

CONFÉDÉRATION SUISSE
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) CH 721 437 A2

(51) Int. Cl.: H10F 10/10 (2025.01)
H10F 19/40 (2025.01)
H10F 19/30 (2025.01)

Demande de brevet pour la Suisse et le Liechtenstein

Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

(12) **DEMANDE DE BREVET**

(21) Numéro de la demande: 001443/2023

(22) Date de dépôt: 20.12.2023

(43) Demande publiée: 30.06.2025

(71) Requérant:
Raja Yazigi, Rue du Nugérol 11
2525 Le Landeron (CH)

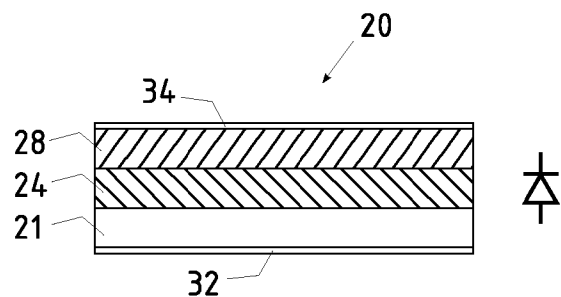
(72) Inventeur(s):
Raja Yazigi, 2525 Le Landeron (CH)

(74) Mandataire:
P&TS SA, Av. J.-J. Rousseau 4 P.O. Box 2848
2001 Neuchâtel (CH)

(54) **Dispositif photovoltaïque**

(57) L'invention concerne une cellule photovoltaïque (20) comprenant un empilement de couches semi-conductrices ou semi-métalliques (24, 28) formant une jonction et au moins deux contacts (32, 34) pour la collecte de porteurs de charge dérivant de la conversion de radiation électromagnétique dans la jonction, caractérisée en ce que au moins une des couches semi-conductrices contient du $\text{Mg}_2\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$, $\text{Mg}_{(z)}\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(y)}$, Mg_8PbSi_3 , Mg_2Pb , $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ou Ag_2Se .

L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une telle cellule photovoltaïque, ainsi qu'un dispositif comprenant plusieurs telles cellules, notamment par superposition pour convertir le rayonnement infrarouge pour le fonctionnement nocturne.



Description

Domaine technique

[0001] L'invention se rapporte à des dispositifs photovoltaïques tels que des cellules ou des panneaux photovoltaïques. Cette divulgation illustre spécialement, mais sans limitation pour l'invention, des dispositifs photovoltaïques et des structures photovoltaïques configurés pour convertir le rayonnement dans la région visible et infrarouge du spectre électromagnétique, ainsi que des matériaux et des structures spécialement adaptés pour cela.

Etat de la technique

[0002] On connaît dans la technique plusieurs exemples de dispositifs photovoltaïques aptes à convertir le rayonnement solaire en énergie électrique. Ces dispositifs sont employés dans l'industrie aérospatiale, dans une multitude d'appareils électroniques, pour alimenter des installations non reliées au réseau de distribution électrique et, de plus en plus, pour la production d'énergie à usage général. Les systèmes photovoltaïques représentent une des sources d'énergie renouvelable plus prometteuses et ne dégagent pas de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

[0003] L'énergie solaire reçue à la surface terrestre est mesurée à 341 W/m^2 en moyenne durant le jour. Une partie seulement de ce rayonnement se situe dans la bande de longueurs d'onde de la radiation visible (par convention entre $0.4 \mu\text{m}$ et $0.8 \mu\text{m}$), tandis que la plus grande partie de l'énergie nous parvient sous forme de rayonnement dans l'infrarouge. Le maximum est à une longueur d'onde de $0.9 \mu\text{m}$.

[0004] On sait que la terre est aussi une source de radiation et émet essentiellement dans le spectre infrarouge, en raison de sa température de surface plus basse que celle du soleil. L'énergie émise est pourtant considérable. On a estimé que la surface de la Terre émet 396 W/m^2 en moyenne (l'excès par rapport à l'énergie solaire reçue correspond à l'énergie géothermique dégagée à l'intérieur de notre planète). Le pic d'émission de la radiation terrestre se situe à $\lambda=10 \mu\text{m}$ environ.

[0005] Les systèmes photovoltaïques se basent sur des matériaux semiconducteurs. La radiation électromagnétique peut, si elle présente une longueur d'onde appropriée, déplacer des électrons de la bande de valence du matériau à celle de conduction, produisant ainsi des paires électron-trou. Une cellule solaire présente généralement des jonctions de type p-n qui génèrent un champ électrique, en sorte que les électrons et les trous sont forcés à se diriger chacun vers une face opposée du matériau, où ils sont collectés par des électrodes conducteurs.

[0006] Une partie prépondérante des installations photovoltaïques en fonction se base sur la première technologie et comporte des panneaux de silicium polycristallin ou monocristallin. Il s'agit d'une technologie mûre et bien connue qui présente toutefois des limitations. Les panneaux photovoltaïques en silicium sont relativement chers, lourds, et n'exploitent que le rayonnement visible, car le silicium est relativement transparent au rayonnement infrarouge en raison du saut énergétique relativement consistant entre la bande de conduction et la bande de valence. On constate que l'efficacité quantique intrinsèque du Silicium tombe essentiellement à zéro lorsque la longueur d'onde de la radiation dépasse $1.2 \mu\text{m}$.

[0007] Les cellules solaires de silicium sont obtenues par des procédés industriels de cristallisation qui permettent la fabrication de wafers de silicium avec les propriétés de pureté désirées. Parmi les procédés utilisés pour fabriquer de wafer monocristallins de silicium ou d'autres matériaux on connaît le procédé Czochralski, les procédés de micro-pulling-down basées sur le transport capillaire de la matière en fusion, la technique de raffinage à zone fondue, les procédés de vertical Bridgman (VB) Bridgman-Stockbarger (VBS) et leurs nombreuses variantes visent à faire croître des cristaux dans un gradient de température. Le document CN 102312279 A divulgue la fabrication d'un grand nombre de matériaux par des procédés VGF (Vertical Gradient Fusion) VB et VBS.

[0008] On connaît aussi des cellules solaires basées sur la technologie des couches minces, par exemple les cellules solaires basées sur le silicium amorphe, le tellure de cadmium (CdTe), le sélénure de cuivre indium et gallium (CIGS), les cellules photovoltaïques à pérovskite.

[0009] On a proposé, pour la conversion de la radiation électromagnétique infrarouge, des matériaux spéciaux tels que le phosphate d'indium (InP), le tellure d'indium et antimoine (InSbTe) et bien d'autres. On a proposé également d'améliorer l'efficacité des cellules photovoltaïques à la radiation infrarouge par des nanostructures, par exemple des „quantum dots“.

Bref résumé de l'invention

[0010] L'invention propose le système photovoltaïque qui est l'objet de la revendication indépendante, et notamment par une cellule photovoltaïque comprenant : un empilement de couches semi-conductrices ou semi-métalliques formant une jonction et au moins deux contacts pour la collecte de porteurs de charge dérivant de la conversion de radiation électromagnétique dans la jonction, caractérisée en ce que au moins une des couches semi-conductrices contient du $\text{Mg}_{(z)}\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(y)}$, Mg_8PbSi_3 , Mg_2Pb , $\text{Mg}_2\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$, $\text{Hg}_{(1-x)}\text{Cd}_{(x)}\text{Te}$ ou Ag_2Se .

[0011] L'invention n'est pas limitée à des composés purs ou légèrement dopés, mais peut comporter aussi des couches semi-conductrices de solutions solides d'espèces chimiques compatibles, par exemple comprenant l'un des $\text{Mg}_{(z)}\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(y)}$, Mg_8PbSi_3 ou $\text{Mg}_2\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(y)}$ ou Mg_2Pb mentionnés ci-dessus en solution solide avec d'autres substances.

[0012] Préférentiellement, l'invention utilise des matériaux semiconducteurs ou semi-métalliques avec un gap entre la bande de valence et la bande de conduction bien inférieur à celui du silicium, à un gap plus petit que 0.2 eV. On peut parvenir à ce résultat par des couches semi-conductrices ou semi-métalliques de $\text{Mg}_2\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(y)}$, Mg_8PbSi_3 , $\text{Mg}_{(z)}\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(y)}$, Mg_2Pb , $\text{Hg}_{(1-x)}\text{Cd}_{(x)}\text{Te}$ ou Ag_2Se , avec un dopage approprié. Le Mg_8PbSi_3 dopé, par exemple, peut présenter un gap de 0.1 eV environ.

[0013] Un autre avantage des matériaux semi-conducteurs ou semi-métalliques sélectionnés par l'invention est que certains présentent un gap direct, sans décalage de quasi-moment entre l'état de plus basse énergie de la bande de conduction et l'état de plus haute énergie de la bande de valence. Dans ces matériaux la radiation peut déclencher une transition sans nécessiter d'interagir avec des phonons, à la différence des matériaux à gap indirect, comme le silicium.

[0014] Sans une jonction, les porteurs de charge créés par la conversion des photons de radiation incidente tendraient à se recombiner plutôt qu'à générer un courant électrique. Dans l'invention, la jonction est obtenue par dopages différents d'un même semiconducteur, ou bien par la juxtaposition de deux couches semi-conductrices de composition différentes (hétérojonction). Le Bismuth (ou l'Antimoine ou l'Arsenic ou le Phosphore ou l'Azote) se substitue aisément au plomb dans le réseau du Mg_8PbSi_3 en apportant un électron supplémentaire. Il est un excellent dopant de type „n“ pour cette application, tandis que le sodium (ou le Lithium ou le Potassium) peut facilement substituer le magnésium et jouer un rôle d'accepteur pour générer une couche de type „p“. En alternative, La jonction peut comporter la juxtaposition de matériaux différents dès par leur composition chimique (hétérojonctions) ou bien la juxtaposition d'une première couche semi-conductrice ou semi-métallique et d'une seconde couche métallique (jonctions Schottky).

[0015] Dans des variantes, l'invention présente des caractéristiques optionnelles mais avantageuses comme par exemple une composition de au moins une des couches semi-conductrices ou semi-métalliques est constituée par du Mg_8PbSi_3 une jonction comportant la superposition d'une couche de Mg_8PbSi_3 de type „n“ dopée avec des atomes de type donneur d'électrons, par exemple Bi, et d'une couche de Mg_8PbSi_3 de type „p“ dopée avec des atomes de type accepteur d'électrons, par exemple Na, l'emploi de semiconducteurs ou semi-métaux à gap direct ou non et inférieur à 0.2 eV, préférentiellement inférieur ou égal à 0.14 eV, la capacité de convertir en énergie électrique une radiation avec une longueur d'onde supérieure à 1 μm , préférentiellement supérieure ou égale à 8 μm , une couche conductrice de contact transparente ou semi-transparente ou opaque, des couches semi-conductrices ou semi-métalliques sont monocristallines.

[0016] Plusieurs cellules photovoltaïques comme divulgué ci-dessus peuvent être combinées en un dispositif photovoltaïque. Dans une variante avantageuse, le dispositif photovoltaïque peut inclure un groupe de cellules photovoltaïques superposées optimisées pour le fonctionnement nocturne et, optionnellement une ou plusieurs cellules photovoltaïques pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire au-dessus du groupe de cellules photovoltaïques pour le fonctionnement nocturne.

[0017] Les cellules photovoltaïques de l'invention peuvent être fabriquées par n'importe quel procédé idoine, par exemple à partir d'un wafer semi-conducteur ou semi-métallique contenant du $\text{Mg}_{(z)}\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(y)}$, Mg_8PbSi_3 , $\text{Mg}_2\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(y)}$, $\text{Hg}_{(1-x)}\text{Cd}_{(x)}\text{Te}$ ou Ag_2Se par un procédé VGF, VB ou VBS dans lequel on réalise les couches ou semi-métalliques requises.

[0018] Grâce à l'emploi de matériaux semi-conducteurs ou semi-métalliques sélectionnés, l'invention permet la conversion en énergie électrique de radiation infrarouge avec une efficacité considérablement supérieure à celle des dispositifs photovoltaïques connus. L'invention peut convertir des radiations de longueur d'onde supérieure à 1 μm , et même supérieure à 5 μm .

[0019] La capacité de convertir en énergie la radiation infrarouge porte à un incrément considérable de l'énergie produite lorsque les dispositifs de l'invention sont exposés à la lumière du jour. Bien que le pic de la radiation solaire se situe à une longueur d'onde de 0.9 μm environ, exploitable par les cellules solaires conventionnelles, l'efficacité quantique du silicium est déjà considérablement réduite à cette longueur d'onde. Une partie prépondérante de l'énergie solaire est irradiée à des longueurs d'onde différentes et, encore supérieures, et n'est pas convertie utilement dans les installations solaires ordinaires.

[0020] Un autre avantage de l'invention est dans la capacité de récolter l'énergie irradiée par la terre pendant la nuit. La terre émet en effet autant d'énergie qu'elle en reçoit du soleil. Cette énergie est irradiée sous forme de radiation infrarouge, avec un pic d'intensité à 9 μm et n'est pas exploitable par les installations photovoltaïques conventionnelles.

[0021] Avantageusement, l'invention propose des dispositifs photovoltaïques qui peuvent récolter l'énergie de la radiation solaire, le jour, et celle rayonnée par la terre qui est disponible aussi la nuit. De telle façon, une installation solaire basée sur l'invention peut générer des courants plus élevés et fournir une puissance supérieure, et cette énergie est disponible de nuit comme de jour. On peut donc réduire ou totalement éliminer les batteries de stockage.

[0022] De plus, les dispositifs de l'invention peuvent fournir une puissance électrique plus haute à égalité de surface occupée, par rapport aux solutions photovoltaïques conventionnelles. On peut alors envisager de les utiliser pour fournir une alimentation autonome à des dispositifs où l'espace est limité, par exemple les dispositifs électroniques personnels ou les véhicules. On pourrait par exemple parvenir à des téléphones portables ou à des voitures solaires totalement autonomes et capables de fonctionner avec la seule énergie photovoltaïque pour des périodes très longues, et potentiellement indéfinies, sans recharge.

Brève description des figures

[0023] Des exemples de mise en œuvre de l'invention sont indiqués dans la description illustrée par les figures annexées dans lesquelles :

- La figure 1 illustre la structure d'une cellule photovoltaïque selon un aspect de l'invention.
- La figure 2 montre un dispositif photovoltaïque selon un aspect de l'invention, avec une pluralité de cellules pour la conversion de la lumière solaire.
- La figure 3 montre un dispositif photovoltaïque selon un aspect de l'invention optimisé pour la conversion de la radiation infrarouge rayonnée par la surface de la Terre, avec des cellules photovoltaïques en tandem pour capter la radiation infrarouge du sol.
- La figure 4 montre le spectre de la radiation solaire et le spectre de la radiation infrarouge émise par la terre.

[0024] Dans les figures, les éléments remarquables sont marqués par des signes de référence repris dans le texte pour simplifier la compréhension. Un même signe de référence est utilisé pour désigner des éléments identiques, équivalents ou similaires. Lorsqu'une figure comporte plusieurs éléments identiques, équivalents ou similaires, une partie des signes de référence pourront être omis pour ne pas encombrer le dessin.

Exemple(s) de mode de réalisation de l'invention

[0025] La figure 4 montre le spectre de la radiation solaire et le spectre de la radiation infrarouge émise par la terre. La courbe 41 correspond à l'énergie du rayonnement solaire reçu par unité de surface à la surface de la Terre, et suit la loi de Planck pour un corps à la température de surface du soleil 6000 K. Le pic de radiation se trouve dans la bande de la lumière visible 45 qui délimite aussi la région dans laquelle les dispositifs photovoltaïques au silicium sont efficaces.

[0026] La courbe 51 illustre le spectre de radiation émis par une surface à la température moyenne du sol, soit 300 K. Cette radiation se situe entièrement dans le domaine de l'infrarouge, au-dessus de $\lambda=1\text{ }\mu\text{m}$ et présente un pic pour de $\lambda=10\text{ }\mu\text{m}$.

[0027] La figure 1 illustre schématiquement une structure de cellule solaire à couches minces empilées que l'on pourrait adopter pour réaliser l'invention. La cellule solaire comporte un substrat 21, de préférence un matériau transparent pour la radiation électromagnétique que l'on souhaite convertir. Dans un mode de réalisation possible, le substrat 21 est une couche de $\text{Mg}_{(z)}\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(y)}$, Mg_8PbSi_3 , $\text{Mg}_2\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$ ou Mg_2Pb , mais d'autres solutions sont possibles. La couche 24 est une couche fine de semiconducteur de type „p“, par exemple une couche de Mg_8PbSi_3 avec adjonction d'atomes de Sodium, ou d'une autre impureté qui se comporte comme un accepteur d'électrons dans le réseau du Mg_8PbSi_3 . La couche 28, au-dessus de la couche 24 est une couche fine de semiconducteur de type „n“, par exemple une couche de Mg_8PbSi_3 avec un dopage de Bismuth.

[0028] La succession des couches pourrait être changée, et la couche „n“ pourrait être entre le substrat et la couche „p“, donnant ainsi lieu à une jonction avec la polarité opposée. Par ailleurs, on pourrait supprimer le substrat 21. L'empilement de couches 21-24-28 peut être obtenu par n'importe quel procédé idoine, par exemple par épitaxie, pulvérisation cathodique, évaporation, sublimation, par ablation avec un faisceau laser pulsé, par un bain chimique, ou encore par des techniques d'impression. La fabrication à partir d'un wafer de semiconducteur obtenu par les procédés VGF ou VBS, par exemple est aussi possible et comprise dans le domaine de l'invention. Des cellules monocristallines sont préférables, mais l'invention peut aussi avoir des réalisations polycristallines.

[0029] La cellule photovoltaïque 20 comporte aussi des structures conductrices pour collecter le courant photovoltaïque. Dans l'exemple de la figure 1 on peut voir deux électrodes transparentes 32, 34 avec cette fonction, mais d'autres structures et solutions sont possibles, par exemple des doigts ou grillages métallisés. La cellule solaire peut comporter aussi d'autres couches de support et protection, par exemple en polymère, non représentées dans la figure.

[0030] La figure 1 n'est pas à l'échelle et est présentée uniquement pour fournir un exemple. Dans un dispositif réel, les couches peuvent présenter des épaisseurs différentes entre eux, et les proportions entre dimensions verticales et latérales peuvent varier considérablement de ce qui est représenté.

[0031] La figure 2 montre un dispositif solaire combinant plusieurs cellules solaires selon l'invention, optimisé pour la conversion électrique de la lumière solaire 40. Ce dispositif comporte une pluralité de cellules 20 reliées entre elles par des conducteurs électriques 35. Dans l'exemple montré, les cellules solaires sont connectées en parallèle, mais d'autres topologies de connexion sont possibles. Le dispositif présente deux terminaux 38 pour la connexion à une charge ou, préférentiellement, à un circuit électronique de gestion configuré pour équilibrer les cellules et les faire travailler en proximité de leur point de charge optimal.

[0032] La figure 3 montre un dispositif optimisé pour la conversion de la lumière infrarouge 50 émise par la surface terrestre. Il est avantageux de disposer une pluralité de cellules une après l'autre en tandem, en sorte que la lumière infrarouge le traverse en succession. On peut voir plusieurs groupes 27 de cellules empilées de cette façon. Chaque groupe 27 peut comporter un grand nombre de cellules 20-la figure montre trois cellules par groupe, mais cela est seulement un

exemple. À l'intérieur de chaque groupe, les cellules peuvent être connectées électriquement en série, pour augmenter la tension électrique générée.

[0033] On peut envisager aussi un dispositif combinant le dispositif solaire de la figure 2 avec le dispositif optimisé pour la nuit de la figure 3, un sur l'autre. Le jour, les cellules solaires du niveau supérieur captent efficacement la lumière du soleil, tandis que la nuit toutes les cellules photovoltaïques, et plus particulièrement celles des groupes 27, convertissent en énergie le rayonnement infrarouge du sol.

[0034] On peut augmenter encore davantage la performance des dispositifs photovoltaïques de l'invention en ajoutant une couche de conversion comprenant un ou plusieurs matériaux capables de convertir la radiation électromagnétique incidente avec une longueur d'onde de l'ordre de $1\text{ }\mu\text{m}$ en radiation infrarouge avec une longueur d'onde plus grande, par exemple que $\lambda \geq 8\text{ }\mu\text{m}$. Comme on l'a vu auparavant, la jonction de l'invention est particulièrement apte à convertir la radiation dans cette région du spectre électromagnétique. Ils existent plusieurs matériaux photo fluorescents capables d'absorber la radiation visible ou ultraviolette et émettre par fluorescence des quanta de radiation infrarouge. La couche de conversion peut être une couche mince fabriquée avec des techniques de déposition idoïnes, ou bien une couche comprenant une suspension de particules de phosphore IR. Cela inclut des matériaux non linéaires, par exemple le phosphore UV2IR1 produit par la société Maxmax LLC, USA.

Numéros de référence employés sur les figures

[0035]

20	cellule photovoltaïque
21	substrat
24	couche semi-conductrice de type 'p'
27	groupe de cellules photovoltaïques
28	couche semi-conductrice de type 'n'
32	électrode inférieure
34	électrode supérieure
35	conducteur
38	borne électrique
40	rayonnement solaire
41	spectre du rayonnement solaire
45	bande de la lumière visible
50	rayonnement de la terre
51	spectre du rayonnement de la terre

Revendications

1. Cellule photovoltaïque comprenant: un empilement de couches semi-conductrices ou semi-métalliques formant une jonction et au moins deux contacts pour la collecte de porteurs de charge dérivant de la conversion de radiation électromagnétique dans la jonction, caractérisée en ce que au moins une des couches semi-conductrices contient une substance parmi: Mg_2Pb , $\text{Mg}_{(z)}\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(y)}$, Mg_8PbSi_3 , $\text{Mg}_8\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(y)}$, $\text{Hg}_{(1-x)}\text{Cd}_{(x)}\text{Te}$ ou Ag_2Se .
2. Cellule photovoltaïque selon la revendication précédente, dans laquelle au moins une des couches semi-conductrices ou semi-métalliques est constituée par du Mg_8PbSi_3 ou par une solution solide de Mg_8PbSi_3 avec une autre substance.
3. Cellule photovoltaïque selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle la jonction comporte la superposition d'une couche de type „n“ dopée avec des atomes de type donneur d'électrons, par exemple Bi, et d'une couche de type „p“ dopée avec des atomes de type accepteur d'électrons, par exemple Na.
4. Cellule photovoltaïque selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle les couches semi-conductrices ou semi-métalliques sont constituées par des semiconducteurs ou semi-métaux à gap direct ou non et inférieur à 0.2 eV, préférablement inférieur ou égal à 0.14 eV.
5. Cellule photovoltaïque selon l'une quelconque des revendications précédentes, capable de convertir en énergie électrique une radiation avec une longueur d'onde supérieure à $1\text{ }\mu\text{m}$, préférablement supérieure ou égale à $8\text{ }\mu\text{m}$.
6. Cellule photovoltaïque selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle au moins un des contacts comporte une couche conductrice transparente ou semi-transparente ou opaque.
7. Cellule photovoltaïque selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle les couches semi-conductrices ou semi-métalliques sont monocristallines.
8. Dispositif photovoltaïque comprenant plusieurs cellules photovoltaïques selon l'une des revendications précédentes.
9. Dispositif photovoltaïque selon la revendication précédente, comportant un groupe de cellules photovoltaïques pour le fonctionnement nocturne, comprenant une superposition de cellules photovoltaïques selon l'une des revendications de 1 à 7 pour convertir en énergie électrique un rayonnement infrarouge provenant de la surface terrestre.

10. Dispositif photovoltaïque selon la revendication précédente, comprenant en outre une ou plusieurs cellules photovoltaïques pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire au-dessus du groupe de cellules photovoltaïques pour le fonctionnement nocturne.
11. Dispositif photovoltaïque selon l'une des revendications précédentes, avec une couche de conversion comprenant un ou plusieurs matériaux capables de convertir la radiation électromagnétique incidente en radiation infrarouge.
12. Procédé de fabrication d'une cellule photovoltaïque selon l'une des revendications de 1 à 7, comprenant la fabrication d'un wafer semiconducteur ou semi-métallique contenant du $\text{Mg}_2\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$, Mg_8PbSi_3 , $\text{Mg}_{(2)}\text{Pb}_{(x)}\text{Si}_{(y)}$, Mg_2Pb , $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ou Ag_2Se par un procédé VGF, VB ou VBS et la fabrication de couches ou semi-métalliques formant une jonction dans le wafer.

Fig. 1

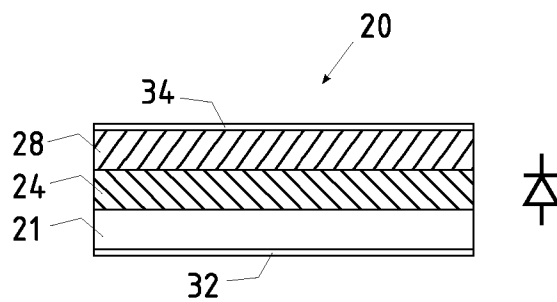


Fig. 2

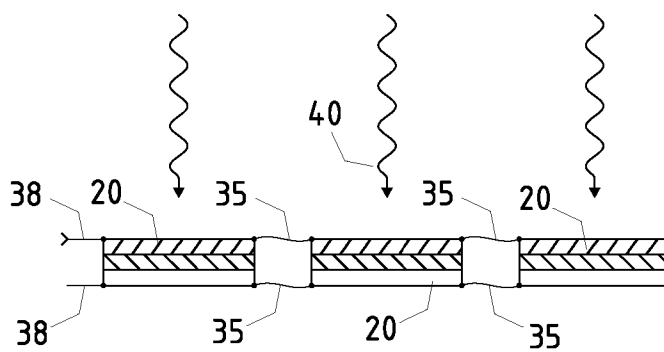
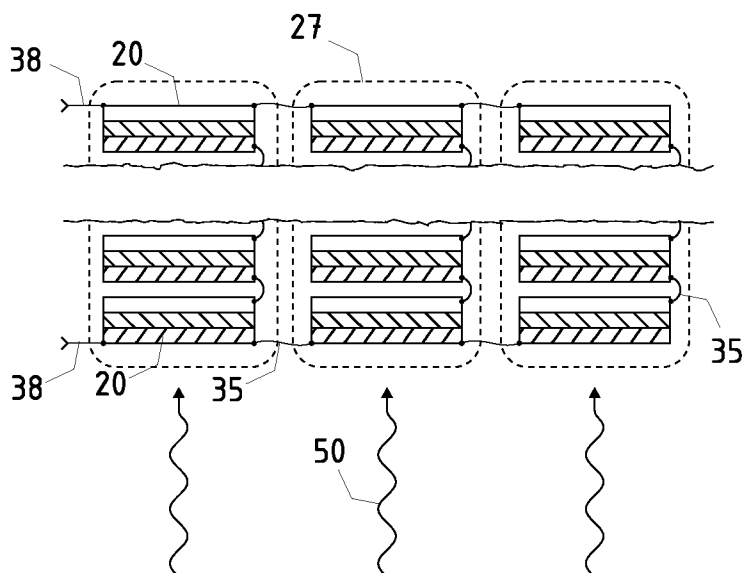


Fig. 3



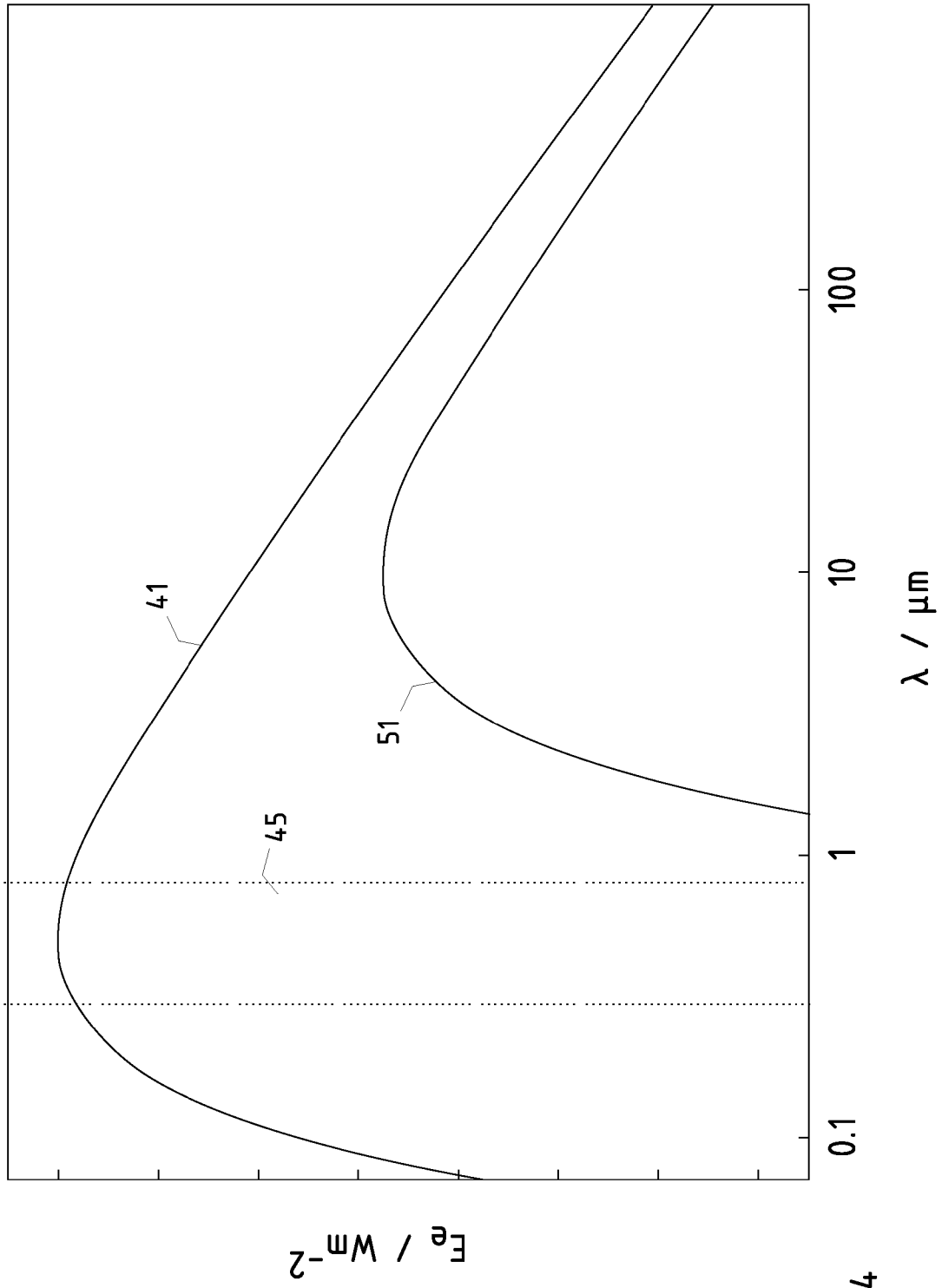


Fig. 4