX_2 \right] e^{-\alpha_2 X_2} - \left(\frac{s_{p2}}{D_{p2}} + 2\gamma + \alpha_2 \right) e^{\gamma X_2}}{\left(\frac{s_{p2}}{D_{p2}} + \gamma \right) \sinh fX_2 + f \cosh fX_2} \right] \\ - \frac{qn_i^2 D_{p2}}{N_d} \left[f \frac{\left[f \sinh fX_2 + \left(\frac{s_{p2}}{D_{p2}} + \gamma \right) \cosh fX_2 \right]}{\left(\frac{s_{p2}}{D_{p2}} + \gamma \right) \sinh fX_2 + f \cosh fX_2} - \gamma \right] (e^{V/U_T} - 1) \quad (B.4)$$

avec

$$f^2 = \gamma^2 + \frac{1}{L_{p2}^2}.$$

Le premier terme donne l'expression du photo-courant pour une longueur d'onde λ , le second, le courant d'obscurité, et nous mettrons (B.4) sous la forme :

$$J_{p2}(X_2) = J'_{p2} + J''_{p2}(e^{V/U_T} - 1). \quad (B.5)$$

B3 - Courant dans la zone de base.

Pour une base de type N, le courant généré s'écrit :

$$J_{p1}(X_1 + W_{B1}) = \frac{-q\alpha_1 \phi_0 L_{p1}}{\alpha_1^2 L_{p1}^2 - 1} \left[\frac{e^{-\alpha_1(X_1 + W_{B1})}}{\sinh \left(\frac{W_{B1} - W_{T1}}{L_{p1}} \right)} + \right. \\ \left. + \left[\alpha_1 L_{p1} - \coth \left(\frac{W_{B1} - W_{T1}}{L_{p1}} \right) \right] e^{-\alpha_1(X_1 + W_{T1})} \right] \\ + \frac{qn_i^2}{N_d} \cdot \frac{D_{p1}}{L_{p1}} \coth \left(\frac{W_{B1} - W_{T1}}{L_{p1}} \right) \cdot (e^{V/U_T} - 1) \quad (B.6)$$

que l'on utilisera sous la forme :

$$J_{p1}(X_1 + W_{B1}) = J'_{p1} + J''_{p1}(e^{V/U_T} - 1). \quad (B.7)$$

Si la cellule possède une couche fenêtre d'épaisseur DH , J'_{p1} est multiplié par le facteur d'absorption $e^{-\alpha_3 DH}$, et compte tenu de la valeur de l'argument $(W_{B1} - W_{T1})/L_{p1}$, (B.6) peut se simplifier et se mettre sous la forme :

$$J_{p1}(X_1 + W_{T1} + DH) = \frac{-q\alpha_1 \phi_0 L_{p1}}{\alpha_1 L_{p1} + 1} \cdot e^{-\alpha_3 DH} \cdot e^{-\alpha_1(W_{T1} + X_1)} + \\ + \frac{qn_i^2}{N_d} \cdot \frac{D_{p1}}{L_{p1}} \coth \left(\frac{W_{B1} - W_{T1}}{L_{p1}} \right) (e^{V/U_T} - 1) \quad (B'.6)$$

si la base est de type P la solution s'écrit :

$$J_{n2}(X_2 + W_{T2}) = \frac{q\alpha_2 \phi_0 L_{n2}}{\alpha_2^2 L_{n2}^2 - 1} \frac{e^{-\alpha_2(X_2 + W_{B2})}}{\sinh \left(\frac{W_{B2} - W_{T2}}{L_{n2}} \right)} + \left[\alpha_2 L_{n2} - \coth \left(\frac{W_{B2} - W_{T2}}{L_{n2}} \right) \right] e^{-\alpha_2(X_2 + W_{T2})} \\ - \frac{qn_i^2}{N_a} \cdot \frac{D_{n2}}{L_{n2}} \coth \left(\frac{W_{B2} - W_{T2}}{L_{n2}} \right) (e^{V/U_T} - 1) \quad (B.8)$$

que l'on utilise sous la forme :

$$J_{n2}(X_2 + W_{c2}) = J'_{n2} + J''_{n2}(e^{V/U_T} - 1). \quad (\text{B.9})$$

B4 - Expressions des courants dans la zone de charge d'espace.

On considère que le champ électrique interne qui règne dans la zone de charge d'espace, est suffisamment intense pour permettre le collectage de tous les porteurs créés. Le courant de génération photonique s'écrit alors :

$$J_G = q\phi_0 e^{-\alpha X}(1 - e^{-\alpha W_T}). \quad (\text{B.10})$$

Le courant de recombinaison dans cette zone est fourni d'après [19] par l'expression :

$$J_R = \frac{\pi q n_i W_T}{\sqrt{\tau_p \tau_n}} \frac{\sinh(V/2 U_T)}{(V_D - V)/U_T} \quad (\text{B.11})$$

τ_p et τ_n sont les durées de vie des porteurs minoritaires des zones N_a et N_d ; W_T l'extension de la zone de charge d'espace s'écrit en fonction de la tension appliquée V :

$$W_T = \left[\frac{2 \varepsilon (V_D - V)}{10^2 \cdot q} \right]^{1/2} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right]^{1/2} \quad \text{où } \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r (\text{F/m}). \quad (\text{B.12})$$

Le courant résultant est alors :

$$J_{WT} = J_G - J_R. \quad (\text{B.13})$$

Pour l'ensemble des expressions de l'appendice B, nous avons attribué l'indice 1 aux paramètres de la cellule de « gap » le plus élevé, l'indice 2 à l'autre cellule. Dans le cas où il n'y a pas d'indice, l'expression s'applique aux deux cellules.

Tableau III. — *Constantes physiques utilisées*
($T = 300 \text{ K}$).

$\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}(\text{P}^+, \text{N})$	$\text{Ge}(\text{N}^+, \text{P})$
$N_a = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
$N_d = 6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$N_d = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
$W_B = 2 \times 10^{-2} \text{ cm}$	$ E = 700 \text{ V/cm}$
$\tau_n = 10^{-9} \text{ s}$	$\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$
$\tau_p = 7,46 \times 10^{-9} \text{ s}$	$\tau_p = 10^{-5} \text{ s}$
$\mu_n(x)$ calculée	$\mu_n = 2846 \text{ cm}^2/\text{V.s}$
$\mu_p(x)$ calculée	$\mu_p = 164$
$s_1 = 10^4 \text{ cm/s}$	$\varepsilon_r = 16$
τ_r calculée	$W_B = 7,5 \times 10^{-2} \text{ cm}$
$\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}(\text{P})$	<i>Constantes générales</i>
$N_a = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$c = 3 \times 10^{14} \text{ cm/s}$
$s_n = 10^6 \text{ cm/s}$	$e = 0,25 \text{ cm}$
$\tau_n = 10^{-9} \text{ s}$	$\varepsilon_0 = 8,841 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$
$\mu_n(y)$ calculée	$h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
$y = 0,90$	$K = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
$S_i(\text{N}^+, \text{P})$	$\rho_M = 2,5 \times 10^{-6} \text{ cm}$
$N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$\kappa = 1,88 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$N_d = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$K_c = 2,1 \text{ W/}^\circ\text{C.cm}$
$ E = 750 \text{ V/cm}$	$q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
$\tau_n = 2 \times 10^{-5} \text{ s}$	$\rho_c = 10^{-4} \text{ cm}^2$
$\tau_p = 2 \times 10^{-7} \text{ s}$	$P_{\text{tot}} = 0,0889 \text{ W/cm}^2$
$\mu_n = 700 \text{ cm}^2/\text{V.s}$	
$\mu_p = 46$	<i>Variation des paramètres</i>
$\varepsilon_r = 11,8$	$0,1 \leq DH \leq 2 \mu\text{m}$
$W_B = 2 \times 10^{-2} \text{ cm}$	$0,3 \leq X \leq 5 \mu\text{m}$
$\text{GaAs}(\text{P}^+, \text{N})$	$10^4 \text{ cm/s} \leq s_{a,p} \leq 10^6 \text{ cm/s}$
$N_a = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$5 \mu\text{m} \leq P \leq 4 \text{ Ou}/\mu\text{m}$
$N_d = 6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$0 \leq RM \leq 1$
$ E = 700 \text{ V/cm}$	$1 \leq CR \leq 2000$
$\tau_n = 10^{-9} \text{ s}$	$0 \leq x \leq 0,90$
$\tau_p = 7,4 \times 10^{-9} \text{ s}$	$10 \text{ cm} \leq RF \leq 25 \text{ cm}$
$\mu_n = 1410 \text{ cm}^2/\text{V.s}$	
$\mu_p = 170 \text{ cm}^2/\text{V.s}$	
$\varepsilon_r = 13,1$	
$W_B = 2 \times 10^{-2} \text{ cm}$	

Bibliographie

- [1] LOFERSKI, J. J., Proc. 12th I.E.E.E. Photovoltaic Specialists. Conf. (1976) 957-60.
  - [2] BENNETT, A., OLSEN, L. C., Proc. 13th I.E.E.E. Photovoltaic Specialists. Conf. (1978) 868-73.
  - [3] ALVI, N. S., BACKUS, C. E., MASDEN, G. W., Proc. 12th I.E.E.E. Photovoltaic Specialists. Conf. (1976) 948-56.
  - [4] MOON, L., JAMES, L. W., VANDER PLAS, H. A., YEP, T. O., ANTYPAS, G. A., CHAI, Y., Proc. 13th I.E.E.E. Photovoltaic Specialists. Conf. (1978) 859-67.
  - [5] ARNDT, R. A., ALLISON, J. F., HYANOS, J. G., MEULENBERG, A., Proc. 11th I.E.E.E. Photovoltaic Specialists. Conf. (1975).
  - [6] DASH, W. C., NEWMAN, R., *Phys. Rev.* (1955) 99-1151.
  - [7] PHILIPP, H. R., TAFT, E. A., *Phys. Rev.* (1959) 113-1002; *Phys. Rev. Lett.* (1972) 8-13.
  - [8] HUTCHBY, J. A., FUDURICH, R. L., *J. Appl. Phys.* **47** n° 7 (July 1976) 3140-3151.
  - [9] NAPOLI, L. S., SWARTZ, G. A., LIU, S. G., KLEIN, N., FAIRBANKS, D., TAMULUS, D., *R.C.A. Rev.* **38** (1977) 76-108.
  - [10] BERRY, J. P., ESTEVE, D., FOLEA, D., THEREZ, F., VIALARET, G., *Revue Phys. App.* **14** (1979) 193-99.
  - [11] THEKAEKARA, *Solar irradiance for different air mass.* Solar cells book edited by C. E. Backus (I.E.E.E. Press).
  - [12] CASEY, H. C., PANISH, M. B., *Quantum Electronics* (Academic Press) 1978.
  - [13] HAUSER, J. R., SUTHERLAND, J. E., Annual Report on NASA Grant, N° NSG 1116 (March 1976).
  - [14] VOROBKALO, F. M., GLINGHUK, K. D., KOVALENKO, V. F., *Sov. Phys. Semicond.* **9** (1975) 656-657.
  - [15] HARISON, J. W., HAUSER, J. R., *J. Appl. Phys.* **47** (1976) 292-300.
  - [16] RODE, D. L., *J. Appl. Phys.* **45** (1974) 3887-3891.
  - [17] KIREEV, P. (Edition Mir. Moscou) 1975.
  - [18] HOVEL, H. J., WOODAL, J. M., Proc. 10th I.E.E.E. Photovoltaic Specialists. Conf. (1973) 25-30.
  - [19] SAH, C. T., NOYCE, R. N., SHOCKLEY, W., *Proc. IRE* **45** (1957) 1228-43.
-