Cellules solaires au silicium sous concentration Eléments de conception - Un exemple d'application

J.P. Berry, Daniel Estève, D. Follea, F. Thérez, G. Vialaret

► To cite this version:

J.P. Berry, Daniel Estève, D. Follea, F. Thérez, G. Vialaret. Cellules solaires au silicium sous concentration Eléments de conception - Un exemple d'application. *Revue de Physique Appliquée*, 1979, 14 (1), pp.193-199. 10.1051/rphysap:01979001401019300 . jpa-00244575

HAL Id: jpa-00244575

<https://hal.science/jpa-00244575>

Submitted on 1 Jan 1979

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
Physics Abstracts
73.40L

Cellules solaires au silicium sous concentration

Éléments de conception

Un exemple d'application

J. P. Berry, D. Estève, D. Follea, F. Thérez et G. Vialaret

(Reçu le 20 juin 1978, révisé le 16 octobre 1978, accepté le 20 octobre 1978)

Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes, C.N.R.S., 7 av. du Colonel-Roche, 31400 Toulouse, France

Résumé. — L'étude proposée concerne les éléments de conception de la grille de collecte des cellules solaires au silicium sous concentration. Tenant compte à la fois des pertes par conduction et du taux d'ombre, elle fait apparaître que le dessin de la grille la plus performante est constitué d'éléments rectilignes. A titre d'exemple d'application, la réalisation et l'expérimentation d'un générateur photovoltaïque à concentration a donné lieu à une évaluation technico-économique qui précise les perspectives de cette filière.

Abstract. — The proposed study treats of the design rules of the conducting grid for concentrated Silicon Solar Cells. Including both conduction losses and shadowing ratio, it leads to the most efficient grid, which is made of linear elements. As an example of application, the realization and the experimentation of a photovoltaic generator with concentration are described. A technico-economic evaluation allows to make precise the perspectives of the photovoltaic conversion.

L'utilisation de concentrateurs optiques est une des voies envisagées depuis trois ans pour réduire le coût des installations photovoltaïques [1]. Cette demande tient à l'importance relative (2/3) du coût de surface sensible de silicium vis-à-vis du coût de la structure support (1/3) dans les installations classiques à panneaux plans.

Dès les premiers travaux consacrés aux générateurs photovoltaïques sous concentration, il est apparu que la conception des cellules pouvait différer largement selon le mode de refroidissement qui leur serait associé [2, 3].

Si l'on envisage des modes de refroidissement actif, par circulation de fluide, par exemple, il n'apparaît pas de limite concernant la surface active des éléments de cellules. Par contre, lorsque pour des problèmes de coût et de simplicité de mise en œuvre, on envisage d'utiliser un dissipateur passif, il est aisé de montrer que l'échangeur, le niveau de concentration et la surface des cellules sont des choix interdépendants fixés en particulier par l'élévation de température, ΔT , acceptable pour les photopiles.

Nous avons, dans une communication précédente [3], donné les éléments essentiels d'un modèle thermique simple dont les résultats indiquent que, pour un refroidissement conventionnel en aluminium (20 kg/m²), pour une élévation de la température n'excédant pas $\Delta T = 30$ °C, une bonne approximation de la relation : niveau de concentration-surface des cellules, était donnée par l'expression approchée :

$$K.S = 0,03 \quad (1)$$

K : est le niveau de concentration ;

S : est la surface de la cellule exprimée en m².

La relation (1) fixe les dimensions de la cellule en fonction du taux de concentration.

Sur cette base, l'étude proposée concerne quelques règles simples de conception de la grille métallique de collecte du courant généré par le rayonnement lumineux. Elle utilise les résultats d'une étude de la répartition du potentiel dans la couche superficielle diffusée et s'efforce d'apprécier quelques autres limitations : résistance de contact, résistance des couches métalliques...

1. Choix du motif de grille. — En absence de matériaux à la fois transparents et très conducteurs nous sommes amenés pratiquement à collecter les porteurs générés par le rayonnement lumineux sur une grille métallique n'utilisant qu'une très faible partie de la surface active de la cellule. Nous définissons ainsi un taux d'ombre qui pour être acceptable doit rester dans la zone de 10 % valeur numérique que nous adopterons pour la suite de cet article. Le rôle de cette grille est de réduire la résistance de la couche diffusée en la court-circuitant localement, c'est-à-dire en amenant le courant le plus directement possible au contact assurant la connexion entre les cellules. Dans les conditions d'un taux d'ombre constant le motif à éléments de grille rectilignes ; éléments radiaux pour les structures circulaires, lignes parallèles pour les structures carrées, présentent les zones métallisées plus proches et une chute de tension réduite. Cette

conclusion est bien illustrée par l'analyse [2] comparant, à taux d'ombre donné, le réseau de lignes parallèles et le réseau de lignes disposées en croix.

Un calcul plus rigoureux de l'optimisation des dimensions du dessin de la cellule vérifie que le motif de lignes parallèles reste le plus efficace. Soit le schéma des motifs linéaire et croisé de la figure 1. Le courant total de la cellule est sorti de façon homogène sur les deux faces opposées $z = -Z$ et $z = +Z$. Nous supposons une densité uniforme J_E du courant qui traverse la jonction. Dans ces conditions le motif linéaire (Fig. 1a) présente une chute de tension

$$\Delta V = \frac{1}{2} J_E \left(\frac{\rho}{W_E} L_1^2 + \frac{\rho_M}{\varphi_M} \cdot \frac{L_1}{S} Z^2 \right). \quad (2)$$

ρ et ρ_M sont les résistivités, respectivement de la couche superficielle du silicium et celle du métal.

W_E et φ_M sont les épaisseurs respectivement de la couche diffusée et du barreau métallique.

Les autres grandeurs géométriques sont L_1 , la demi-

Fig. 1. — Motifs de la grille collectrice des cellules solaires carrées de surface $4 Z^2$.

[Metallization patterns for square solar cells of $4 Z^2$ area.]

distance entre deux lignes métalliques, Z sa longueur et S sa demi-largeur. Le motif croisé (Fig. 1b) admet la chute de potentiel suivante :

$$\Delta V = \frac{1}{2} J_E \left\{ \frac{1}{2} \frac{\rho}{W_E} L_c^2 + \frac{\rho_M}{\varphi_M} \left[\frac{L_c}{2S} \cdot \left(Z - \left(\frac{Z}{L_c} - 1 \right) S \right)^2 + Z \cdot \left(\frac{Z}{2L_c} - 1 \right) + \left(\frac{L_c + S}{S} \right) \cdot Z^2 \right] \right\} \quad (3)$$

relation dans laquelle L_c devient la demi-distance entre les lignes métalliques, les autres paramètres représentent les mêmes grandeurs que précédemment.

Les pertes τ_R par conduction sont déduites de la relation (2) normalisée par rapport à la valeur de la tension V_{max} au point de puissance maximale pour le motif linéaire et en prenant le résultat de la relation (3) normalisé par rapport à V_{max} pour le motif croisé. Les variations de la figure 2 du taux d'ombre τ_s , et τ_R en fonction des paramètres géométriques de la grille montrent des performances supérieures, pertes minimales, pour le motif linéaire au point de la détermination optimale des distances L_1 et S ($\tau_s = \tau_R$).

L'analyse précédente ne tient pas compte de la modulation locale du courant d'obscurité de diode liée aux variations ΔV . La modification consécutive du courant J_E est étudiée dans le paragraphe suivant.

2. Dimensionnement de l'espacement de grille. —

La grille composée de doigts métallisés parallèles sera donc choisie comme motif de base optimal. La vue en coupe de la figure 3 montre comment le courant de lumière J_L est collecté dans l'intervalle élémentaire dy .

Fig. 2. — Variations des taux d'ombre τ_s et perte par conduction τ_R ($\rho/W_E = 80 \Omega/\square$, $\rho_M/\varphi_M = 1,4 \times 10^{-2} \Omega/\square$, $Z = 0,5$ cm et $J_E = 2,8$ A/cm²).

[Variations of the shadowing ratio τ_s and conduction loss τ_R ($\rho/W_E = 80 \Omega/\square$, $\rho_M/\varphi_M = 1,4 \times 10^{-2} \Omega/\square$, $Z = 0.5$ cm and $J_E = 2.8$ A/cm²).]

Fig. 3. — Vue en coupe d'une cellule solaire diffusée.

[Cross sectional view of a diffused solar cell.]

Le fonctionnement de cette grille collectrice est régi par le système d'équations :

$$dV_{EB}(y) = \frac{\rho}{Z \cdot W_E} I_T(y) \cdot dy \quad (4)$$

$$dI_T(y) = Z(J_L - J_D) \cdot dy \quad (5)$$

$$J_D(y) = J_s \exp\left(\frac{V_{EB}(y)}{U_T}\right). \quad (6)$$

L'équation (4) exprime la variation de la tension V_{EB} de l'émetteur (couche superficielle, figure 3) prise par rapport à la base (substrat) produite par le passage du courant total I_T sur l'intervalle dy . Les équations (5) et (6) donnent respectivement le courant total et le courant d'obscurité J_D ; J_L est le courant de court-circuit, généré par le flux lumineux. ρ est la résistivité

Fig. 4. — Courbes de variation de l'amplitude du potentiel $\Delta V_{EB}(y)$ en fonction de la distance ($J_s = 10^{-11}$ A/cm², $J_{sc} = 2,45$ A/cm²).[Variation of the excess of the potential $\Delta V_{EB}(y)$ curves versus the distance ($J_s = 10^{-11}$ A/cm², $J_{sc} = 2,45$ A/cm²).]

de la couche diffusée, W_E son épaisseur, Z la dimension longitudinale de la cellule, J_s le courant de saturation de la jonction.

En ne considérant que les variations ΔV de tension comptées à partir de l'axe de symétrie nous obtenons :

$$\frac{d^2 \Delta V_{EB}}{dy^2} = \frac{\rho}{W_E} \left[J_L - J_s \exp\left(\frac{+ V_{EB}}{U_T}\right) \right] \quad (7)$$

équation que nous traitons numériquement avec

$$\Delta V = 0 \text{ et } d(\Delta V)/dy = 0 \text{ pour } y = 0.$$

La figure 4 donne une illustration de la répartition du potentiel pour différents espacements L des doigts métalliques. L'effet de cette variation de potentiel est de réduire le rendement, atténuation que nous avons exprimée en terme du facteur de courbe (4). Il est donc souhaitable que cette variation de potentiel reste dans la limite de la tension thermodynamique U_T , ce qui permet des valeurs du facteur de courbe de l'ordre de 0,80. Les variations de l'espacement $2(L - S)$ pour un F.F. de 0,80 en fonction du niveau K de la concentration sont représentées sur la figure 5. La largeur $2S$ des doigts correspondante est tracée pour un taux d'ombre égal à 10 %.

Fig. 5. — Valeurs optimales de la distance inter-lignes $2.(L - S)$ et de la largeur de la ligne métallique $2S$ en fonction du taux de concentration.

[Optimized values of the inter-line distance and grid-line width versus the concentration ratio.]

3. Examen des autres limitations. — 3.1 RÉSISTANCE DE CONTACT. — Dans le cas du silicium les résistances associées au contact métal-semiconducteurs ne diffèrent pas fondamentalement d'un métal à l'autre. L'analyse peut s'appuyer sur les valeurs numériques données pour le contact Al-Si [5], qui montrent (Fig. 6) que la chute de tension :

$$\Delta V = \rho_c \cdot \frac{K \cdot J_T}{\bar{G}_s} \simeq 10 \text{ mV}, (N_D \simeq 7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}) \quad (8)$$

Fig. 6. — Variation de la résistance du contact Al-Si en fonction de la concentration en impuretés en surface.

[Variation of the contact-resistance of Al-Si *versus* the surface impurity concentration.]

reste négligeable même pour des niveaux de concentration K supérieurs à 500.

3.2 RÉSISTANCE DES COUCHES MÉTALLIQUES. — Comme indiqué dans l'introduction, la surface $4Z^2$ des cellules est étroitement liée au taux de concentration par la relation type $4Z^2 \cdot K = 300 \text{ cm}^2$. La chute de tension le long du doigt est dans ces conditions donnée par :

$$\Delta V = \frac{300}{8} \cdot \frac{\rho_M}{\varphi_M} \cdot \frac{J_{T(1 \text{ soleil})}}{S} \cdot (L - S). \quad (9)$$

Nous constatons que la chute de tension parasite est indépendante du taux de concentration K dans le cas où la relation $J_T(K \text{ soleils}) = K \cdot J_T(1 \text{ soleil})$ reste vraie à haute concentration et lorsque la surface de la cellule est réduite suivant l'augmentation de K . Pour des techniques simples utilisant des couches d'aluminium de 5 à 10 μm d'épaisseur, les valeurs de ΔV (Fig. 7) deviennent gênantes pour les surfaces de 1 cm^2 éclairées par un flux concentré de 300 soleils.

Notons enfin que l'utilisation de fortes concentrations entraîne une augmentation linéaire de la densité du courant dans le barreau métallique. Si nous nous rapportons aux limites généralement admises [6] un niveau de concentration de 500 est accessible pour des technologies de la microélectronique.

Fig. 7. — Chute de tension sur la grille collectrice en fonction de son épaisseur et surfaces différentes ($2S = 40 \mu\text{m}$).

[Voltage drop on the conducting grid *versus* its thickness for various area and $2S = 40 \mu\text{m}$.]

4. Un exemple d'application. — Un générateur photovoltaïque à concentration est actuellement en fonctionnement au laboratoire. Le système de conversion retenu est constitué d'un panneau orienté 2 axes, supportant des bacs étanches ; figures 8-9 ; [3]. L'élément concentrateur formé de lentilles de Fresnel constitue la face avant des modules, six cellules solaires sont montées à l'intérieur sur la face arrière. Les rendements mesurés de quatre modules connectés en série ainsi que la puissance solaire incidente au cours du temps sont portés sur la figure 10. Nous observons des rendements de conversion énergétique

Fig. 8. — Héliostat.
[Heliostat.]

Fig. 9. — Modules concentrateurs.

[Concentrating modules.]

de 9 %, qui se décomposent en 75 % pour le système optique de concentration et 12,5 % pour les cellules solaires. Le coefficient de remplissage du panneau est de 70 %.

Le tableau I donne une évaluation prévisionnelle du coût par watt-crête d'une installation semblable à caractère industriel.

5. Conclusion. — Nous avons exposé dans cet article les aspects essentiels qui définissent les règles de conception des cellules solaires utilisables sous concentration : efficacité du refroidissement, motif de la grille, dimensions de celle-ci, résistance de contact. Cette analyse tend à montrer que des niveaux de concentration de l'ordre de 500 sont accessibles à une technologie classique sur silicium et que des objectifs plus ambitieux peuvent être envisagés dans la mesure où seraient résolus les problèmes des résistances des couches métalliques.

Enfin, des générateurs photovoltaïques à concentration susceptibles de convertir 10 % de l'énergie solaire en énergie électrique sont réalisables à partir de principes susmentionnés dans la mesure où les rendements optiques seraient de 85 %, le coefficient de remplissage de 90 % et le rendement de conversion des cellules solaires de l'ordre de 14 % à 25 °C. Cette estimation paraît d'ores et déjà parfaitement réalisable.

Remerciements. — En ce qui concerne le générateur photovoltaïque expérimental, les auteurs tien-

Fig. 10. — Puissance solaire et rendement de quatre modules connectés en série.

[Solar radiant power and efficiency of four modules connected in series.]

nent à mentionner la collaboration du C.N.E.S., de la Soterem, de l'Aérospatiale et remercier pour leurs interventions MM. Mathieu, Molino et Pinna.

Annexe : relations pratiques. — Pour les variations petites de $\Delta V_{EB}(y)$ l'équation (7) admet pour solution :

$$\Delta V_{EB}(y) = \frac{1}{2} \frac{\rho}{W_E} \cdot \left(J_L - J_S \exp \frac{V_{EB}(0)}{U_T} \right) \cdot y^2 = \frac{U_T}{2 \rho^2} \cdot y^2. \quad (A.1)$$

La relation (A.1) donne la répartition du potentiel en surface en fonction de la différence de tension $V_{EB}(0) = V_{EB}(y = 0)$ au centre de l'espace entre les lignes métalliques.

ρ/W_E est la résistance carrée de la couche diffusée.

J_L et J_S sont les densités des courants de court-circuit et de saturation de la diode.

La caractéristique courant-tension modifiée est alors exprimée par la loi :

$$J_T(L-S) = J_L - J_S \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} \frac{C}{L-S} \operatorname{erf} \left(\frac{L-S}{\sqrt{2} \cdot C} \right) \times \exp \left\{ \frac{V}{U_T} + \left(\frac{L-S}{\sqrt{2} \cdot C} \right)^2 \right\}. \quad (A.2)$$

La quantité

$$\frac{1}{C^2} = \frac{\rho}{U_T \cdot W_E} \cdot \left[J_L - J_S \exp \left(\frac{V_{EB}(0)}{U_T} \right) \right]$$

Tableau I. — *Description de l'installation.*

Description	Performances mesurées	Performances réalisables	Coûts en F/m ²
1) Monture 2 axes altazimut associée à un asservissement de poursuite du soleil par senseur, amplificateurs et moto-réducteurs. Positionnement quotidien automatique, poursuite grossière par temps couvert, mise en position de survie par vent fort (80 km/h)	Précision : 4 milliradians		500
2) Panneau en structure treillis supportant les bacs étanches	Surface du panneau $S_p = 12 \text{ m}^2$	$S_p > 50 \text{ m}^2$	
3) Modules étanches comportant profilé d'aluminium pour le refroidissement des cellules	Dimension unitaire : $1 \times 0,17 \times 0,21 \text{ m}$. Poids unitaire 3,2 kg. $\Delta T_{\max} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$		180
4) Concentration par lentilles de Fresnel plastiques $0,15 \times 0,15 \text{ m}$, $f = 0,225 \text{ m}$, $f/D = 1,1$	Rendement énergétique 75 %, rapport de concentration énergétique 42	Limite possible environ 85 %	150
5) Cellules au silicium de surface unitaire = 4 cm^2	Rendement de conversion : 12-13 % à $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 10-11 % à $65 \text{ }^\circ\text{C}$	Limite possible supérieure à 14 %	290
6) Assemblage (3) découpe, pliage, assemblage, peinture			160
7) Assemblage (4) optique-étanchéité			160
8) Assemblage (5) montage thermique montage cellules connexions			160
Coût par watt-crête			15 F/W à 20 F/W

dépend du courant de court-circuit J_L et de la valeur de la tension $V_{EB}(0)$ au point $y = 0$. U_T est le potentiel thermodynamique kT/q .

V est la tension mesurée aux bornes de la cellule solaire :

$$V = V_{EB}(0) - U_T \left(\frac{L - S}{c} \right)^2. \quad (\text{A.3})$$

Le facteur de courbe correspondant devient :

$$\text{F.F.} = \frac{J_M}{V_{OC} \cdot J_L} \left\{ U_T \cdot \text{Log} \left(\frac{J_L - J_M}{J_S \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} \frac{c}{(L - S)} \text{erf} \left(\frac{L - S}{\sqrt{2} \cdot c} \right)} \right) - \frac{(L - S)^2}{2 \cdot W_E} \cdot J_M \right\} \quad (\text{A.4})$$

V_{OC} est la tension de circuit-ouvert ($J_T = 0$) et J_M est le courant au point de puissance maximum :

$$d(V \cdot J_T)/dJ_T = 0.$$

Bibliographie

- [1] REDFIELD, D., Procedure for minimizing the Cost per watt of photovoltaic systems, *R.C.A. Review* (1977) 463-474.
 - [2] NAPOLI, L. S. *et al.*, *R.C.A. Review* **38** (1977) 76-108.
 - [3] ESTEVE, D. *et al.*, 1^{re} Conf. Européenne (D. Reidel Publ., Luxembourg). « *Photovoltaic Solar Energy* » (1977) 360-369.
 - [4] THEREZ, F., *Solid State Electronics* (1977) 941-942.
 - [5] CHANG, C. Y., FANG, Y. K., SZE, S. M., *Solid State Electronics* **14** (1971) 541.
 - [6] DEVANOY, J. R., 8th Annual Proceedings. Reliability physics (Las Vegas, Nevada) 7, 10 avril 1970.
 - [7] ESTEVE, D. *et al.*, « Analysis of a 1 kW photovoltaic generator with concentration ». Proceedings of the 2nd International Solar Forum, Hambourg, juillet 1978.
-