

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 80 27484

(54) Cellule solaire photovoltaïque à jonctions multiples et haut rendement.

(51) Classification internationale (Int. Cl. ³). H 01 L 31/06.

(22) Date de dépôt..... 24 décembre 1980.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée : *EUA, 31 décembre 1979, n° 06/108 767.*

(41) Date de la mise à la disposition du
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 27 du 3-7-1981.

(71) Déposant : Société dite : CHEVRON RESEARCH COMPANY, résidant aux EUA.

(72) Invention de : Lewis M. Fraas.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Rinuy, Santarelli,
14, av. de la Grande-Armée, 75017 Paris.

1.

L'invention concerne la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, et plus particulièrement une cellule photovoltaïque à couches multiples, réalisant cette conversion avec un rendement élevé.

5 Plusieurs formes de cellules photovoltaïques ont été développées pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Cependant, le rendement des systèmes connus est bas et, lorsqu'on améliore le rendement par l'utilisation de convertisseurs plus efficaces, le coût de ces convertisseurs
10 s'élève. On a essayé de diminuer le coût de conversion et d'accroître le rendement de conversion en concentrant l'énergie solaire au moyen de systèmes optiques, sur les convertisseurs. Dans ces systèmes, le rendement de conversion peut encore être augmenté. Si l'on considère le coût de chacun
15 des éléments d'un système de conversion, on s'aperçoit que des éléments de concentration de la lumière permettent d'utiliser des convertisseurs photovoltaïques plus coûteux, mais que des limites économiques sont cependant imposées au système de concentration. En outre, lorsque la concentration de la
20 lumière arrivant au convertisseur augmente d'intensité, il devient nécessaire de dissiper l'échauffement résultant de la lumière concentrée, car le rendement de certains convertisseurs chute lorsque la température augmente.

Une étude des considérations indiquées ci-dessus
25 permet de montrer que, avec l'utilisation de systèmes de concentration qui font diminuer le coût de la conversion d'énergie en augmentant le rendement de cette conversion, il est possible de transférer le point important afin de le faire passer du coût de la cellule du convertisseur au rendement de
30 la cellule. Ainsi, si le rendement de la cellule peut être porté à une valeur suffisamment élevée, un système à concentration peut produire de l'électricité à meilleur marché que la même surface d'un réseau de prix inférieur.

Ces observations conduisent à considérer des
35 piles solaires à jonctions multiples empilées, à haut rendement, réagissant chacune à une bande d'énergie différente du rayonnement solaire et équipées chacune d'un élément destiné à concentrer l'énergie et à agir sur la cellule afin qu'elle

2.

suive la source d'énergie. Cependant, un critère primordial et indispensable au fonctionnement satisfaisant d'une pile solaire à jonctions multiples superposées est que les jonctions superposées soient interconnectées en série par des interfaces à faible résistance afin de permettre le passage du courant, résultant de la lumière, d'une jonction à l'autre.

Des cellules photovoltaïques à couches multiples ont été essayées comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Une forme d'une telle cellule est décrite dans la demande de brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 52 707, déposée le 28 juin 1979 sous le titre "Multijunction Photovoltaic Solar Cell". La présente invention a trait à une cellule photovoltaïque à couches multiples constituée d'empilages de cellules à homojonction et d'une couche de semiconducteur placée à l'interface de la jonction de court-circuit entre les couches de la cellule.

On a également suggéré, pour les cellules photovoltaïques à couches multiples de l'art antérieur, de réaliser des couches successives en matières semiconductrices réagissant à différentes bandes d'énergie interdites comme décrit dans le brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 4 017 332. Dans la cellule selon l'invention, on choisit plusieurs couches de manière qu'elles réagissent à des bandes d'énergie interdites différentes, toutes sensiblement au même niveau de courant, en évitant particulièrement la bande interdite d'énergie lumineuse affectée par des variations d'humidité et des masses d'air, et on dispose, entre les couches, une mince couche intermédiaire de jonction tunnel, à réseau accordé et faible écart énergétique.

La cellule photovoltaïque selon l'invention se distingue des cellules antérieures par l'absence spécifique d'une jonction dans le substrat, par la présence, en outre, de couches à réseau accordé avec le substrat et contenant des homojonctions, et en outre par l'addition d'une couche semiconductrice à l'interface de la jonction de court-circuit entre les couches de la cellule afin de produire la conversion électrique souhaitée avec le rendement souhaité.

L'idée d'obtenir des rendements de conversion d'énergie très élevés par la superposition optique de piles solaires ayant des bandes d'énergie interdites différentes est connue. Cependant, une motivation supplémentaire apparaît lorsque l'on pense à fabriquer un tel empilage de piles solaires sous une forme monolithique, sur un seul support. Cette motivation résulte des applications spatiales, car un support unique est plus léger qu'un empilage de plusieurs supports, ainsi que d'applications terrestres utilisant des systèmes de concentration, car un seul support risque d'être moins coûteux, plus simple et plus facile à refroidir qu'un empilage de plusieurs supports. Cependant, des limitations importantes affectent la conception et la fabrication d'une telle pile solaire à empilage monolithique et jonctions multiples et à haut rendement. Deux des limitations affectant la conception sont, tout d'abord, que les matières semi-conductrices différentes constituant l'empilage aient leurs réseaux pratiquement accordés afin que l'intégrité cristalline puisse être maintenue et, en second lieu, si une jonction photosensible doit être connectée en série, que les bandes interdites soient telles que le courant résultant de la lumière soit réparti à peu près également entre les jonctions multiples. Un problème corrolaire se pose pour la réalisation de la connexion en série souhaitée entre les jonctions actives sans pertes de tension inacceptables aux jonctions inactives dans les structures empilées à considérer.

Conformément à ce qui précède, l'invention concerne une cellule photovoltaïque à jonctions multiples comprenant des couches de phosphure d'indium et de gallium et d'arséniure d'indium et de gallium, portées par un substrat de germanium. Les couches successives comprennent des jonctions situées dans des bandes d'absorption différentes, alors que le substrat et les couches successives ont leurs réseaux accordés à moins de $\pm 1\%$ de variation. A l'interface de la jonction de court-circuit entre les couches, on dispose une mince couche transparente de semiconducteur à faible bande interdite. Equipée d'un élément de concentration, de revêtements extérieurs antiréfléchissants et de contacts supérieur et

inférieur, la cellule constitue un moyen efficace pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique.

La cellule photovoltaïque selon l'invention constitue un perfectionnement par rapport à la cellule décrite dans la demande n° 52 707 précitée.

L'invention sera décrite plus en détail en regard du dessin annexé à titre d'exemple nullement limitatif et sur lequel :

- la figure 1 est une élévation schématique partielle d'une cellule à deux jonctions selon l'invention ;
- la figure 2 est une coupe transversale partielle, à échelle agrandie, montrant une jonction entre des couches de la cellule de la figure 1 ; et
- la figure 3 est un graphique indiquant le courant en fonction de la tension pour la région d'interconnexion de la cellule selon l'invention représentée sur la figure 2.

La jonction d'interconnexion de court-circuit montrée sur la figure 2 et dont la caractéristique électrique est indiquée sur la figure 3 peut être décrite sous la forme d'une hétérojonction à effet tunnel. En particulier, l'interface $p^+ \text{ GaInP} / n^+ \text{ Ge}$ constitue une hétérojonction à effet tunnel.

Dans les brevets précités, les jonctions à effet tunnel sont soit du type homojonction constitué de matière à écart énergétique élevé (voir brevet n° 4 017 332 précité), soit du type à hétérojonction constitué d'une matière à bande interdite moyenne (demande n° 52 707 précitée).

L'avantage de l'hétérojonction à effet tunnel résulte du fait que, dans l'effet tunnel, le courant est commandé à la fois par la hauteur du seuil d'énergie et par sa largeur. Un accroissement de la hauteur ou de la largeur conduit à une réduction de la densité du courant produit par l'effet tunnel. Par conséquent, étant donné que le seuil d'énergie est très large dans les cellules de conception antérieure, la largeur doit être très faible. Une faible largeur de seuil ou largeur d'appauvrissement exige une concentration extrêmement élevée en matière de dopage, cette concentration devant en fait être si élevée qu'il risque de se produire une

5.

précipitation de la matière de dopage, ce qui dégrade la cristallinité de la couche. Une faible largeur de seuil exige également une faible interdiffusion et, par conséquent, un traitement à basse température. Dans le cas de la structure d'une hétérojonction à effet tunnel, la hauteur du seuil est réduite, ce qui permet d'accroître la largeur de ce seuil.

Selon l'invention, il est proposé de diminuer davantage la hauteur du seuil en plaçant les minces couches semi-conductrices à l'interface de couches de la cellule photovoltaïque. Cette diminution de la hauteur du seuil permet de réduire la résistance présentée en série par la jonction de court-circuit et elle permet donc à une cellule à jonctions multiples d'être utilisée sous des intensités lumineuses plus élevées et, par conséquent, avec des rapports de concentration supérieurs et, le cas échéant, un plus faible coût du système. En outre, cette diminution de la hauteur du seuil permet d'élargir la plage des températures de traitement et le choix des dopes utilisés pour la jonction.

Il est indiqué, dans la demande n° 52 707 précitée, que des piles solaires à deux et trois couleurs peuvent être fabriquées au moyen de couches d'alliage InGaAsP à réseaux accordés sur un substrat de germanium. Une pile solaire à deux couleurs de ce type est représentée sur la figure 1. Dans le cas de la structure de la figure 1, la jonction à effet tunnel se trouve à l'interface $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$. La hauteur du seuil de l'interface est caractérisée par l'écart énergétique de $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ qui est de 0,192 eV. Selon l'invention, une couche semi-conductrice est disposée à cet interface, comme représenté à l'échelle agrandie sur la figure 2.

On a remarqué que dans une hétérojonction à effet tunnel, bien que la matière à faible bande interdite absorbe la lumière, la couche constituée de cette matière peut être réalisée avec une matière suffisante pour que la perte de courant photo-électrique soit faible. En particulier, pour une longueur d'absorption de 500 nm, une couche de 50 nanomètres d'épaisseur d'absorbe que 10 % de la lumière. Si la moitié des porteurs produits dérivent dans la mauvaise direction, 5 % du

courant photo-électrique sont perdus. Cette même caractéristique de pseudo-transparence s'applique à un semi-conducteur à réseaux accordés ayant une bande interdite encore plus petite. Pour une cellule à couleurs multiples réalisée sur un substrat de germanium, le germanium constitue la matière évidente à choisir pour une mince couche intermédiaire de jonction tunnel à réseaux accordés et faible bande interdite. Dans cette configuration, la hauteur du seuil pour l'effet tunnel à l'interface est caractérisée par la bande interdite du germanium qui est de 0,096 eV. Il est apparu que le germanium n⁺ forme un contact ohmique avec le GaAs du type n et que des jonctions tunnel n⁺ Ge/p⁺ GaAs peuvent être fabriquées avec des densités de courant suffisamment élevées pour des piles solaires à concentration de lumière.

La figure 3 représente la courbe du courant (I) en fonction de la tension (V) d'une jonction tunnel du type I proposé pour l'interface entre les couches de la cellule photovoltaïque selon l'invention. Une jonction tunnel du type auquel la figure 3 a trait est décrit par J.C. Mariani dans IBM Journal, 280 (1960).

Les figures 1 et 2 représentent schématiquement en coupe transversale la cellule solaire photovoltaïque à couches multiples selon l'invention. Les couches de la cellule ne sont pas représentées à l'échelle dans les directions verticale et horizontale, hormis que, dans la dimension verticale, les couches sont représentées à leurs épaisseurs relatives à peu près exactes. Comme représenté, un substrat 11 de germanium reçoit une surface 12 de contact sur un premier côté et est relié, par son autre côté, à une première cellule semi-conductrice 13. La cellule 13 est de préférence réalisée en gallium, indium et arsenic, ayant la composition $\text{Ga}_{0,88}\text{In}_{0,12}\text{As}$ et une bande interdite de 0,2 eV. Une jonction 14 est représentée dans la première couche 13. Une seconde cellule 15 est représentée en contact avec la première cellule 13. La cellule 15 est de préférence réalisée en gallium, indium et phosphore, avec la composition $\text{Ga}_{0,43}\text{In}_{0,57}\text{P}$ et avec une bande interdite de 0,28 eV.

Une couche conductrice et transparente 16 d'oxyde d'indium et d'étain ou d'oxyde d'antimoine et d'étain est déposée sur l'autre surface de la seconde cellule 15. Les compositions d'oxyde d'indium et d'étain et d'oxyde d'antimoine et d'étain sont des mélanges de deux oxydes, à savoir l'oxyde d'indium (In_2O_3), l'oxyde d'étain (SnO_2) dans la première composition, et l'oxyde d'antimoine (SbO_2) et l'oxyde d'étain dans la seconde composition. Ces mélanges peuvent être constitués de toute proportion des deux oxydes, mais ils comprennent en général de 80 à 90 moles % d'oxyde d'indium dans la première composition, et de 10 à 30 moles % d'oxyde d'antimoine dans la seconde composition. Ces compositions sont indiquées classiquement par les formules chimiques $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$ ou SnO/SbO_2 .

Un ou plusieurs contacts 17 sont fixés à la surface extérieure de la couche 16. Les fils 18 et 19 conducteurs du courant électrique sont reliés aux contacts 12 et 17, respectivement. Un revêtement superficiel extérieur anti-réfléchissant et transparent 20 est appliqué sur la couche 16 de surface et sur les contacts 17.

Comme représenté sur la figure 1, l'élément 21 de concentration, montré sous la forme d'une lentille convergente, est placé au-dessus de la cellule, dans une position lui permettant de concentrer la lumière d'une source 22, dans ce cas le soleil, comme montré.

La figure 2 est une coupe suivant la ligne 2-2 de la figure 1 montrant la jonction de la cellule à couches multiples de la figure 1 et illustrant notamment la caractéristique particulière de l'invention.

La coupe est à échelle agrandie afin de montrer la jonction sous la forme d'une mince couche semiconductrice 14 en matière transparente et à faible bande interdite type, par exemple en germanium. La couche semi-conductrice 14 sépare la couche 13 constituée de gallium, d'indium et d'arsenic, et la couche 15 constituée de gallium, d'indium et de phosphore et, en dimensions relatives, son épaisseur est d'environ 5 à 30 nanomètres, alors que celle de la couche 13a est de 50 nanomètres, et la couche 15a de 100 nanomètres.

La qualité particulière de la couche de germanium lui permettant de fonctionner selon la relation souhaitée est que, dans la cellule selon l'invention, la couche reçoit un dopage n+ alors que la couche 13a est dopée n+ et que la couche 15a est dopée p+.

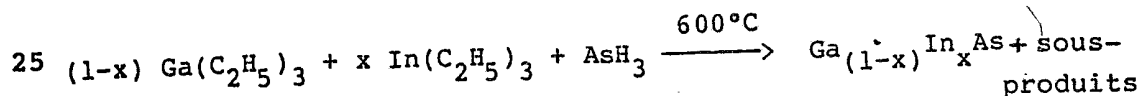
Le procédé préféré pour réaliser la pile solaire à jonctions multiples et selon l'invention consiste à partir d'un substrat monocristallin, par exemple une tranche de germanium. Le substrat de germanium ne contient pas, de préférence, de jonction photosensible, tout d'abord parce qu'un substrat possédant une jonction est beaucoup plus coûteux à réaliser, car la pureté de la tranche de germanium comportant une jonction photosensible fonctionnelle est de l'ordre de 1 ppm ou moins, alors que la tranche ne comportant pas de jonction n'exige un contrôle de pureté que de 1000 ppm ou moins, et ensuite parce qu'une jonction se trouvant dans la tranche de germanium réagirait à la bande de longueur d'onde de la lumière la plus affectée par les fluctuations de l'humidité et de la masse d'air. Un autre avantage du substrat de germanium est qu'il constitue un semi-conducteur élémentaire, de même que le silicium, et qu'il est possible de le faire croître sous la forme d'un ruban, ce qui contribue à en diminuer le coût. En outre, le réseau du germanium est accordé avec les réseaux des couches 13 et 15 au-delà de $< 1\%$ et il doit donc permettre au rendement de la cellule selon l'invention d'approcher davantage de la limite théorique. De plus, le choix d'un substrat de germanium fixe la constante du réseau de toutes les couches de l'empilage, y compris la couche à effet tunnel à faible bande interdite. En raison de la simplicité de la déposition (pyrolyse de GeH_4), le germanium est une matière idéale à bande interdite étroite, indépendamment de son choix comme substrat, mais un substrat de germanium assure automatiquement l'adaptation ou accord des réseaux.

Dns la forme préférée de la cellule selon l'invention, la couche de germanium constituant le substrat a une épaisseur comprise entre 200 et 300 micromètres, et de préférence égale à 250 micromètres. La limite inférieure de

9.

l'épaisseur est déterminée à la fois par les conditions de fonctionnement qui établissent les caractéristiques de conduction du substrat et par la résistance physique du substrat dans sa fonction de base pour la cellule à couches multiples. La limite supérieure de la dimension du substrat dépend principalement de raisons économiques, car la fabrication de substrats plus épais est plus coûteuse et demande un plus grand volume d'un matériau coûteux.

Il est proposé une méthode de croissance qui permet des dépositions successives de couches d'alliages III-V sur de grandes surfaces de substrats. Ce type de déposition est connu et décrit dans le brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 4 128 733. La demande n° 52 707 précitée décrit une chambre de croissance mettant en oeuvre une telle méthode appelée déposition de vapeur chimique organique sur métal à basse pression (MO-CVD). Selon ce procédé, on introduit du gallium-trialkyle ou de l'indium-trialkyle ou un mélange de ces substances, ainsi que de la phosphine ou de l'arsine ou un mélange de ces substances, dans une chambre à pyrolyse. Ces composés réagissent sur le substrat de germanium pour former les alliages demandés InGaAs ou InGaP. Un exemple de la réaction est :



dans laquelle $1 > x > 0$. Le produit est un film semi-conducteur déposé sur le substrat de germanium.

Le semi-conducteur est dopé au type p par addition de vapeurs de zinc-dialkyle, de cadmium-dialkyle ou de béryllium-dialkyle et de triméthylamine, et au type n par l'addition de vapeurs d'hydrogène sulfuré, d'étain-tétralkyle ou de tellure d'un dialkyle. On fait croître les unes à la suite des autres toutes les couches d'alliage III-V ayant la composition prédéterminée, au moyen d'un régulateur de débit de gaz programmable.

Pour la fabrication de la cellule solaire à jonctions multiples représentée sur la figure 1, il est proposé d'empiler des cellules à homojonctions et réseaux adaptés en plaçant des jonctions tunnel de court-circuit aux interfaces. A partir d'un substrat 11 de germanium contenant un dope de type p+, la couche suivante de la cellule 13 est formée par dépôt épitaxial d'une couche de type p+ d'arséniure de gallium et d'indium ayant de préférence une composition d'alliage $\text{Ga}_{0,88}\text{In}_{0,12}\text{As}$. Au cours de la déposition de cette couche semi-conductrice, la concentration du dope est réduite pour produire une couche de type p- et le dope est finalement changé pour produire une jonction p/n et une transition vers une couche de type n-. La poursuite de l'opération de déposition accroît l'épaisseur de la première couche et une partie de finition est déposée avec une concentration de dope telle que l'on obtient une couche n+ à la limite de la première cellule.

Comme représenté à échelle agrandie sur la figure 2, une couche 14 de germanium contenant un dope n+ est ensuite déposée sur la surface de la cellule 13 afin qu'une jonction tunnel soit formée entre les couches de la cellule à jonctions multiples et appliquée par déposition épitaxiale sur la surface de la cellule 13 à l'aide de la même chambre de déposition de vapeurs chimiques organiques sur métal, par pyrolyse de GeH_4 , sur une épaisseur préférée comprise entre 5 et 30 nanomètres.

Une seconde cellule semi-conductrice 15 est ensuite appliquée par déposition épitaxiale sur la surface extérieure de la couche de germanium de la première cellule, initialement avec un dope et avec concentration pour produire une couche p+ à l'interface. La seconde couche semi-conductrice 15 est constituée de phosphure d'indium et de gallium, ayant une composition d'alliage préférée $\text{In}_{0,57}\text{Ga}_{0,43}\text{P}$. Pendant la déposition de cette couche semi-conductrice, la concentration du dope est réduite pour produire une couche de type p- et le dope est finalement changé pour que l'on obtienne une jonction p/n et une transition vers une couche de type n-. La poursuite de la

déposition accroît l'épaisseur de la seconde couche avec une transition de la composition de dopage telle que l'on obtient une couche n^+ à la limite de la seconde cellule.

Une couche conductrice extérieure 16 est ensuite
5 déposée sur la surface extérieure de la seconde cellule 15
afin d'achever la cellule photovoltaïque à deux jonctions. La
couche conductrice peut également être un revêtement anti-
réfléchissant ou un revêtement séparé 20 peut être déposé sur
la couche 16 et au-dessus d'un conducteur 17 en contact avec
10 la couche 16. La couche conductrice est constituée avantageu-
sement d'une composition d'alliage d'oxyde d'indium et d'étain
($\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$), désignée classiquement par l'abréviation ITO.

Pour achever la cellule photovoltaïque, deux
conducteurs 18 et 19 sont fixés chacun à la surface extérieure
15 12 du substrat et aux conducteurs 17 situés sous la couche 20.

Il convient de noter que les jonctions contenues
dans la cellule photovoltaïque sont des homojonctions et que
les couches empilées ont leurs réseaux accordés. En outre, des
jonctions tunnel au germanium se trouvent aux faces
20 hétérogènes des cellules. Ce procédé de fabrication permet
d'obtenir des jonctions tunnel plus efficaces.

Dans la cellule photovoltaïque à couches
multiples décrite ci-dessus, la première couche présente une
bande interdite de 0,2 eV et la seconde couche présente une
25 bande interdite de 0,28 eV. Avec une couche intermédiaire de
germanium favorisant l'effet de tunnel, la hauteur du seuil de
tunnel est de 0,096 eV.

Dans la forme préférée de réalisation décrite,
l'épaisseur de chaque couche semi-conductrice composée et
30 déposée est comprise entre 2 et 6 micromètres et elle est de
préférence égale à environ 4 micromètres. La couche de
jonction tunnel fortement dopée, appliquée sur le côté à
faible bande interdite pour la cellule à homojonctions doit
être suffisamment mince pour ne pas absorber une quantité
35 appréciable de lumière, c'est-à-dire que son épaisseur doit
être inférieure à 100 nanomètres. Ce critère n'est pas
difficile à satisfaire, car la longueur d'absorption est juste
supérieure, mais proche de la bande interdite d'un semi-

conducteur, c'est-à-dire la zone intéressante pour une cellule à jonctions multiples. Cette couche doit également avoir une épaisseur suffisante pour ne pas s'appauvrir totalement, c'est-à-dire une épaisseur supérieure à 5 nanomètres.

5 Le réseau de chaque couche de la cellule à couches multiples est accordé avec celui de la couche voisine, avec une variation constante maximale de réseau de $\pm 1,0 \%$. Cet accord ou adaptation est important, car une adaptation faible ou l'absence d'adaptation entraîne une dégradation de la
10 cristallinité du système de la cellule et conduit à une structure ayant une forte densité de dislocations de cristaux, et dans les pires des cas, conduit même à la formation de limites de grains. Ces dislocations deviennent ensuite des sites pour une recombinaison des porteurs de charge engendrés
15 par la lumière, ce qui réduit l'importance du courant produit. Ces dislocations établissent également des circuits de dérivation du courant qui réduisent davantage les tensions à circuit ouvert.

20 L'adaptation des réseaux est obtenue par le choix approprié de la composition et des quantités relatives des matières entrant dans les différentes couches. Le procédé de croissance, avec un réglage spécial de la température, est également important pour la formation de couches monocristallines de haute qualité.

25 Les couches de la cellule préférées à couches multiples, déposées sur le substrat de germanium, ont toutes leurs réseaux accordés sur la constante de réseau du germanium de 0,566 nanomètre, à $\pm 1,0 \%$.

30 Les éléments (excepté le germanium) utilisés dans les diverses couches des figures 1 et 2 se trouvent tous dans les colonnes IIIA et VA du Tableau Périodique et sont les plus avantageux à utiliser dans la pile selon l'invention. Cependant, d'autres matières semi-conductrices peuvent être
35 utilisées sans sortir du cadre de l'invention. Par exemple, des composés formés d'éléments des colonnes IIB et VIA tels que CdS et CdTe peuvent également être utilisés ; des composés IB-IIIA-VIA tels que CuInS ou des variantes de ces composés, c'est-à-dire des formes dans lesquelles Se est

substitué à S ou Ga à In, conviennent également, de même que des composés IIB-IVA-V tels que ZnSnP. De plus, d'autres composés IIIA-VA peuvent être utilisés à la place des composés IIIA-VA préférés et indiqués précédemment.

- 5 Il va de soi que de nombreuses modifications peuvent être apportées à la cellule solaire décrite et représentée sans sortir du cadre de l'invention.

REVENDICATIONS

1. - Cellule solaire photovoltaïque à jonctions multiples et haut rendement destinée à être utilisée avec un élément (21) de concentration de la lumière et caractérisée en ce qu'elle comporte un substrat monocristallin (11) ne comportant pas de jonction intérieure photosensible, deux ou plusieurs couches homogènes successives en matière semi-conductrice déposées sur le substrat, chaque couche contenant une jonction p/n photosensible d'une même polarité, cette jonction p/n étant une homojonction, chaque couche ayant essentiellement la même constante de réseau que le substrat monocristallin, chaque couche comportant un contact de jonction de court-circuit à effet tunnel portant contre la couche située immédiatement au-dessus et contre la couche située immédiatement au-dessous, ladite jonction de court-circuit étant une hétérojonction tunnel, une couche semi-conductrice mince et transparente (14) à faible bande interdite étant placée à l'interface de ladite jonction de court-circuit, chaque couche ayant une épaisseur suffisante et une composition appropriée pour produire sensiblement le même courant photo-électrique à tension nulle que les autres couches, et chacune des couches successives absorbant l'énergie de la lumière à une longueur d'onde différente.

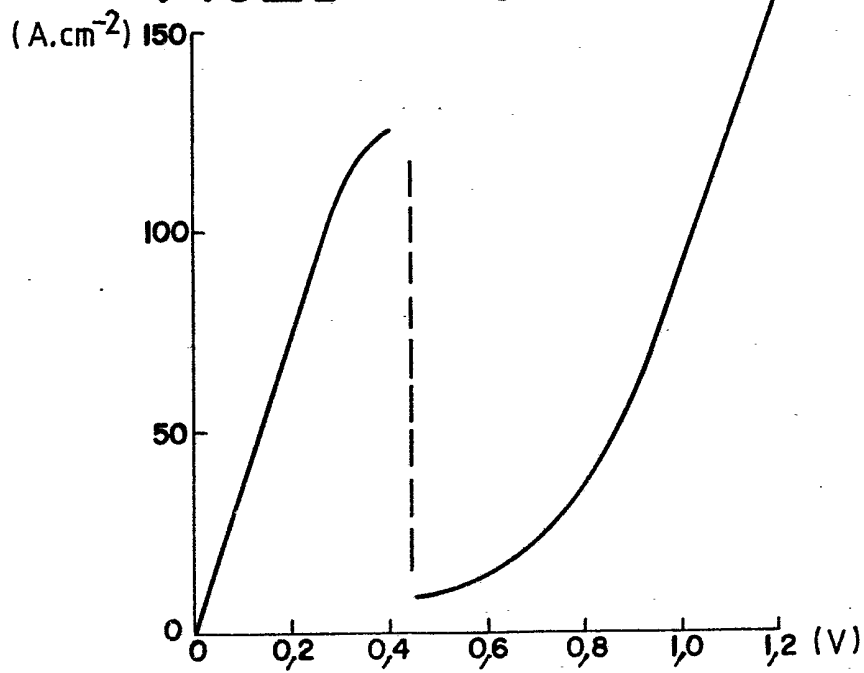
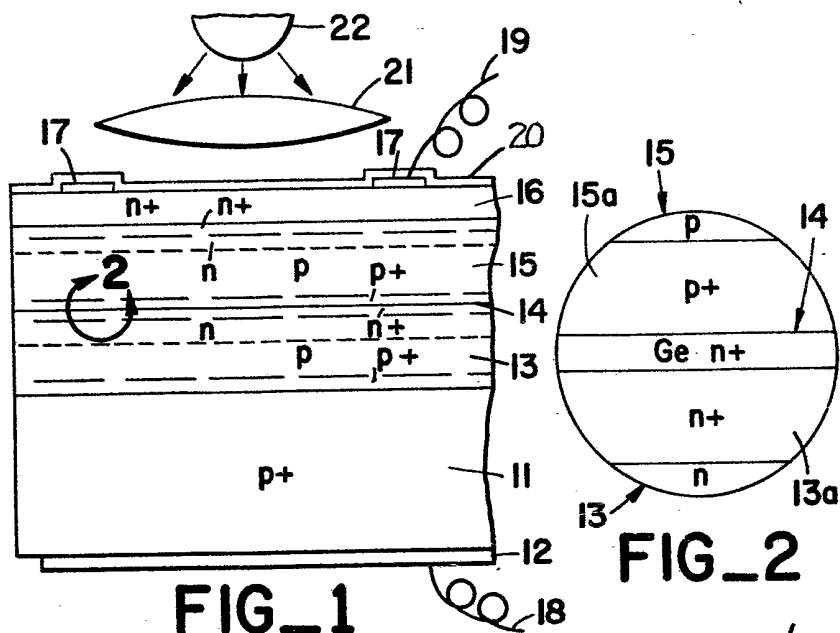
2. - Cellule solaire photovoltaïque selon la revendication 1, caractérisée en ce que la couche semi-conductrice (14) située à l'interface de la jonction de court-circuit est en germanium.

3. - Cellule solaire photovoltaïque selon la revendication 2, caractérisée en ce que l'épaisseur de la couche de germanium est comprise entre 5 et 30 nanomètres.

4. - Cellule solaire photovoltaïque selon la revendication 2, caractérisée en ce que l'épaisseur de la couche de germanium est d'environ 10 nanomètres.

5. - Cellule solaire photovoltaïque selon la revendication 1, caractérisée en ce que la jonction de court-circuit comprend une première couche (13) de $Ga_{1-x}In_xAs$, une seconde couche (15) de $In_{1-x}Ga_xP$, et une couche semi-conductrice (14) en germanium, située à l'interface des première et seconde couches.

6. - Cellule solaire photovoltaïque selon la revendication 5, caractérisée en ce que l'épaisseur de la première couche est d'environ 50 nanomètres, celle de la seconde couche d'environ 100 nanomètres et celle de la couche
5 de germanium comprise entre 5 et 30 nanomètres.



FIG_3