



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION



INTERNATIONAL CENTRE FOR THEORETICAL PHYSICS

34100 TRIESTE (ITALY) - P.O.B. 586 - MIRAMARE - STRADA COSTIERA 11 - TELEPHONES: 224281/23456
CABLE: CENTRATOM - TELEX 460392-I

SMR/112 - 14

IV^o SEMINAIRE SUR L'ENERGIE SOLAIRE

(10 - 21 septembre 1984)

PROPRIETES PHOTOVOLTAIQUES DES COUCHES MINCES
DE SILICIUM AMORPHE

F. DEMICHELIS
Dipartimento di Fisica
Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi 24
10129 Turin
Italie

Proprietés photovoltaïques des couches minces de silicium amorphe.

F. Demichelis^{*}, E. Minetti-Mezzetti, A. Tagliaferro and E. Tresso.
Dipartimento di Fisica del Politecnico di Torino, Italy.

^{*} Gruppo Nazionale Struttura della Materia del C.N.R., U.R., 24.

Résumé

Un model détaillé qui exprime tous les paramètres caractérisant les cellules solaires amorphes en fonction de l'absorption optique en toutes les couches constituant la structure est ici reporté.

Puisque les couches constituant les cellules solaires amorphes, ayant une épaisseur de l'ordre de 1 μ m ou moins, peuvent être considérées couches minces, nous avons assimilé le système à une multicouche interférentielle et avons optimisé les épaisseurs des couches de façon d'avoir le rendement maxime. Avec ce model on peut calculer le rendement théorique d'une quelconque cellule solaire amorphe en fonction des paramètres optiques et électriques.

Ces notes sont préliminaires. Vous trouverez les copies qui vous manquent et des supplémentaires au Bureau 231.

Propriétés photovoltaïques des couches minces de silicium amorphe.

F. Demichelis*, E. Minetti-Mezzetti, A. Tagliaferro and E. Tresso
Dipartimento di Fisica del Politecnico di Torino, Italy.

* Gruppo Nazionale Struttura della Materia del C.N.R., U.R., 24.

Il y a aujourd'hui un remarquable intérêt pour l'étude des propriétés photoélectriques du silicium amorphe hydrogéné / α -Si:H/ qui est employé avec succès dans la technologie des cellules solaires.

Des premières cellules solaires de silicium amorphe réalisées par Carlson et Wronski⁽¹⁾ le 1976 qui avaient un rendement de quelque pourcent on est arrivé maintenant à obtenir des rendements de 9,2% pour cellules solaires de 1 cm²⁽²⁾ et de ~12% pour cellules multicouche du type α -Si/poly c Si⁽³⁾.

Le développement des cellules solaires à silicium amorphe présente essentiellement deux aspects principaux: l'amélioration du matériel et l'optimisation de tous les paramètres caractérisant les cellules solaires.

Le rendement des cellules solaires est limité par plusieurs facteurs tels que la faible qualité électronique des couches dopées qui à son tour est une limitation de la tension de circuit ouvert, les pertes dues aux diverses résistances séries, la recombinaison dans la région de charge spatiale et les pertes optiques qui constituent une partie tout à fait négligeable. Les plus marquantes pertes optiques sont dues à la réflexion aux interfaces, l'absorption réduite dans la couche de silicium absorbant, la transmission à travers les couches conductives et enfin l'absorption associée au substrat.

Il est à remarquer qu'entre la couche de silicium amorphe, qui a une

épaisseur plus petite de 1 μ m, les photons de longueur d'onde comprise entre 0,6 μ m et 0,8 μ m sont peu absorbés. Le flux de ces photons est maximum lorsque la cellule est sous l'éclairement AM1 et AM2. Pour obvier à cet inconvénient on emploie comme contact de base un matériel qu'il ait un élevé coefficient de réflexion de sorte qu'on puisse absorber aussi dans la couche conductive la lumière réfléchie⁽⁴⁾. Une autre possibilité est d'employer des mélanges silicium-germanium Si_x

Ge_{1-x}:H⁽⁵⁾. En effet le germanium a la propriété d'augmenter l'absorption dans le domaine des longueurs d'onde plus élevées.

Les structures des cellules solaires employant le silicium amorphe sont essentiellement: barrière Schottky, métal-isolant-sémiconducteur (MIS), homojonctions pin, multicouches.

En tous cas les couches constituant les cellules solaires, ayant une épaisseur de l'ordre d'1 μ m ou moins peuvent être considérées couches minces. Pour cela nous avons étudié les cellules solaires amorphes, d'un point de vue optique, comme des multicouches interférentielles.

Pour une optimisation du système on doit imposer la condition que soit: facteur de réflexion $R \sim 0$, facteur d'absorption $A \sim 1$ et facteur de transmission $T = 1 - A = 0$ dans tout le domaine spectral des longueurs d'onde qui intéresse.

Il est donc possible optimiser les épaisseurs des différentes couches minces, y compris la couche antireflect (A.R.), lorsqu'on connaît les constantes optiques telles que l'indice optique et le coefficient d'extinction, de sorte que les pertes optiques soient minimales et le photocourant et le rendement soient maximales. Le model que nous présentons est vraiment utile pour l'analyse d'un point de vue optique des cellules solaires amorphes. Avec ce model le rendement théorique d'une quelconque cellule solaire amorphe peut être calculé en fonction des paramètres fondamentaux optique et électrique. Avec un convenable antireflet il est possible obtenir un rendement du 16% pour une structure multicouche du type AR- α Si/poly c Si -Ag et 20% pour AR α -Si/poly c Ge-Ag, sous éclairement AM1.

2. Model d'analyse optique

Pour évaluer l'absorption du rayonnement dans les couches minces (dopé ou non) constituant les cellules solaires, nous avons choisi le model analitique suivant ⁽⁶⁾.

Des équations de Maxwell nous avons que le champ électrique et le champ magnétique associés au vecteur de Poynting, dans une couche j peuvent s'écrire

$$E_j(z,t) = a_j \exp[i(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \kappa_j z + \alpha_j)] + b_j \exp[i(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} \kappa_j z + \beta_j)] \quad (1)$$

$$H_j(z,t) = \kappa_j \left\{ a_j \exp[i(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \kappa_j z + \alpha_j)] - b_j \exp[i(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} \kappa_j z + \beta_j)] \right\} \quad (2)$$

$$\text{où } \kappa_j = n_j - i k_j$$

Pour obtenir les paramètres optiques du système multicouche il faut tenir compte que les composantes essentielles du champ électromagnétique doivent satisfaire les conditions aux limites où equations de passage qui sont données par la théorie électromagnétique c'est à dire qu'elles doivent être continues à travers la surface de séparation des couches.

En imposant la condition de continuité pour les composants des champs électrique et magnétique à l'interface entre deux milieux absorbants, on obtient les formules recourrantes pour les amplitudes a_j et b_j et pour les phases α_j et β_j des champs transmis et réfléchis.

On a donc

$$\left. \begin{aligned} a_j &= \frac{(\phi_j / \bar{\phi}_{j+1}^*) (a_{j+1} \cos \bar{\alpha}_{j+1}^* + b_{j+1} \bar{\phi}_{j+1}^{*2} \cos \bar{\beta}_{j+1}^*) - b_j \phi_j^2 \cos \bar{\beta}_j}{\cos \bar{\alpha}_j} \\ b_j &= -\frac{1}{2} \frac{a_{j+1} (n_{j+1} - n_j) \cos \bar{\alpha}_{j+1}^* - b_{j+1} \bar{\phi}_{j+1}^{*2} (n_{j+1} + n_j) \cos \bar{\beta}_{j+1}^*}{\phi_j \bar{\phi}_{j+1}^* (n_j \cos \bar{\beta}_j + k_j \sin \bar{\beta}_j)} + \\ &\quad + \frac{a_{j+1} (k_{j+1} - k_j) \sin \bar{\alpha}_{j+1}^* - b_{j+1} \bar{\phi}_{j+1}^{*2} (k_{j+1} + k_j) \sin \bar{\beta}_{j+1}^*}{\phi_j \bar{\phi}_{j+1}^* (n_j \cos \bar{\beta}_j + k_j \sin \bar{\beta}_j)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_j &= \arctan \left\{ \frac{(\phi_j / \bar{\phi}_{j+1}^*) (a_{j+1} \sin \bar{\alpha}_{j+1}^* + b_{j+1} \bar{\phi}_{j+1}^{*2} \sin \bar{\beta}_{j+1}^*) - b_j \phi_j^2 \sin \bar{\beta}_j}{(\phi_j / \bar{\phi}_{j+1}^*) (a_{j+1} \cos \bar{\alpha}_{j+1}^* + b_{j+1} \bar{\phi}_{j+1}^{*2} \cos \bar{\beta}_{j+1}^*) - b_j \phi_j^2 \cos \bar{\beta}_j} \right\} + \\ &\quad + \frac{2\pi}{\lambda} n_j z_j \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\beta_j = \arctan \left(\frac{n_j + k_j \omega}{\omega n_j - k_j} \right) - \frac{2\pi}{\lambda} n_j z_j \quad (4)$$

où

$$\bar{\alpha}_j = \alpha_j - \frac{2\pi}{\lambda} n_j z_j \quad \bar{\beta}_j = \beta_j + \frac{2\pi}{\lambda} n_j z_j$$

Si m est le numéro des couches et puisque l'onde réfléchie n'est pas présente dans le substrat on peut imposer les condition $b_{n+1} = \beta_{n+1} = 0$. Pour une déterminée longueur d'onde, le facteur de réflexion R, le facteur de transmission T et le facteur d'absorption A sont donnés par

$$R = \frac{|E_o^r|^2}{|E_o^t|^2} = \frac{b_o^2}{a_o^2}$$

$$T = \frac{n_{m+1} |E_{m+1}|^2}{|E_o^t|^2} = \frac{a_{m+1}^2 n_{m+1} \exp(-\frac{4\pi}{\lambda} z_m k_{m+1})}{a_o^2} \quad (5)$$

$$A = 1 - R - T$$

De la connaissance des facteurs R, T, et A on peut obtenir les coefficients \bar{R} , \bar{T} et \bar{A} ainsi définis

$$\bar{R} = \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_g} R(\lambda) AM1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_g} AM1(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

$$\bar{T} = \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_g} T(\lambda) AM1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_g} AM1(\lambda) d\lambda}$$

$$\bar{A} = \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_g} A(\lambda) AM1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_g} AM1(\lambda) d\lambda}$$

où λ_g est la longueur d'onde de la bande interdite et λ_0 est la plus courte longueur d'onde de la lumière incidente.

La puissance absorbée par unité de surface par la couche j est donnée par

$$P_{abs}^{(j)} = P_{in}^{(j)} - P_{out}^{(j)} \quad (7)$$

où $P_{in}^{(j)}$ et $P_{out}^{(j)}$ sont déduites directement du vecteur de Poynting. Le

coefficient d'absorption de la couche j s'écrit

$$A_{absj} = \frac{P_{in}^{(j)} - P_{in}^{(j+1)}}{P_0^t} \quad (8)$$

où

$$P_0^t = \frac{1}{2} |E_0^t|^2 \quad (9)$$

est la puissance du rayonnement incident par unité de surface.

Le numéro des photons absorbés dans la couche j ayant une épaisseur L_j peut s'écrire

$$N_{absj} = A_{absj}(\lambda, L_j) \cdot AM1(\lambda) \cdot \frac{\lambda}{hc} \quad (10)$$

où air masse 1 (AM1) est l'éclairement exprimé en watt/m² μm.

Si l'on suppose que chaque photon absorbé produit une charge, la densité de photocourant s'écrit

$$J_{sc} = \int_{\lambda_0}^{\lambda_g} \sum_{j=1} q N_{absj}(\lambda, L_j) \cdot f(\lambda, L_j) d\lambda \quad (10a)$$

où $f(\lambda, L_j)$ est le facteur de non-récombinaison. Le rendement quantique spectral $\eta(\lambda)$, si $N(\lambda)$ est la densité des photons incidents, s'écrit

$$\eta(\lambda) = J_{sc} / \int_{\lambda_0}^{\lambda_g} q N(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

Pour calculer le rendement de conversion il faut utiliser les équations caractéristiques du diode suivantes:

$$I = -\frac{V}{R_s + R_{sh}} + \frac{R_{sh}}{R_s + R_{sh}} I_{sc} - \frac{R_{sh}}{R_s + R_{sh}} I_0 \left[e^{\frac{q(V + R_s I)}{m k T}} - 1 \right] \quad (12)$$

$$V_{oc} = \frac{m k T}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right)$$

où $I_{sc} = J_{sc} A_1$ et $I = J A_0$ tot

I_0 , m , k , T , R_s , R_{sh} , A_1 et A_{tot} représentent respectivement le courant inverse de saturation, le facteur de qualité du diode, la constante de Boltzmann, la température absolue, la résistance de shunt, A_1 la surface éclairée et A_0 la surface totale de la cellule solaire.

La densité de courant inverse de saturation pour une cellule solaire de silicium amorphe α-Si:H est donnée par (8)

$$J_0 = q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} + q \frac{D_p}{L_p} n_{i0} \quad (13)$$

où

$$n_{p0} = n_{i0} \exp \left[-q V_{bi} / k T \right]$$

$$V_{bi} = \frac{k T}{q} \ln \left(\frac{N_a}{n_{i0}} \right)$$

et pour les hétérojonctions

$$J_0 = \frac{J_{sc} \cdot A_e / A_{tot}}{\exp(qV_{oc}/mKT) - 1}$$

où J_{sc} est donnée par l'équation (10a) et la tension de circuit ouvert est obtenue des caractéristiques expérimentales courant-tension.

Il est à remarquer que le rendement dépend considérablement de l'absorption du rayonnement dans les couches conductives. Ce fait est bien tenu en compte dans le modèle exposé.

3. Résultats

Nous avons appliqué ce modèle à plusieurs structures de couches minces: barrière Schottky, jonction pin α -Si:H, multicouches α -Si/poly-c Si et α -Si/poly-c Ge. Nous avons choisi l'argent comme contact de base pour son élevé coefficient de réflexion dans l'infrarouge.

Les courbes représentent l'absorption et la réflexion intégrées pour toute la région de la réponse spectrale de la cellule en fonction de l'épaisseur d'une cellule pin α -Si:H optimisée pour l'antireflet sont montrées sur la Fig.1, avec celles d'une cellule constituée par un mélange α -Si_{0.48}Ge_{0.52}H. On peut observer que l'épaisseur doit être comprise entre 0.5 μ m et 1 μ m pour les deux types.

Les courbes des coefficients d'absorption et de réflexion spectrales pour les mêmes cellules ont l'aspect représenté sur la Fig.2; on peut déduire que la réponse spectrale augmente avec les longueurs d'onde lorsqu'on introduit le germanium.

Le photocourant de court circuit en fonction de l'épaisseur des couches est représenté, pour trois types de cellules solaires optimisés, sur la Fig.3. La courbe a) est relative à une cellule pin α -Si:H. L'épaisseur

de la couche dopée p ($N_d=10^{19}$, $N_a=10^{13}$) est de 0,0095 μ m; la couche dopée n a la même épaisseur mais les niveaux de dopage inversés ($N_d=10^{13}$, $N_a=10^{19}$). La courbe b) est relative à une cellule solaire α -Si_{0.48}Ge_{0.52}H. L'épaisseur des couches dopées p et n est 0,0245 μ m et les niveaux de dopage sont les mêmes de la cellule représentée par la courbe a). La courbe c) enfin est relative à une multicouche n-i-p α -Si/n α -Si/p poly c Ge ayant les suivantes épaisseurs: 0.50 μ m pour α -Si:H(nip), 0,40 μ m pour n α -Si:H et 2 μ m pour poly-c Ge.

En comparant les trois courbes on déduit que le photocourant est plus élevée dans les cellules avec du germanium grâce à la rendement de récolte du germanium dans la région des longueurs d'onde élevées.

On peut observer sur la Fig.4 on la valeur du rendement de récolte $\eta(\lambda)$ en fonction de la longueur d'onde est montré pour trois types de structures, solaires sous éclairage AM1, et précisément

a) α -Si:H ; b) α -Si_{0.45}-Ge_{0.52}H ; c) α -SiH/poly c Ge.

Un sommaire des résultats obtenus en appliquant le modèle d'optimisation décrit ici dessus est représenté sur le Tableau I

4 Conclusions

La méthode que nous avons décrite et qui consiste essentiellement à exprimer les paramètres caractérisant les cellules solaires c'est à dire, le photocourant, le rendement, la tension de circuit ouvert, le fill factor en fonction du paramètre optique qui est l'absorption en toutes les couches minces constituant la structure, permet d'obtenir des résultats qui répondent bien aux résultats expérimentaux.

L'optimisation des épaisseurs des couches conductives et de l'antireflet nous donne un accroissement du photocourant et par suite du rendement de la structure. Un accroissement de ces grandeurs est aussi obtenu

lorsqu'on utilise comme matériel amorphe, en plus du silicium, le germanium, qui, ayant une valeur de la largeur de bande interdite plus petite que celle de silicium, augmente la response spectrale aux longueurs d'onde plus élevées.

En tous cas l'emploi de cette méthode à l'optimisation de l'épaisseur des couches minces fournit le rendement limite théorique pour n'importe quelle structure on doit considerer.

Références

- (1) D.E. Carlson and C.R. Wronski - Appl.Phys.Lett. 28, 671, (1976).
- (2) H.Sakai, M.Kamiyama, M.Ueno, Y.Uchida and H.Haruki - 5th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference - Kavouri (Grece) p.808 (1983).
- (3) K.Okuda, H.Okamoto and Y.Hamakawa - Japan Journ. of Appl.Phys.22, L 605, (1983).
- (4) W. den Boer and M.Ondris. Sol. Cells, 2, 261, (1980).
- (5) Y.Kuwano, M.Ohmishi, H.Wishiwaki, S.Taude, T.Fukatsu, K.Enomoto, Y.Nakashima and H.Tarni-Proc. 16th Photovoltaic Specialists Conf. San Diego, CA. September 27-30, 1982, IEEE, NewYork, 1982, p.1338.
- (6) F.Demichelis, A.Tagliaferro and E.Tresso - Solar Cells 11, 375, (1984).
- (7) F.Demichelis, E.Minetti-Mezzetti, A.Tagliaferro and E.Tresso - Journ. of Appl.Phys. 55, 3140 (1984).
- (8) M.K.Han, P.Sung, W.A. Anderson - IEEE Electron Device Letters, 3, 121, (1982).

Légendes

Fig.1 absorption \bar{A} et reflection \bar{R} intégrées sur la région de réponse spectrale d'une cellule α -Si_{0.48}Ge_{0.52}:H (1) et d'une cellule pin α -Si:H (2) en fonction de l'épaisseur de la couche semiconductrice

Fig.2 absorption A et reflection R en fonction de la longueur d'onde pour les mêmes cellules qu'à la Fig.1

Fig.3 photocourant de court circuit en fonction de l'épaisseur de la couche semiconductrice pour les cellules α -Si_{0.48}Ge_{0.52}:H (1) et pin α -Si:H (2) et d'une cellule α -Si:H/poly c Ge (3) en fonction de la couche de germanium

Fig.4 rendement spectral de récolte $\eta(\lambda)$ sous éclaircissement AM1 pour (a) pin α -Si:H (b) α -Si_{0.48}Ge_{0.52}:H (c) α -Si:H / poly c Ge

Tableau I

Structures	Pertes (%) optiques	J _{sc2} (mA/cm ²)	V _{oc} (Volt)	FF (%)	η (%)
pin α -Si:H	30.1	8.68	0.90	71.3	5.39
α -Si _{0.48} Ge _{0.52} :H	9.7	13.21	0.73	67.9	7.92
α -Si:H/poly c Ge	9.9	19.30	1.40	74.0	19.90

Fig.2 F.Demichelis, E.Minetti-Mezzetti, A.Tagliaferro, E.Tresso "Proprietés photovoltaïques....."

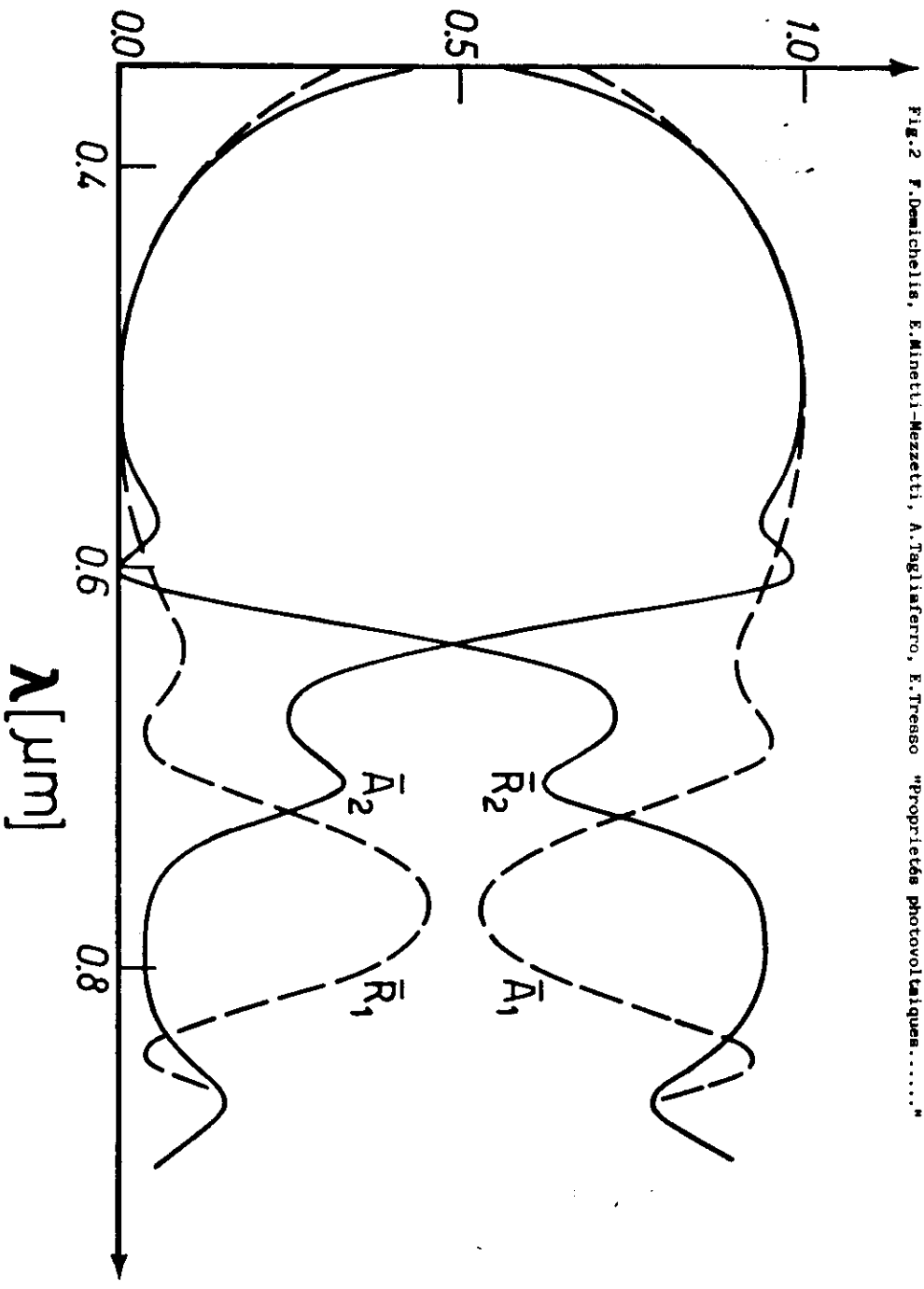


Fig.1 F.Demichelis, E.Minetti-Mezzetti, A.Tagliaferro, E.Tresso "Proprietés photovoltaïques....."

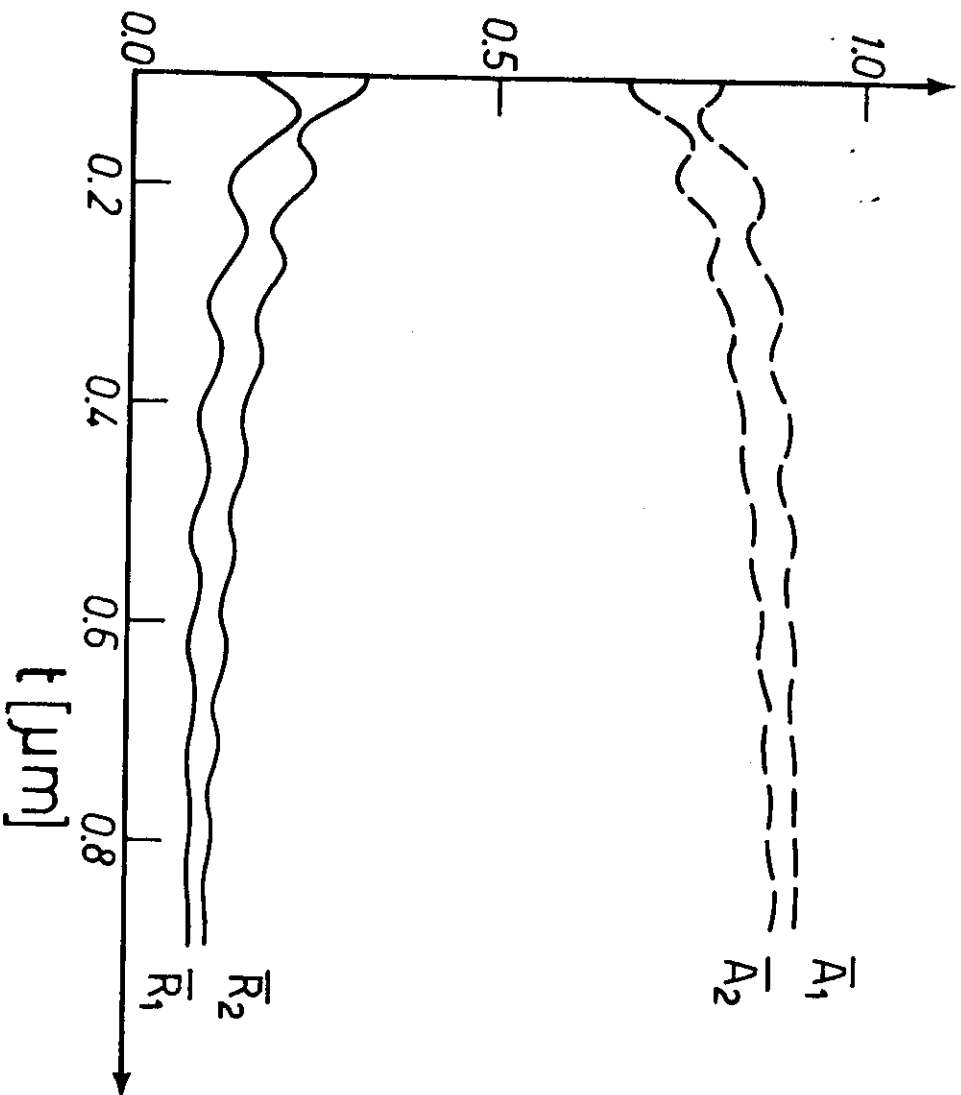


Fig.4 F.Denichella, E.Minetti-Mezzetti, A.Tagliaferro, E.Tresso "Proprietés photovoltaiques....."

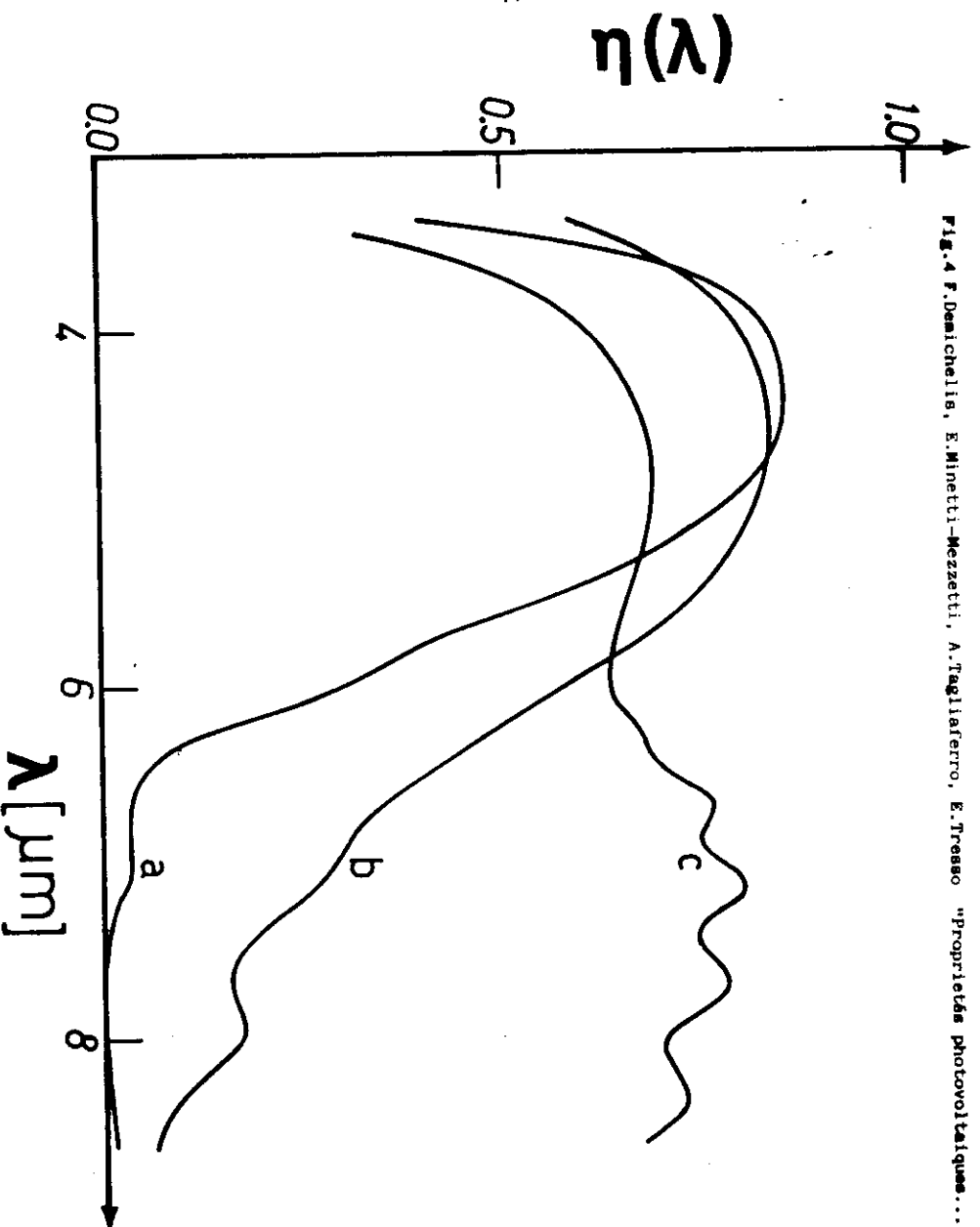


Fig.3 F.Denichella, E.Minetti-Mezzetti, A.Tagliaferro, E.Tresso "Proprietés photovoltaiques....."

