

Physique des photopiles

par Pierre MIALHE, Lyon.

Résumé :

En partant de la structure de l'iode, le schéma de principe d'une photopile est introduit. Une étude physique des phénomènes d'absorption d'énergie lumineuse, de diffusion et de recombinaison des porteurs de charge conduit à la conception de la structure des photopiles commerciales. Les perspectives d'utilisation sont ensuite rapidement discutées.

Introduction :

Le Soleil envoie sur Terre, en une journée, une énergie rayonnante suffisante pour satisfaire pendant un demi-siècle les besoins des hommes.

Distribuée sur une grande surface et variable le long des journées, cette énergie est difficile à transformer en énergie électrique directement utilisable par notre société industrialisée.

Les photopiles réalisent cette transformation : proposons une étude physique permettant de découvrir la structure de ces composants et d'en concevoir les limites des performances.

1. JONCTION *n-p*.

Sur la fig. 1 est représentée une jonction *n-p* schématisée avec une zone de transition de largeur *W*, les répartitions des charges électriques et du potentiel.

Une première approximation du potentiel de diffusion V_d peut être exprimée en fonction des concentrations en atomes donneurs N_d et en atomes accepteurs N_a :

$$V_d = (kT/e) \ln (N_d \cdot N_a / n_i^2) \quad (1)$$

(pour le silicium $V_d = 0,69$ V à 300 K pour :

$$N_d = N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ avec } n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}).$$

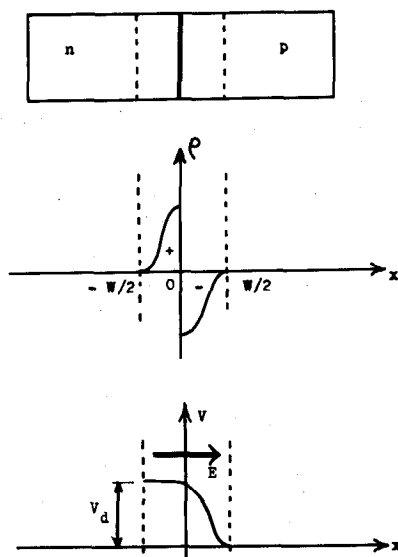


Fig. 1

Cet équilibre a été obtenu par l'égalisation du flux de diffusion et du flux de conduction (action du champ électrique $\vec{E}$ dans la zone de transition) de chaque type de porteurs : les flux respectifs j_d et j_c sont représentés sur la fig. 2.

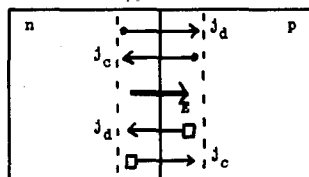


Fig. 2

(Le champ électrique dans cette zone de transition est de l'ordre de 10^6 Vm^{-1} .)

2. PHOTOPILE : PRINCIPE.

Réalisons une photopile en déposant des électrodes métalliques sur les 2 faces d'une jonction (fig. 3) ; une face (par exemple côté n) est exposée au Soleil : l'électrode déposée est constituée par une fine grille pour laisser passer les rayons solaires ; un résistor R et un ampèremètre constituent le circuit électrique reliant ces électrodes.

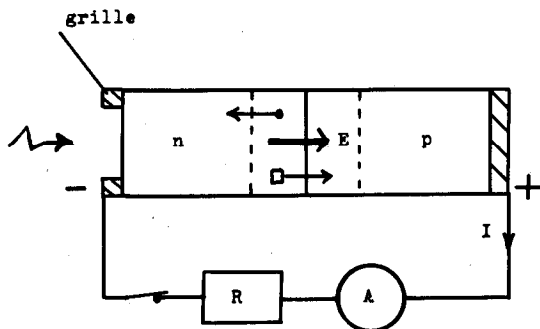


Fig. 3

Nous observons un courant électrique d'intensité I : l'absorption de photons par le semi-conducteur crée des paires électrons-trous, l'énergie absorbée permet à des électrons de passer de la bande de valence dans la bande de conduction du semi-conducteur ; dans chaque zone (n ou p) l'apparition de ces paires électron-trou en grand nombre modifie très largement les densités des porteurs minoritaires, la variation des densités des porteurs majoritaires n'étant pas sensible puisque ces densités sont très grandes ($\geq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) pour les semi-conducteurs extrinsèques utilisés. Ces porteurs se déplacent dans le semi-conducteur (diffusion et entraînement par des champs locaux) et ont tendance à se recombiner. Considérons une paire créée dans la zone de transition (ou ayant atteint cette zone) : le champ électrique $\vec{E}$ exerce, sur un électron et sur un trou, des forces opposées et sépare donc ces porteurs en imposant aux électrons un mouvement vers la gauche (fig. 3) et aux trous un mouvement vers la droite : nous concevons ainsi l'apparition d'un courant électrique, mesuré par l'ampèremètre ; il est très généralement appelé « courant photoélectronique » (noté I_{ph}) et provient de la diffusion et de l'entraînement (s'il existe un champ électrique) des porteurs minoritaires à l'intérieur de chaque zone.

Plusieurs modèles sont développés dans la littérature pour obtenir une expression analytique de ce courant I_{ph} : supposons des conditions idéales :

- i) la photopile de surface effective S (exposée au Soleil) reçoit le rayonnement solaire normal le plus intense sur Terre (1 kWm^{-2}),
- ii) ce rayonnement est totalement absorbé,
- iii) chaque photon absorbé crée une paire électron-trou,

iiii) chaque porteur ainsi créé participe au courant photoélectronique : le courant photoélectronique est alors défini par le nombre de photons absorbés ; pour le silicium, il a une valeur de 45 mA.cm^{-2} .

A ce point de la description, il est possible d'introduire un schéma équivalent d'une photopile idéale sous la forme d'un générateur de courant avec pour admittance la diode parfaite constituée par la jonction $n-p$, fig. 4.

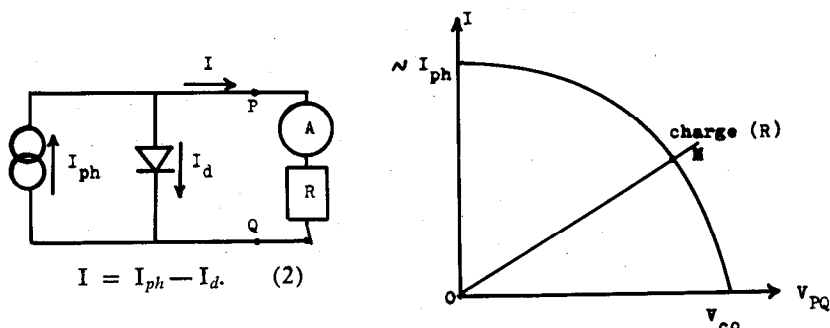


Fig. 4. — Schéma équivalent, photopile idéale ;

caractéristique d'une photopile :

$$S = 4 \text{ cm}^2, \quad I_{ph} \sim 120 \text{ mA}, \quad V_{co} \sim 570 \text{ mV}.$$

Notons que la valeur de la tension en circuit ouvert (V_{co}) d'une photopile est fortement variable avec la température : $dV_{co}/dT \sim -2 \text{ mV K}^{-1}$; pour le courant photoélectronique (I_{ph}) les mesures conduisent à : $dI_{ph}/dT \sim 0,3 \text{ mA K}^{-1}$.

3. MATERIAUX UTILISES : EXEMPLE, SILICIUM MONOCRISTALLIN.

Les photopiles commercialisées actuellement avec un rendement voisin de 12 % sont réalisées avec du silicium monocristallin de haute pureté (la part due à la fabrication de ce matériau dans le prix de revient d'une photopile est voisine de 35 % !) Des impuretés et des dislocations existent dans les cristaux ; elles proviennent de la matière première utilisée pour tirer les monocristaux de silicium, des procédés de fonderie et de diffusion, de la pureté des composés utilisés pour rendre extrinsèques les semi-conducteurs. La concentration en impuretés est de l'ordre de 10^{-2} atomes par million pour des éléments particulièrement nocifs tels que Fe, Ti, V, Cr et de l'ordre de quelques atomes par million pour des éléments tels que Al, C, O dont la présence à ces concentrations est tolérable ; les dislocations provenant de

contraintes locales et de gradients de température durant la préparation des cristaux (surtout en couches minces), souvent localisées à proximité des impuretés et à la surface ont une densité d'environ 10^5 cm^{-2} . Impuretés et dislocations modifient localement la structure de bande des semi-conducteurs, créent des charges électriques en excès, de nouveaux niveaux d'énergie apparaissent. Il est possible d'améliorer la pureté du silicium et la qualité des cristaux (ce qui est réalisé pour le silicium dit de qualité « électronique ») mais avec une forte augmentation du prix de revient du matériau et alors une large répercussion sur celui des photopiles, encore trop élevé pour que le marché se développe de façon importante.

4. COEFFICIENT D'ABSORPTION DU SILICIUM MONOCRISTALLIN.

Seuls les photons d'énergie supérieure à la largeur de la bande interdite (1,12 eV pour le silicium à 300 K) peuvent être absorbés. La loi de l'absorption d'un flux lumineux ϕ en fonction de la profondeur x de pénétration dans le semi-conducteur est exponentiel :

$$\phi_x = \phi_0 \cdot \exp(-\alpha(\lambda, T) \cdot x) \quad (3)$$

$\alpha(\lambda, T)$ étant le coefficient d'absorption.

La densité spectrale d'énergie du rayonnement solaire est la plus importante entre $0,4 \mu\text{m}$ et $1,0 \mu\text{m}$; dans ce domaine de longueur d'onde, le coefficient d'absorption du silicium pur, à 300 K, varie de $8 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ à 10^2 cm^{-1} ; il faut donc une grande épaisseur de silicium pour absorber tout le rayonnement solaire utile : une épaisseur de $220 \mu\text{m}$ est nécessaire pour en absorber 95 %. Cette valeur définit donc l'épaisseur minimale d'une photopile en silicium cristallin. (Notons pour information que le coefficient d'absorption du silicium amorphe est très supérieur à celui du silicium cristallin, surtout dans le domaine de forte densité énergétique de l'émission solaire ; la réalisation de photopiles peut ainsi être envisagée en couche mince de quelques μm d'épaisseur).

Le coefficient d'absorption $\alpha(\lambda, T)$ ne dépend que faiblement de la concentration en atomes donneurs ou accepteurs pour les ordres de grandeur utilisés.

5. ABSORPTION ET DIFFUSION.

Pour être séparée et ainsi participer à augmenter le courant photoélectronique, une paire électron-trou doit atteindre la zone de transition. Au cours de ce déplacement, électrons et trous ont tendance à se recombiner ensemble ou par l'intermédiaire de défauts de structure (impuretés et dislocations) dans la masse du

semi-conducteur et aussi en surface ; la distance moyenne parcourue appelée longueur de diffusion ($L_{n \text{ ou } p}$) caractérise ce mouvement (de façon similaire, une durée de vie peut être définie).

Une grande longueur de diffusion (grande durée de vie) est recherchée pour corrélativement que la probabilité de recombinaison des porteurs soit faible. La longueur de diffusion diminue lorsque le nombre d'impuretés et de dislocations augmente et aussi lorsque les concentrations en atomes donneurs (ou accepteurs) augmentent (fig. 5).

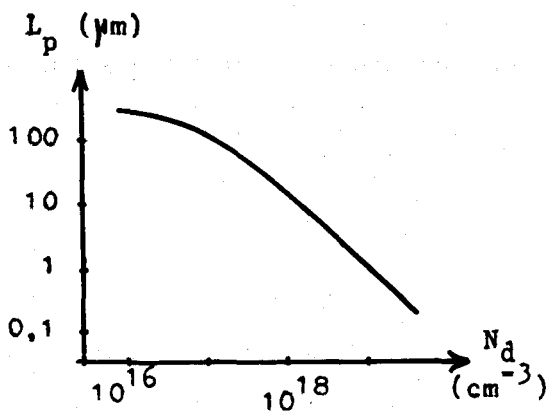


Fig. 5

L'absorption étant représentée par une loi exponentielle (3), la plus grande densité de paires est créée au voisinage de la surface de la photopile (plus de la moitié des photons incidents est absorbée après la traversée d'une épaisseur de $4 \mu\text{m}$ de silicium cristallin). La jonction doit donc être réalisée très près de la surface de la photopile pour drainer pratiquement toutes les paires créées dans cette zone. Cette zone constituant la surface de la photopile exposée au rayonnement solaire est souvent appelée « émetteur » de la photopile, la deuxième partie de la jonction (type p si l'émetteur est de type n) est appelée la « base » de la photopile.

6. SEMI-CONDUCTEURS DE TYPE n^+ (ET p^+).

Pour un générateur, la tension en circuit ouvert (V_{co}) est une caractéristique : pour une photopile V_{co} provient de la barrière de potentiel représentée par V_d dans la fig. 1 ; l'expression de V_d , équation 1, montre que cette barrière de potentiel peut être augmentée en utilisant des semi-conducteurs fortement dopés (N_d et N_a grands). Pour la réalisation des photopiles, des émetteurs

fortement dopés sont utilisés : N_d ou N_a de l'ordre de 10^{20} cm^{-3} (soit environ 6 % en atomes), on parle de semi-conducteurs de type n^+ (ou p^+). L'expérience montre que pour ces valeurs, V_{co} passe par une valeur maximale ; la relation (1) semble prévoir une augmentation régulière de V_d par exemple avec N_d : en fait, pour des concentrations en atomes donneurs supérieures à $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, il est possible de montrer que le semi-conducteur de type n devient dégénéré, il y a interpénétration des niveaux donneurs dans la bande de conduction, les surfaces de FERMI ne sont plus définissables, un aspect de structure de métal apparaît.

Ces fortes concentrations sont aussi favorables à la diminution du courant de saturation inverse (I_0) de la diode ; en effet, une étude élémentaire des phénomènes de diffusion dans une diode montre que le courant de diffusion est proportionnel à $1/N_d$ (ou $1/N_a$) ; l'utilisation d'un émetteur de type n^+ (ou p^+) permet de diminuer I_d qui est proportionnel à I_0 et donc d'augmenter le courant I délivré à la charge par la photopile (équation 2).

En pratique, pour obtenir ces fortes concentrations N_d ou N_a , il est réalisé à partir de la surface de l'émetteur, une diffusion d'atomes (en général P, As, Sb, Bi pour les donneurs ou B, Al, Ga, In pour les accepteurs) ; un gradient de concentration apparaît donc dans cette zone et consécutivement un champ électrique tout au long de l'émetteur : ce champ de même sens que celui de la zone de charge d'espace a 2 effets « bénéfiques » : d'une part, il aide à repousser les porteurs minoritaires vers la zone de transition et, d'autre part, il apporte une contribution à l'augmentation de la valeur du potentiel de diffusion V_d , donc de la valeur de V_{co} .

7. PHENOMENES DE RECOMBINAISON : STRUCTURE INTERNE D'UNE PHOTOPILE.

La fig. 5 montre pour les concentrations en atomes donneurs (ou accepteurs) utilisées dans les émetteurs de type n^+ (ou p^+) que la longueur de diffusion des porteurs minoritaires est inférieure à $1 \mu\text{m}$; la recombinaison des paires électron-trou créées par absorption des photons est donc grande dans une zone n^+ ou p^+ de simplement quelques μm d'épaisseur ; cette donnée impose deux conséquences pour la structure d'une photopile :

- i) émetteur : il est constitué par une zone de type n^+ ou p^+ de très faible épaisseur, de l'ordre de $0,3 \mu\text{m}$; ainsi la recombinaison est pratiquement nulle à l'intérieur de l'émetteur (structure) soumise au rayonnement lumineux et aussi à la surface au contact grille-émetteur. Pour éliminer cette recombinaison à la surface libre, une mince couche d'un

oxyde (SiO_2) est déposée sur la surface (les défauts de surface sont passivés : occupation des valences libres). Il a été souligné que le gradient de concentration dans ces zones n^+ ou p^+ aide à diminuer la recombinaison en surface en repoussant vers la jonction les porteurs minoritaires. L'amélioration des contacts grille-émetteur (matériaux utilisés, technologie) doit permettre d'éliminer totalement l'influence des phénomènes de recombinaison dans l'émetteur ;

- ii) base : la « capacité » d'absorption du silicium a montré la nécessité d'une épaisseur totale des photopiles (en silicium) d'au moins $220\text{ }\mu\text{m}$ (sous peine de perdre — *a priori* — une partie de l'énergie solaire incidente). L'épaisseur, inférieure à $1\text{ }\mu\text{m}$, de l'émetteur impose donc l'épaisseur minimale de la base de l'ordre de $220\text{ }\mu\text{m}$. Dès lors, il faut renoncer à utiliser, pour la base d'une telle photopile, des semi-conducteurs de type n^+ ou p^+ : avec une longueur de diffusion voisine de $1\text{ }\mu\text{m}$, la grande recombinaison éliminerait toute contribution de la base au courant photoélectronique ; l'épaisseur définie impose un matériau dans lequel la longueur de diffusion des porteurs minoritaires est de $200\text{ }\mu\text{m}$ à $300\text{ }\mu\text{m}$. Un compromis est réalisé en utilisant une base (p ou n) contenant une concentration en atomes accepteurs ou donneurs voisine de 10^{17} cm^{-3} (fig. 5).

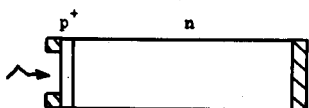
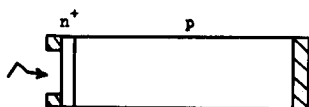
C'est donc la structure de la base des photopiles en silicium cristallin qui semble imposer une limite à leurs performances (bien sûr, une recombinaison importante existe aussi sur la face arrière au contact base-électrode).

Cette étude aboutit à des structures $n^+ - p$ ou $p^+ - n$ pour les photopiles en silicium cristallin constituées par une homojonction émetteur-base. (Notons la présence sur la surface de l'émetteur d'une couche dite antiréfléchissante, l'indice optique du silicium varie de 6 à 3,5 pour des longueurs d'onde de $0,4\text{ }\mu\text{m}$ à $1\text{ }\mu\text{m}$).

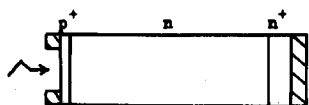
8. DIVERSES STRUCTURES RENCONTREES.

L'étude précédente fournit les informations permettant de comprendre les directives qui ont conduit à proposer les structures schématisées ci-après :

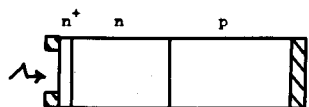
- * conventionnelles : peut-être faut-il préférer, pour une utilisation normale, la structure $n^+ - p$: la recombinaison étant à dopage égal plus grande dans une zone p que dans une zone n (l'émetteur étant passif dans les 2 cas, de ce point de vue) ;



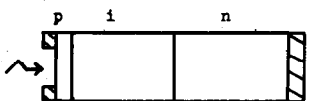
- * B.S.F. (back-surface-field) : la couche n^+ à l'arrière repousse (gradient de concentration) les porteurs minoritaires, diminue fortement la recombinaison sur la face arrière et peut participer à une augmentation de V_{co} ;



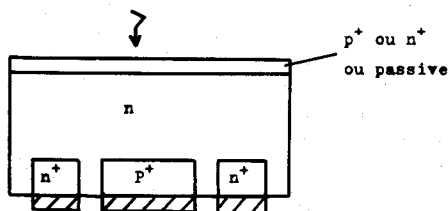
- * H.L.E. (high-low-emitter) : augmentation de la largeur de la zone de transition ;



- * $p-i-n$ (p , intrinsèque, n) ... réponse plus rapide ;



- * particulières : cette disposition des électrodes permet d'éviter l'effet d'ombre produit par la grille déposée sur l'émetteur ; la résistance plus faible permet de meilleures performances pour une utilisation avec des concentrateurs d'énergie lumineuse.



9. PERSPECTIVES.

Une étude complète des phénomènes physiques décrits précédemment conduit à prévoir une limite supérieure du rendement des photopiles au silicium voisine de 2 %.

Le développement futur du marché des photopiles semble, bien entendu, déterminé par le prix de revient de l'énergie produite. Une autre donnée provient de la faible valeur moyenne (le long des journées ensoleillées même en des lieux privilégiés) de la puissance reçue sur Terre ($\sim 0,7 \text{ kWm}^{-2}$) qui impose de grandes surfaces de photopiles pour recueillir une énergie importante. Il ne semble possible de concevoir un marché rentable qu'avec l'utilisation de photopiles de rendement très supérieur à 10 %.

Le prix de revient des fabrications sera diminué par une production en grande quantité et l'évolution des technologies doit permettre de produire des photopiles de rendement plus élevé que celui des photopiles commercialisées actuellement.

Des photopiles en silicium polycristallin sont produites industriellement mais encore avec des rendements faibles et sans diminution de prix comparé à celui des photopiles à base de silicium monocristallin : l'amélioration sera possible après une meilleure compréhension des phénomènes physiques dans un tel matériau (rôle des impuretés et des défauts, dislocation, dimension des micro-cristaux...).

De gros investissements actuels conduisent à un développement des recherches pour la réalisation de photopiles en silicium amorphe [grand coefficient d'absorption : couches minces (utilisation de moins de matière)] mais le rendement de ces photopiles commercialisées est encore inférieur à 5 % et la dégradation semble rapide.

Certainement un développement des structures en couche très mince (de l'ordre de $1 \mu\text{m}$) est-il probable avec des matériaux à fort coefficient d'absorption et en utilisant des hétérojonctions telles que CdS - CdTe, CdS - Cu_2S ,...

L'utilisation des photopiles avec des concentrateurs d'énergie rayonnante nécessite le refroidissement des photopiles : en effet, dès que la température augmente (concentration mais aussi pertes Joule importantes avec des courants de fortes intensités), le rendement diminue fortement. Il faut alors envisager un tel fonctionnement sous concentration couplé avec un système de refroidissement récupérateur d'énergie ; dans ce domaine, la phase de l'expérimentation est à peine amorcée.

DOCUMENTATION

Ouvrages généraux

- C. KITTEL. — « *Introduction à la physique de l'état solide* » (Dunod, Paris 1958).
- S. M. SZE. — « *Principles of semiconductor devices* » (J. Wiley, New York 1981).
- H. J. HOVEL. — « *Semiconductors and semimetals* ». 11 (Academic Press, New York 1975).

Articles généraux

- M. RODOT. — « *Cristallin silicon as a material for solar cells* ». Adv. in Solar Energy, 1, 133-73, 1983.
- R. N. HALL. — « *Silicon photovoltaic cells* ». Solid-State Electron. 24, 595-616, 1981.
- J. B. TUCKER. — « *Solar power* ». High Technology 4, 44-51, 1984.
- H. T. WEAVER. — « *Low-high junctions solar cells* ». Solar Cells 5, 275-92, 1982.
- F. DESVIGNES. — « *Effet photovoltaïque et photopiles solaires* ». B.U.P. 492 1-32, 1966.
- A. JOUSSEN-LENOIR. — « *Et les photopiles ?* » B.U.P. 660, 433-53, 1984.
-