

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
12 mars 2009 (12.03.2009)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2009/030865 A2

- (51) Classification internationale des brevets :
C22C 38/08 (2006.01) C23C 30/00 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2008/051542
- (22) Date de dépôt international : 28 août 2008 (28.08.2008)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
07301336.9 31 août 2007 (31.08.2007) EP
- (71) Déposants (pour tous les États désignés sauf US) :
ARCELORMITTAL - STAINLESS AND NICKEL
ALLOYS [FR/FR]; 1 à 5, rue Luigi Chérubini, F-93200
Saint-Denis (FR). ECOLE POLYTECHNIQUE
[FR/FR]; Route de Saclay, F-91120 Palaiseau (FR).
- (72) Inventeurs; et
- (73) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : REYAL,
Jean-Pierre [FR/FR]; 31, rue des Etourneaux, F-95610
Éragny (FR). REYDET, Pierre-Louis [FR/FR]; 5, im-
passe des Peupliers, F-58660 Coulanges-les-Nevers (FR).
ROCA CABARROCAS, Pere [ES/FR]; 13bis, rue Gi-
rardot, F-91140 Villebon sur Yvette (FR). DJERIDANE,
Yassine [DZ/DZ]; 37, rue Ali Medouche, Hussein-Dey -
Alger, 16040 (DZ).
- (74) Mandataires : MICHELET, Alain etc.; Cabinet HARLE
et PHELIP, 7, rue de Madrid, F-75008 Paris (FR).
- (81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG,
ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL,
IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK,
LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: CRYSTALLOGRAPHICALLY TEXTURED METAL SUBSTRATE, CRYSTALLOGRAPHICALLY TEXTURED DEVICE, CELL AND PHOTOVOLTAIC MODULE INCLUDING SUCH DEVICE AND THIN LAYER DEPOSITION METHOD

(54) Titre : SUBSTRAT METALLIQUE TEXTURE CRISTALLOGRAPHIQUEMENT, DISPOSITIF TEXTURE CRISTALLOGRAPHIQUEMENT, CELLULE ET MODULE PHOTOVOLTAÏQUE COMPRENANT UN TEL DISPOSITIF ET PROCÉDE DE DEPOT DE COUCHES MINCES

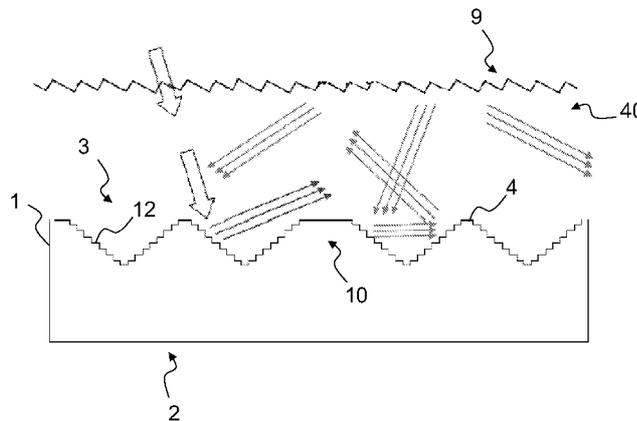


FIGURE 6

(57) Abstract: The invention relates to a crystallographically textured metal substrate (1) that comprises a connection surface (2) and a surface (3) for receiving a thin layer deposit, said crystallographically textured metal substrate being made of an alloy having a cubic crystalline system with centred faces and a cubic crystallographic structure {100} representing a majority, the surface for receiving the thin layer deposit (3) including grains (4) having for the majority crystallographic planes {100} parallel to the surface (3) for receiving a thin layer deposit. According to the invention, the alloy is an iron-nickel alloy having the following composition in wt % relative to the total weight of said alloy: Ni \geq 30 %, Cu < 15 %, Cr \leq 15 %, Co \leq 12 %, Mn \leq 5 %, S < 0.0007 %, P < 0.003 %, B < 0.0005 %, Pb < 0.0001 %, the percentages of nickel, chromium, copper, cobalt and manganese being such that the alloy meets the following condition $34 \% < (Ni + Cr + Cu/2 + Co/2 + Mn)$, the alloy containing up to 1 wt % of one or more deoxidising elements selected from silicon, magnesium, aluminium and calcium, the balance of the elements constituting the alloy consisting of iron and impurities.

[Suite sur la page suivante]

WO 2009/030865 A2



MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI,

Déclaration en vertu de la règle 4.17 :

— relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv))

Publiée :

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport

(57) **Abrégé :** L'invention concerne un substrat métallique texture cristallographiquement (1) comprenant une surface de connexion (2) et une surface (3) destinée à accueillir un dépôt de couche mince, ledit substrat métallique texture cristallographiquement (1) étant constitué d'un alliage présentant un système cristallin cubique à faces centrées et une texture cristallographique cube {100} <001> majoritaire, la surface destinée à accueillir le dépôt de couche mince (3) comprenant des grains (4) présentant majoritairement des plans cristallographiques {100} parallèles à la surface (3) destinée à accueillir un dépôt de couche mince. Selon l'invention, l'alliage est un alliage fer-nickel ayant une composition comprenant, en % en poids par rapport au poids total dudit alliage : Ni \geq 30 %, Cu < 15 %, Cr \leq 15 %, Co \leq 12 %, Mn \leq 5 %, S < 0,0007 %, P < 0,003 %, B < 0,0005 %, Pb < 0,0001 %, les pourcentages en nickel, chrome, cuivre, cobalt et manganèse étant tels que l'alliage satisfait la condition suivante : $34 \% < (Ni + Cr + Cu/2 + Co/2 + Mn)$, et l'alliage comprend jusqu'à 1 % en poids d'un ou plusieurs éléments désoxydants choisis parmi le silicium, le magnésium, l'aluminium et le calcium, le reste des éléments constituant l'alliage étant du fer et des impuretés.

SUBSTRAT METALLIQUE TEXTURE CRISTALLOGRAPHIQUEMENT, DISPOSITIF
TEXTURE CRISTALLOGRAPHIQUEMENT, CELLULE ET MODULE
PHOTOVOLTAÏQUE COMPRENANT UN TEL DISPOSITIF ET
PROCEDE DE DEPOT DE COUCHES MINCES

L'invention concerne un substrat métallique texturé cristallographiquement, un dispositif texturé cristallographiquement, une cellule et un module photovoltaïque comprenant un tel dispositif et un procédé de dépôt de couches minces.

Dans l'industrie des cellules photovoltaïques, le développement des couches
5 minces à base de silicium sur des substrats céramiques, verres ou métalliques, est l'alternative à la pénurie actuelle de silicium monocristallin ou multi-cristallin massif. En effet, les technologies d'élaboration de films minces permettent de réduire considérablement les quantités de silicium utilisé.

Les cellules photovoltaïques à couches minces présentent actuellement deux
10 filières d'élaboration distinctes. La première filière concerne les couches minces de silicium amorphe, polymorphe, nanocristallin et microcristallin. La deuxième filière concerne les couches minces de silicium polycristallin.

Dans la première filière, les couches minces de silicium amorphe sont généralement déposées à basses températures (100°C à 350°C) par des techniques plasma comme
15 par exemple la technique de dépôt chimique en phase vapeur assistée par plasma (PECVD « Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition ») sur des substrats de verre ou encore sur des substrats flexibles et à faibles coûts tels que les polymères et aciers inoxydables.

Cette technologie présente des avantages à caractères économiques mais aussi
20 deux points faibles majeurs qui sont un rendement de conversion limité à 10% en procédé industriel et une dégradation du rendement sous éclaircissement dite instabilité de Staebler-Wronski, dans le cas du silicium amorphe.

Le phénomène de dégradation peut être limité par l'élaboration de couches minces
25 de silicium polymorphe caractérisées par l'incorporation de nano-cristallites de silicium au sein du silicium amorphe.

Dans le cas du silicium polycristallin, les procédés d'obtention du silicium ont recours à des étapes à haute température. Il est possible de déposer du silicium amorphe à basse température mais il est recristallisé par un recuit à haute température.

Il est difficile d'optimiser le compromis entre le rendement de conversion et le coût
30 de fabrication des cellules photovoltaïques.

On connaît du document « Roedern, K. Zweibel and HS. Ullal, The role of polycrystalline thin-film PV technologies for achieving mid-term marketcompetitive PV modules – B.– 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition - NREL/CP-520-37353 - Lake Buena Vista, Florida, January 3-7, 2005 », des méthodes
35 permettant d'élaborer des films minces de silicium polycristallin (poly-Si).

Il est aujourd'hui admis que pour obtenir un rendement élevé, il est nécessaire de développer des couches de silicium polycristallin, tel que décrit dans le document « Bergmann and JH. Werner, The future of crystalline silicon films on foreign substrates – Thin Solid Films, 403-404, 162-169, 2002 ».

5 L'augmentation significative du rendement de conversion des couches minces de silicium cristallisé nécessite la mise en oeuvre de techniques d'élaboration offrant une fraction volumique cristallisée importante et des grains de taille la plus élevée possible. Les procédés de dépôt usuels comportent une phase de dépôt de silicium amorphe ou partiellement cristallisé. Le degré de cristallisation dépend de la température de dépôt.
10 Les procédés de dépôt usuels comportent également une phase de cristallisation du silicium amorphe au moyen d'un traitement thermique compris entre 600°C et 1000°C (ex : TTH sous vide, TTH laser) ou par introduction du film mince dans un réacteur spécifique (ex : plasma sous hydrogène, micro-ondes, etc).

Ainsi, diverses techniques de dépôt à hautes températures ($T > 650^\circ\text{C}$), de films
15 minces de silicium polycristallin, incluant par exemple des procédés en phase vapeur et des procédés de traitements thermiques en four statique ou au moyen d'un laser, ont initialement été utilisés.

Néanmoins, ces techniques de cristallisation entraînent des problèmes d'instabilité des substrats à haute température, ou d'interaction entre le substrat et les films minces.
20 Pour obtenir un dépôt et une cristallisation du silicium à basses températures ($T < 600^\circ\text{C}$), il est connu, du document EP 0 571 632, de déposer du silicium amorphe sur du verre par les techniques de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ou de dépôt chimique en phase vapeur assistée par plasma (PECVD), à $T < 450^\circ\text{C}$, puis à exposer le film mince dans un champ électrique micro-onde de 400W en présence d'hydrogène.
25 On obtient un film mince de silicium polycristallin texturé selon une orientation préférentielle {110}.

Le document "T. Matsuyama, N. Bada, T. Sawada, S. Tsuge, K. Wakisaka, S. Tsuda, High-quality polycrystalline silicon thin film prepared by a solide phase crystallisation method, J. of non- Crystalline Solids, 198-200, 940-944, 1996", divulgue
30 une autre solution consistant à déposer un premier film de silicium servant de couche de nucléation sur du quartz à 600°C par la technique de dépôt PECVD. Le film obtenu est constitué de cristaux de 0,1 μm de silicium disposés au sein de la phase amorphe.

Un second film amorphe de silicium est alors déposé par la technique de dépôt PECVD et cristallisé par un traitement thermique à 600°C pendant 10h.

35 On obtient un film mince cristallisé à structure colonnaire présentant un rendement de conversion de 9,2%.

D'autres solutions pour obtenir des couches minces polycristallines avec un rendement de conversion élevé, consistent à réaliser des structures à grains de silicium orientés ou épitaxiés.

Le document WO 96/17388 divulgue un procédé largement connu qui est l'utilisation de couches d'amorçage de silicium déposé à l'état amorphe puis cristallisé pour servir de germes de croissance épitaxiale à la couche mince suivante. Ce procédé est un procédé multi-couches.

5 Le document US 5 340 410 divulgue une autre technique consistant à sélectionner une orientation {111} des grains de silicium, par attaque chimique sélective d'un film de silicium polycristallin à gros grains (40 μm à 50 μm , obtenu par traitement thermique), dans une solution d'hydroxyde de potassium. Un second film mince de silicium présentant une orientation {111} est alors obtenu par un procédé de dépôt en phase
10 liquide (solution de métal liquide sursaturée en silicium).

Les méthodes de dépôt de l'art antérieur proposées ci-dessus ne permettent pas de régler les problèmes concernant le substrat. Il existe en effet deux classes de substrats employés selon la température d'élaboration.

Pour le dépôt de couches minces à base de silicium, certains substrats utilisés sont
15 à une température de fusion élevée ($T > 1000^\circ\text{C}$) : silicium, quartz, graphite, céramiques, métaux (par exemple titane), alliages et aciers.

D'autres substrats nécessitent une élaboration à basse température de fusion ($T < 1000^\circ\text{C}$) : polymères et verre.

Comme vu précédemment, ces substrats présentent tous au moins un inconvénient
20 majeur à être utilisés pour la fabrication industrielle de cellules photovoltaïques.

Un des objectifs de la présente invention est donc de proposer un substrat, mince, non fragile, flexible, ayant une température de fusion élevée et des caractéristiques structurales favorables à une croissance orientée ou épitaxiale des films minces

Un autre objectif de la présente invention est de proposer un dispositif formé d'un
25 substrat métallique tel que décrit ci-dessus et d'une couche mince polycristalline à base de silicium et à usage photovoltaïque.

Un autre objectif de la présente invention est de proposer une cellule et un module photovoltaïque plus performants, permettant de piéger d'avantage la lumière et présentant ainsi un meilleur rendement électrique.

30 Un autre objectif de la présente invention est également de proposer un procédé de dépôt de couches minces permettant d'éviter toute pollution du silicium par le substrat.

A cet effet, l'invention concerne un substrat métallique texturé cristallographiquement comprenant une surface de connexion et une surface destinée à accueillir un dépôt de couche mince, ledit substrat métallique texturé
35 cristallographiquement étant constitué d'un alliage présentant un système cristallin cubique à faces centrées et une texture cristallographique cube {100} $\langle 001 \rangle$ majoritaire, la surface destinée à accueillir le dépôt de couche mince comprenant des grains présentant majoritairement des plans cristallographiques {100} parallèles à la surface destinée à accueillir un dépôt de couche mince.

On entend par « texture cristallographique » une orientation préférentielle des cristaux de l'alliage par rapport au référentiel du substrat métallique. La texture est mesurée par diffraction des rayons X et représentée par des figures de pôles, comme décrit plus loin.

5 Selon l'invention, l'alliage constituant le substrat métallique texturé cristallographiquement est un alliage fer-nickel dont la composition comprend, en % en poids par rapport au poids total de l'alliage :

Ni \geq 30 %,

Cu \leq 15 %,

10 Cr \leq 15 %,

Co \leq 12 %,

Mn \leq 5 %,

S $<$ 0,0007 %,

P $<$ 0,003 %,

15 B $<$ 0,0005 %,

Pb $<$ 0,0001 %,

- les pourcentages en nickel, chrome, cuivre, cobalt et manganèse sont tels que l'alliage satisfait la condition suivante :

$$34 \% \leq (\text{Ni} + \text{Cr} + \text{Cu}/2 + \text{Co}/2 + \text{Mn}), \text{ et}$$

20 - l'alliage comprend jusqu'à 1% en poids d'un ou plusieurs éléments désoxydants choisis parmi le silicium, le magnésium, l'aluminium et le calcium, le reste des éléments constituant l'alliage étant du fer et des impuretés.

Dans différents modes de réalisation possibles, la présente invention concerne également les caractéristiques suivantes qui pourront être considérées isolément ou
25 selon toutes leurs combinaisons techniquement possibles et apportent chacune des avantages spécifiques :

- les pourcentages en nickel, chrome, cuivre, cobalt et manganèse sont tels que l'alliage satisfait la condition suivante :

$$34 \% \leq (\text{Ni} + \text{Cr} + \text{Cu}/2 + \text{Co}/2 + \text{Mn}) \leq 54 \%,$$

30 le coefficient moyen de dilatation, entre 20°C et 100°C, α_{20}^{100} de l'alliage étant supérieur à 10^{-6} K^{-1} , et de préférence compris entre 10^{-6} K^{-1} et $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,

- la surface destinée à accueillir un dépôt de couche mince du substrat métallique texturé cristallographiquement présente une rugosité R_a inférieure à 150 nm, et de préférence inférieure à 50 nm,

35 - le substrat métallique texturé cristallographiquement est mince avec une épaisseur comprise entre 0,5 mm et 0,05 mm, de préférence de l'ordre de 0,1 mm,

- les grains sur la surface destinée à accueillir un dépôt de couche mince sont gravés en forme de pyramide présentant des plans {111} et des marches selon les plans {100} de façon à former un réseau de type réseau blazé.

Le substrat métallique texturé cristallographiquement, selon l'invention, présente les avantages d'être mince, non fragile, flexible, avec une température de fusion élevée, un paramètre de maille proche de celui du silicium et des semiconducteurs à base de silicium, une rugosité de surface contrôlée avant gravure chimique, une géométrie de surface après gravure chimique permettant de réduire la réflectivité du substrat métallique texturé cristallographiquement et une dilatation adaptée à celle du silicium.

10 L'invention concerne également un dispositif texturé cristallographiquement.

Selon l'invention, il comprend un substrat métallique texturé cristallographiquement, tel que défini précédemment, sur lequel a été déposé une couche mince polycristalline à base de silicium, la couche mince polycristalline présentant une orientation cristallographique préférentielle {100} et {111}.

15 On entend par « à base de silicium », une couche mince polycristalline pouvant comprendre soit pratiquement que du silicium, du silicium dopé ou une composition comprenant du silicium et d'autres éléments chimiques (par exemple une couche mince de composition $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$).

20 La couche mince polycristalline à base de silicium déposée sur le substrat présente une fraction volumique de silicium cristallisé importante, une fraction volumique de gros grains de silicium importante et des grains de silicium orientés.

Une telle association substrat métallique texturé cristallographiquement / couche mince polycristalline à base de silicium permet de réduire considérablement les quantités de silicium utilisé.

25 La distribution de la lumière dans la couche mince de silicium est également améliorée.

Dans différents modes de réalisation possibles, la présente invention concerne également les caractéristiques suivantes qui pourront être considérées isolément ou selon toutes leurs combinaisons techniquement possibles et apportent chacune des avantages spécifiques :

- le paramètre de maille cristalline du substrat métallique texturé cristallographiquement est identique ou presque à celui de la couche mince polycristalline à base de silicium,
- le coefficient moyen de dilatation de l'alliage constituant le substrat métallique texturé cristallographiquement est proche de celui de la couche mince polycristalline,
- la couche mince polycristalline à base de silicium présente une épaisseur inférieure à 10 μm , de préférence inférieure à 5 μm , et comprend des cristaux de silicium de dimension comprise entre 0,1 et 2 μm .

La couche mince polycristalline à base de silicium déposée sur le substrat métallique texturé cristallographiquement présente une fraction volumique de silicium cristallisé importante, une fraction volumique de gros grains de silicium importante et des grains de silicium orientés. L'orientation des grains présents sur la surface du substrat métallique texturé cristallographiquement est reprise en partie par le silicium.

Une telle association substrat métallique texturé cristallographiquement / couche mince polycristalline à base de silicium permet de réduire considérablement les quantités de silicium utilisé (couche d'épaisseur inférieure à 5 µm).

La distribution de la lumière dans la couche mince polycristalline de silicium est également améliorée.

Le fait que le coefficient moyen de dilatation de l'alliage fer-nickel soit proche de celui du film mince polycristallin à base de silicium permet de limiter les contraintes thermiques générées sur le film polycristallin à base de silicium en fonctionnement et d'augmenter la durée de vie des cellules photovoltaïques.

L'invention concerne également une cellule photovoltaïque.

Selon l'invention, elle comprend un dispositif texturé cristallographiquement, tel que défini précédemment.

Dans différents modes de réalisation possibles, la présente invention concerne également les caractéristiques suivantes qui pourront être considérées isolément ou selon toutes leurs combinaisons techniquement possibles et apportent chacune des avantages spécifiques :

- la cellule photovoltaïque comprend :

- un dispositif texturé cristallographiquement dans lequel :

- le substrat métallique texturé cristallographiquement présente une teneur en nickel égale à 41% en poids par rapport au poids total de l'alliage constituant le substrat métallique,

- le silicium de la couche mince de silicium est dopé,

- une couche mince de silicium intrinsèque polycristallin déposée sur le dispositif texturé cristallographiquement,

- une couche mince de silicium polycristallin dopé déposée sur la couche mince de silicium intrinsèque polycristallin,

- une couche mince d'un oxyde transparent conducteur déposée sur la couche mince de silicium polycristallin dopé, et

- une grille métallique disposée sur la couche mince d'oxyde transparent conducteur et comprenant plusieurs éléments dont un élément de grille central.

- le dispositif texturé cristallographiquement et les différentes couches minces sont traversés par un connecteur relié à l'élément de grille central et débouchant à l'extérieur de la cellule photovoltaïque à travers la surface de connexion du

substrat métallique texturé cristallographiquement, ledit connecteur étant entouré d'un isolant s'étendant depuis la surface de connexion du substrat métallique texturé cristallographiquement jusqu'à l'élément de grille central.

L'invention concerne également un module photovoltaïque.

5 Selon l'invention, le module photovoltaïque comprend :

- une couche mince de polymère,
- deux couches minces de colle thermoréactivable, dont une première et une deuxième couches minces de colle thermoréactivable, la première couche mince de colle thermoréactivable étant déposée sur la couche mince de polymère,
- 10 - une couche conductrice formée d'une pluralité de cellules photovoltaïques, telles que définies précédemment, et de deux bandes de cuivre disposées aux extrémités respectives de la couche conductrice formée d'une pluralité de cellules photovoltaïques, lesdites cellules photovoltaïques étant sous forme de bandes et les deux bandes de cuivre étant disposées entre les première et
- 15 deuxième couches minces de colle thermoréactivable, parallèlement les unes par rapport aux autres, inclinées par rapport aux couches minces de colle thermoréactivable et en se chevauchant de façon à former une rangée de cellules photovoltaïques et de bandes de cuivre en contact selon une direction parallèle aux couches minces de colle thermoréactivable, la pluralité de cellules
- 20 photovoltaïques et les deux bandes de cuivre formant une connexion en série, et
- une couche mince de polyméthylméthacrylate déposée sur la deuxième couche mince de colle thermoréactivable.

Selon l'invention, la cellule et le module photovoltaïque sont plus performants, et permettent de piéger d'avantage la lumière. Un rayon lumineux frappant

25 orthogonalement la cellule ou le module photovoltaïque aura tendance à se réfléchir et à rester piégé dans la couche mince polycristalline à base de silicium. Le rendement électrique de la cellule ou du module photovoltaïque est amélioré. Pour une même quantité d'énergie lumineuse incidente sur la surface de la cellule ou du module photovoltaïque, la quantité d'énergie électrique convertie et obtenue avec une telle

30 cellule ou un tel module photovoltaïque est supérieure par rapport à la quantité d'énergie électrique obtenue avec une cellule ou un module photovoltaïque de l'art antérieur.

L'invention concerne également un procédé de dépôt de couches minces à base de silicium sur un substrat métallique texturé cristallographiquement, tel que défini

35 précédemment.

Selon l'invention, il est réalisé par une méthode de dépôt chimique en phase vapeur (CVD), la température du plasma étant inférieure à 300 °C, de préférence de l'ordre de 200 °C.

Dans différents modes de réalisation possibles, la présente invention concerne également les caractéristiques suivantes qui pourront être considérées isolément ou selon toutes leurs combinaisons techniquement possibles et apportent chacune des avantages spécifiques :

- 5 - la méthode de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est une méthode de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma radiofréquence (RFPECVD), le plasma comprenant un mélange gazeux de silane nous avons utilisé le SiF₄, d'hydrogène et d'argon, et la puissance radiofréquence utilisée étant de l'ordre de 16 W.
- 10 - la croissance épitaxiale du silicium est obtenue à partir de nanocristaux de silicium synthétisés dans le plasma.

Le procédé de dépôt de couches minces réalisé à basse température permet d'éviter toute pollution du silicium par les éléments constituant le substrat métallique texturé cristallographiquement.

- 15 Les rendements de conversion sont également améliorés.

Le substrat métallique texturé cristallographiquement permet de favoriser les mécanismes de croissance épitaxiale ou orientée à gros grains du silicium, directement pendant les phases de dépôts.

- 20 L'invention sera décrite plus en détail en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 représente une figure de pôle {111} qui est caractéristique de la texture cristallographique cube majoritaire ;
- la figure 2 représente une figure de pôle {111} qui est caractéristique de la texture cristallographique cube + macle/cube ;
- 25 - la figure 3 représente une figure de pôle {111} qui est caractéristique d'une texture cristallographique isotrope ;
- la figure 4 représente deux figures de pôles {111} de films minces de silicium polycristallin obtenus selon deux modes de réalisation différent de l'invention ;
- les figures 5a et 5b représentent des observations à des agrandissements différents, réalisées au microscope électronique à balayage, obtenues après gravure chimique de la surface d'un substrat métallique texturé cristallographiquement comprenant un alliage fer-nickel avec 41% de nickel ;
- 30 - la figure 6 représente un dispositif texturé cristallographiquement comprenant un substrat métallique texturé cristallographiquement ayant subi une gravure chimique ;
- 35 - la figure 7 représente la répartition des cavités pyramidales après gravure chimique de la surface du substrat ;
- la figure 8 représente une cellule photovoltaïque, selon un mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 9 représente une cellule photovoltaïque à contact arrière, selon un autre mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 10 représente un module photovoltaïque, selon un mode de réalisation de l'invention ;
- 5 - la figure 11 représente une bande de substrat métallique texturé cristallographiquement comprenant des sillons gravés ;
- la figure 12 représente un mode opératoire de dépôt de couches minces par décomposition chimique des gaz réactifs dans un plasma de décharge à basse température ;
- 10 - la figure 13 représente un agrandissement de la zone de croissance du silicium sur la couche mince polycristalline pendant le mode opératoire.

L'invention concerne un substrat métallique texturé cristallographiquement 1 comprenant une surface de connexion 2 et une surface 3 destinée à accueillir un dépôt de couche mince, comme représenté sur la figure 6. Le substrat métallique texturé
15 cristallographiquement 1 est constitué d'un alliage présentant un système cristallin cubique à faces centrées et une texture cristallographique cube {100} <001> majoritaire. La surface destinée à accueillir le dépôt de couche mince 3 comprend des grains 4 présentant majoritairement des plans cristallographiques {100} parallèles à la surface 3 destinée à accueillir un dépôt de couche mince. L'alliage constituant le
20 substrat métallique texturé cristallographiquement 1 doit avoir une énergie de défaut d'empilement élevée.

Selon un exemple de mode de réalisation de l'invention, l'alliage constituant le substrat métallique texturé cristallographiquement 1 est un alliage fer-nickel comprenant au moins 30% de nickel et pouvant comprendre des éléments de
25 substitution du nickel tels que le chrome, le cuivre, le cobalt ou le manganèse. Ces éléments doivent respecter la relation suivante :

$$34\% \leq (\text{Ni} + \text{Cr} + \text{Cu}/2 + \text{Co}/2 + \text{Mn}) ;$$

30 Les teneurs en éléments de substitution du nickel sont par ailleurs limitées comme suit : la teneur en cuivre est inférieure ou égale à 15% en poids, la teneur en chrome est inférieure ou égale à 15% en poids, la teneur en cobalt est inférieure ou égale à 12% en poids, et la teneur en manganèse est inférieure ou égale à 5% en poids.

De manière préférée, les teneurs en nickel, chrome, cuivre, cobalt et manganèse
35 sont telles que :

$$34\% \leq (\text{Ni} + \text{Cr} + \text{Cu}/2 + \text{Co}/2 + \text{Mn}) \leq 54\% ;$$

L'alliage ainsi défini présente un coefficient moyen de dilatation α_{20}^{100} , entre 20°C et 100°C, supérieur à 10^{-6} K^{-1} , et de préférence compris entre 10^{-6} K^{-1} et $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

L'alliage peut également comprendre jusqu'à 1% d'éléments de désoxydation choisis parmi le silicium, le magnésium, l'aluminium et le calcium.

5 L'alliage peut également comprendre des éléments chimiques résiduels résultant de l'élaboration. La teneur en éléments chimiques résiduels doit être réduite au minimum et ne pas excéder 1% en poids par rapport au poids total de l'alliage. Les impuretés sont constituées des éléments chimiques suivants : titane, molybdène, tungstène, niobium, tantale et vanadium qui doivent vérifier la relation suivante :

10

$$(\text{Ti} + \text{Mo} + \text{W} + \text{Nb} + \text{Ta} + \text{V}) \leq 1\% ;$$

Les éléments connus pour affecter la solidification et la transformation à chaud des alliages fer-nickel doivent être réduits également au minimum. La teneur en soufre doit
15 être inférieure à 0,0007% en poids par rapport au poids total de l'alliage. La teneur en phosphore doit être inférieure à 0,003% en poids par rapport au poids total de l'alliage. La teneur en bore doit être inférieure à 0,0005% en poids par rapport au poids total de l'alliage. Et la teneur en plomb doit être inférieure à 0,0001% en poids par rapport au poids total de l'alliage.

20 Ce qui suit décrit le procédé de fabrication du substrat métallique texturé cristallographiquement 1.

Les documents, "Recrystallisation and related annealing phenomena – FJ. Humphreys, M. Hatherly – ed. Pergamond, p.328, 1995" et EP 0 792 943 décrivent des procédés d'élaboration de substrats métalliques texturés cristallographiquement.

25 Il est connu de ces documents que la texture cristallographique de recristallisation cube {100} <001> se développe dans les alliages ayant un système cristallin cubique faces centrées (cfc), à moyenne et forte énergie de défaut d'empilement. Plusieurs facteurs favorables au développement de la texture cristallographique cube sont clairement identifiés :

30 • le substrat métallique texturé cristallographiquement doit subir un taux de déformation par laminage à froid très élevé, au moins supérieur à 80%, et de préférence supérieur à 90%. La texture cristallographique cube est d'autant plus intense que le taux de déformation avant traitement thermique est élevé ;

35 • un traitement thermique de recristallisation primaire du substrat métallique texturé cristallographiquement fortement écroui est nécessaire ;

• les concentrations en éléments chimiques résiduels tels que le titane, le molybdène, le tungstène, le niobium, le tantale ou le vanadium dans l'alliage doivent être inférieures à 1 %. La teneur critique dépend de l'élément chimique considéré ;

• la taille des grains avant déformation sévère doit être la plus fine possible ;

- enfin, la température de laminage doit être supérieure à la température ambiante.

Le procédé de fabrication du substrat métallique texturé cristallographiquement 1, selon un exemple de réalisation de l'invention, comprend une étape d'élaboration de l'alliage constituant le substrat métallique texturé cristallographiquement 1.

5 L'alliage constituant le substrat métallique texturé cristallographiquement 1 est élaboré dans un four électrique à arc, coulé en lingots ou directement sous forme de brames au moyen d'une coulée continue de brames. Les lingots comme les brames sont transformés à chaud de façon à obtenir des bandes à chaud dont l'épaisseur est comprise entre 1,5 mm et 13 mm.

10 Les bandes à chaud sont décapées et polies pour obtenir des bobines présentant une surface sans défaut, c'est à dire : sans calamine, sans pénétration oxydée, sans paille, homogène en épaisseur dans le sens travers et le sens long des feuilles d'alliage.

Le procédé de fabrication du substrat métallique texturé cristallographiquement 1
15 comprend également une étape de laminage et texturation cristallographique des bandes.

Les bandes à chaud sont transformées par laminage à froid. Le taux de réduction, $\varepsilon = (e_i - e_f) / e_i$, où e_i et e_f sont respectivement l'épaisseur initiale et l'épaisseur finale des
20 feuilles d'alliage, doit être supérieur à 85%, et de préférence $\varepsilon > 90\%$. Ce taux de déformation sévère avant traitement thermique est indispensable pour préparer la microstructure de l'alliage. On obtient ainsi une feuille d'alliage fortement écrouie dont l'épaisseur est comprise entre 0.05 mm et 1 mm. Tout procédé de déformation sévère par laminage à froid symétrique ou asymétrique (c'est à dire avec vitesses
25 circonférentielles des cylindres de travail du laminoir identiques ou différentes) produisant une déformation supérieure à 90% est applicable pour développer la texture cristallographique cube et plus particulièrement le procédé décrit dans le document « Ultra-Grain refinement of 36%Ni steel by accumulative roll-bonding process – K. Inoue, N. Tsuji, Y. Saito – International symposium on Ultrafine Grained Steels (ISUGS 2001) 126-129 – The Iron and Steel Institute of Japan ».

30 Le procédé de fabrication du substrat métallique texturé cristallographiquement 1 comprend également une étape de transfert de rugosité.

Le procédé ci dessous est cité comme exemple, non unique, de réalisation.

La rugosité des feuilles d'alliage est maîtrisée au cours des passes de laminage. On réalise par exemple à partir d'une bande laminée à chaud de 3 mm d'épaisseur, une
35 feuille d'alliage écrouie de 95%, c'est à dire ayant une épaisseur finale de 0,15 mm.

Le laminage à froid est réalisé, par exemple, en 13 passes de 20% sur un laminoir réversible avec des cylindres de faible rugosité. En fin de chaque passe, la rugosité de la feuille d'alliage n'excède pas 200 nm.

La 14^{ème} passe de laminage est celle qui réalise le transfert de rugosité souhaité. Le taux de réduction est inférieur à 20%, et plus précisément inférieur à 7%, il est appelé 'skin-pass'. Cette dernière passe est réalisée avec un cylindre de très faible rugosité pour obtenir la rugosité R_a visée ($R_a \sim 30$ nm).

5 Le procédé de fabrication du substrat métallique texturé cristallographiquement 1 comprend également une étape de texturation cristallographique des bandes.

Après laminage à froid, la feuille d'alliage est soumise à un traitement thermique (TTH) de recristallisation primaire, sous atmosphère protectrice, de façon à développer la texture cristallographique cube $\{100\} \langle 001 \rangle$ recherchée, sans oxyder la surface de la
10 bande.

Le traitement thermique peut être réalisé dans un four statique ou dans un four au défilé, sous hydrogène ou sous vide primaire. Le couple temps t , température T °C, doit être ajusté pour développer une texture cristallographique cube intense et peu désorientée. Si la température est trop élevée (par exemple : $T > 1100$ °C) ou si la
15 durée est trop longue (par exemple 6 h à 1080 °C), le traitement thermique peut générer une recristallisation secondaire qui détruit la composante cube recherchée au détriment d'autres composantes aléatoires indésirables. Les traitements thermiques types sont :

$T = 1050$ °C, $t = 0.2$ mn à $t = 2$ mn ;

$T = 1000$ °C, $t = 0.5$ mn à $t = 60$ mn ;

20 $T = 950$ °C, $t = 2$ mn à $t = 200$ mn ;

$T = 900$ °C, $t = 8$ mn à $t = 600$ mn.

A l'issue du traitement thermique final, la feuille d'alliage présente une texture cristallographique cube intense et faiblement désorientée, avec une taille de grains comprise entre 1 μ m et 100 μ m et une rugosité moyenne R_a inférieure à 50 nm,
25 permettant l'utilisation directe de l'alliage après un simple dégraissage.

La feuille d'alliage est alors planée et cisailée à la largeur déterminée par le procédé de dépôt du silicium.

On obtient un substrat métallique 1 présentant une texture cristallographique cube $\{100\} \langle 001 \rangle$ intense et faiblement désorientée.

30 La représentation d'une texture cristallographique revient à définir l'orientation des grains par rapport au référentiel échantillon constitué, dans le cas d'un substrat ayant subi une gamme de laminage à froid, par la direction de laminage (DL), la direction transverse (DT) et la direction normale (DN).

Les orientations ou composantes de textures cristallographiques sont décrites par
35 les indices de Miller $\{hkl\} \langle uvw \rangle$, où $\{hkl\}$ désigne la famille de plans cristallographiques des grains parallèles au plan de laminage et $\langle uvw \rangle$ la famille de directions cristallographiques des grains parallèles à la direction de laminage.

Une texture cristallographique est généralement décrite par diffraction des rayons X selon la méthode en réflexion de Schulz. L'échantillon est placé au centre d'un

goniomètre de texture cristallographique en position de diffraction, à un angle de Bragg Θ , correspondant aux conditions de diffraction d'une famille de plans $\{hkl\}$. Il est alors soumis aux rotations ψ (axe parallèle à DT) et φ (axe parallèle à DN). En position ψ et φ donnés, l'intensité du faisceau recueilli par le compteur RX est proportionnelle au
 5 nombre de grains dont les plans $\{hkl\}$ sont en condition de diffraction. En faisant varier ψ de 0° à 90° et φ de 0° à 360° toutes les composantes de la texture cristallographique sont mesurées.

La texture cristallographique du substrat métallique texturé cristallographiquement 1 est alors représentée sous forme de figures de pôles au moyen des projections
 10 stéréographiques des distributions de densités des normales aux plans $\{hkl\}$ diffractant.

La texture cristallographique du substrat est caractérisée par la présence d'une composante cube quasi-unique, intense et faiblement désorientée. La composante cube quasi-unique est en général associée à la composante $\{221\}\langle 122 \rangle$, nommée macle/cube, et qui doit être minimisée.

15 Les figures 1 à 3 montrent des exemples de figures de pôles $\{111\}$ mesurées sur des substrats métalliques d'alliage fer-nickel à système cristallin cubique faces centrées comprenant une teneur de 41% de nickel par rapport au poids total de l'alliage.

La figure 1 représente une figure de pôle $\{111\}$ qui est caractéristique de la texture cristallographique cube majoritaire recherchée. La figure 2 représente une figure de
 20 pôle $\{111\}$ qui est caractéristique de la texture cristallographique cube + macle/cube et la figure 3 représente une figure de pôle $\{111\}$ qui est caractéristique d'une texture cristallographique isotrope.

La figure 1 montre la présence de pôles $\{111\}$ 5 de la texture cristallographique cube $\{100\}\langle 001 \rangle$ majoritaire, intense et peu désorientée. Dans les mêmes conditions de mesure, la figure 2 montre le cas où la composante macle/cube $\{221\}\langle 122 \rangle$ 6 est non négligeable par rapport à la composante cube moins intense et plus désorientée. La figure 3 montre un exemple de structure isotrope caractérisée par la présence de toutes les orientations possibles distribuées uniformément. Les figures 2 et 3 sont
 25 celles à éviter.

30 Le caractère unique et intense de la texture cristallographique cube peut être quantifié par le ratio : $R = I_c/I_{mc}$. I_c est l'intensité maximum diffractée par les plans $\{111\}$ au voisinage de l'orientation idéale $(001)[100]$: $\psi \sim 54.74^\circ$ et $\varphi \sim 45^\circ$. I_{mc} est l'intensité maximum diffractée par les plans $\{111\}$ au voisinage de l'orientation idéale $(122)[221]$: $\psi \sim 15.79^\circ$ et $\varphi \sim 13.63^\circ$.

35 Le ratio $R = I_c/I_{mc}$ doit être le plus élevé possible ($R > 10$).

La désorientation de la texture cristallographique cube peut être obtenue par la mesure de la largeur à mi-hauteur des intensités diffractées par les plans $\{111\}$ au voisinage de l'orientation idéale $(001)[100]$, c'est-à-dire en $\psi \sim 54.74^\circ$ et $\varphi \sim 45^\circ$, lorsque l'on fait varier l'angle ψ de $\pm \Delta\psi$ et φ de $\pm \Delta\varphi$.

La désorientation totale en φ mesurée à mi-hauteur doit être : $\delta\varphi < 20^\circ$. La désorientation totale en ψ mesurée à mi-hauteur doit être : $\delta\psi < 20^\circ$.

La figure de pôle 1 est donnée pour un substrat métallique texturé cristallographiquement 1 présentant un ratio $R = 18.5$, $\delta\varphi = 11,5^\circ$ et $\delta\psi = 11,9^\circ$, un
5 taux d'écroissance de 91% et une épaisseur de 0,15 mm.

La rugosité moyenne R_a du substrat métallique texturé cristallographiquement 1 doit être faible. La rugosité est l'état micro-géométrique de la surface.

Mesuré au moyen d'un rugosimètre, la rugosité moyenne R_a est définie par l'expression :

10

$$R_a = \frac{1}{L_0} \int_0^L |Z(x)| \cdot dx$$

Le substrat métallique texturé cristallographiquement 1 doit avoir une rugosité
15 moyenne mesurée dans le sens travers très faible : $R_a < 150$ nm et de préférence inférieure à 50 nm.

La taille des grains à la surface du substrat métallique texturé cristallographiquement 1 est supérieure à 1 μm .

Le substrat métallique texturé cristallographiquement 1 est mince avec une
20 épaisseur comprise entre 0,5 mm et 0,05 mm, de préférence de l'ordre de 0,1 mm.

L'invention concerne également un dispositif texturé cristallographiquement 13 comprenant un substrat métallique texturé cristallographiquement 1, tel que défini précédemment, sur lequel a été déposé une couche mince polycristalline à base de silicium 11 (Si ou $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ par exemple). Un tel dispositif texturé cristallographiquement
25 13 est représenté sur la figure 6. Le dispositif texturé cristallographiquement 13 est destiné à la fabrication de cellules photovoltaïques ou pour déposer des couches de silicium pour créer des dispositifs semi-conducteurs. Plus précisément, la couche mince polycristalline à base de silicium 11 est déposée sur la surface 3 du substrat destinée à accueillir un dépôt de couche mince. Sur cette figure, il est représenté un
30 ensemble de couches minces 40, qui seront décrites plus loin, comprenant, entre autre, la couche mince polycristalline à base de silicium 11 qui est en contact avec le substrat métallique.

La couche mince polycristalline à base de silicium 11 présente une orientation préférentielle $\{100\}$ et $\{111\}$.

35 La couche mince polycristalline à base de silicium 11 peut être déposée par épitaxie qui est un mécanisme connu de croissance cristalline avec arrangement des atomes. Le substrat métallique texturé cristallographiquement 1 est utilisé comme germe de croissance du film mince 11 au fur et à mesure de l'apport des atomes ou des nanocristaux de silicium. La croissance épitaxiale n'est en général possible que s'il y a

accord de maille entre le système cristallin déposé (dans notre cas, le silicium) et celui du substrat 1 (dans notre cas, le substrat en alliage fer-nickel). Les conditions usuelles d'épitaxie sont : même système cristallin (dans notre cas, le système cubique faces centrées du silicium) et paramètres de maille très voisins. Le désaccord D entre les

5 paramètres de maille, défini par l'expression suivante, doit être inférieur à 3% :

$$D = 100 \times (a_{\text{substrat}} - a_{\text{silicium}}) / a_{\text{silicium}} ;$$

où a est le paramètre de maille.

10 En présence d'épitaxie, la texture cristallographique du film mince 11 est approximativement identique à celle du substrat métallique texturé cristallographiquement 1. Selon l'art antérieur, l'épitaxie était réalisée à haute température. Nous verrons plus loin que le procédé de dépôt de silicium, selon l'invention, permet de réaliser une épitaxie à 200 °C.

15 Si l'écart des paramètres de maille est supérieur à 3% mais inférieur à 20%, il peut y avoir croissance orientée du film mince 11. Dans ce cas, les grains du film mince 11 présentent un plan cristallographique (hkl) parallèle à la surface du substrat métallique texturé cristallographiquement 1. Les grains du film mince 11 étant désorientés dans le plan du substrat 1, la figure de pôles représentant la texture cristallographique du film

20 mince est alors un anneau, comme le montre la figure 4. La couche mince est dite avoir une orientation {hkl}.

La figure 4 représente les figures de pôles {111} de films minces de silicium polycristallin 11 obtenus selon deux modes de réalisation de l'invention.

25 La figure de pôles {111} en haut de la figure correspond à un substrat métallique texturé cristallographiquement 1 n'ayant pas subi de gravure chimique.

La figure de pôles {111} en bas de la figure correspond à un substrat métallique texturé cristallographiquement 1 ayant subi une gravure chimique, comme décrite plus loin.

30 Les figures de pôles {111} révèlent la présence d'un film mince de silicium texturé. Les anneaux 7, 8 (le premier 8 au centre en $\psi = 0^\circ$, le deuxième 7 en $\psi = 54,8^\circ$) traduisent une orientation préférentielle des grains de silicium caractérisée par les directions $\langle 111 \rangle$ et $\langle 100 \rangle$ perpendiculaires ou les plans (111) et (100) parallèles à la surface du substrat métallique texturé cristallographiquement 1. Les grains sont désorientés dans le plan du substrat métallique texturé cristallographiquement 1.

35 Le dépôt sur un substrat métallique texturé cristallographiquement 1 n'ayant pas subi de gravure chimique favorise les orientations {111} et {100}. Le dépôt sur un substrat métallique texturé cristallographiquement 1 ayant subi une gravure chimique favorise l'orientation {100}.

Pour obtenir de tels résultats, le substrat 1 en alliage fer-nickel doit présenter les deux caractéristiques suivantes :

- Un système cristallin cubique à faces centrées ;
- Un désaccord limité, $D < 20\%$;

5 Il est possible d'obtenir des couches minces polycristallines à base de silicium 11 ayant une fraction volumique de silicium de 58% en volume pour des grains de taille inférieure à 0,1 μm et une fraction volumique de silicium de 42% pour des tailles de grains comprises entre 0,1 μm et 1 μm .

10 Le tableau suivant donne quelques exemples de paramètres pour des couches minces 11 obtenues avec différents substrats métalliques texturés cristallographiquement 1.

Alliage	Numérotation des films minces	Anisotropie Cristalline		Rugosité R_a (nm)
		Intensité : R	Désorientation : $(\delta\phi + \delta\varphi)/2$	
Fe-41Ni	1	18,5	11,7	21
	2			
Fe-41Ni	3	Isotrope		100
Fe-41Ni	4	Isotrope		20
Fe-48Ni	5	20,5	11,2	100
Ni-4W	6	8	30	100
Fe-33Ni-2Cr-3Cu	7	11	15	100

De bons résultats sont obtenus pour la couche mince n°1 qui présente une rugosité R_a de 21 nm, un ratio R de 18,5 et une désorientation de 11,7°.

25 L'alliage constituant le substrat métallique texturé cristallographiquement 1 doit présenter un coefficient de dilatation proche de celui du silicium, entre -25°C et $+150^\circ\text{C}$.

30 L'épaisseur du substrat 1 en alliage est de l'ordre de 100 μm alors que celle du film mince 11 est inférieure à 5 μm . Le substrat 1 impose donc au silicium ses variations de longueurs dues à la dilatation thermique. Si aucune précaution n'est prise pour adapter le coefficient de dilatation du substrat 1 à celui du silicium, le film mince 11 peut subir deux types d'endommagements dégradant les propriétés optoélectroniques : une décohésion du film mince 11 pouvant générer un pelage du dépôt de silicium, des fissurations du film mince 11 lorsque le substrat 1 le soumet à des contraintes de traction et l'apparition de dislocations dans la couche mince de silicium 11.

35 Les couches minces de silicium 11 sont déposées à des températures supérieures à 100°C . En outre la température de fonctionnement des cellules ou modules photovoltaïques est comprise entre -50°C et $+100^\circ\text{C}$. Il est par conséquent recommandé que le coefficient moyen de dilatation du substrat 1 soit supérieur ou égal

à celui du silicium ($\alpha_{Si} \sim 2.6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$) de façon à conserver la couche mince 11 en compression pendant son utilisation.

Le coefficient moyen de dilatation α_{20}^{100} du substrat 1 d'alliage entre 20°C et 100°C doit être supérieur à $10^{-6} K^{-1}$, et de préférence compris entre $10^{-6} K^{-1}$ et $10 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

5 La couche mince polycristalline à base de silicium 11 présente une épaisseur inférieure à 5 μm , de préférence comprise entre 2 à 3 μm , et comprend des cristaux de silicium de dimension comprise entre 0,1 μm et 2 μm .

Selon un autre mode de réalisation possible de l'invention, la surface 3 du substrat métallique texturé cristallographiquement 1, destinée à accueillir un dépôt de couche mince, peut subir une gravure chimique avant l'étape de dépôt de la couche mince polycristalline à base de silicium 11.

La texture cristallographique cube du substrat métallique texturé cristallographiquement 1 offre une structure comparable à celle d'un monocristal. Les grains dont la taille est proche de 10 μm (GASTM = 10) sont approximativement tous orientés de façon similaire puisque la désorientation recherchée entre les grains est inférieure à 20°.

Cette texture cristallographique cube caractérisée par la famille de plans {100} parallèles à la surface 3 destinée à accueillir un dépôt de couche mince, et la direction <001> parallèle à la direction de laminage est propice à la fabrication de figures d'attaques chimiques orientées comme le montrent les observations réalisées au microscope électronique à balayage, représentées sur les figures 5a et 5b à des grossissements différents, et obtenues sur un substrat métallique texturé cristallographiquement 1 comprenant un alliage fer-nickel contenant 41% de nickel. La figure 5a, située à gauche, représente un agrandissement de la figure 5b.

25 Le procédé de gravure chimique permet d'améliorer les performances des cellules photovoltaïques en couche mince en augmentant les possibilités de piégeage de la lumière dans les couches de silicium (« light trapping »).

Il est alors possible de contrôler la réflexion de la lumière sur la face arrière métallique en alliage fer-nickel en utilisant la symétrie particulière de la texture cristallographique cube et l'aptitude du substrat métallique 1 à être gravé par attaque chimique sélective des plans cristallographiques : la cinétique d'attaque chimique des plans {100} est plus élevée que celle des plans {111}.

La gravure peut être réalisée au trempé, par passage du substrat métallique 1 entre deux rouleaux pendant une durée comprise entre 0,1 et 1 mn, dans un bain thermostaté entre 15°C et 35°C et contenant par exemple une solution de divers chlorures:

- 0,1% de chlorure de lithium ;
- 0,1% de chlorure de tétraméthylammonium ;
- 2% de triéthanolamine.

En fin de gravure, le substrat métallique 1 est rincé abondamment dans plusieurs bains et séché à une température comprise entre 100°C et 200°C, toujours selon un procédé au défilé. Il est important d'avoir rincé suffisamment la surface 3 du substrat 1 afin d'éviter toute corrosion par les chlorures. Le substrat métallique 1 peut être huilé, dans ce cas il devra être dégraissé avant le dépôt du film mince 11.

Compte tenu de l'orientation des grains texturés 4, le résultat est une surface 3 de substrat constituée de pyramides inversées, comme représenté sur la figure 6, de quelques microns de hauteur, sur laquelle on peut construire une cellule photovoltaïque constituée d'une couche de silicium cristallin 11. La surface de la cellule photovoltaïque 9 est également représentée sur la figure 6.

On obtient alors un genre de réseau composé des plans cristallins attaqué préférentiellement. La surface 3 présente des plans {111}, ce qui génère des genres de cônes en surface. Les grains 4 sont en forme de pyramide présentant des plans {111} et comprenant des marches 12 selon les plans {100} de façon à former un réseau du type réseau blazé (« blazed grating »).

Deux effets se conjuguent. Premièrement, la réflexion sur les bords des cavités pyramidales 10 qui contribue à modifier le libre parcours moyen de la lumière dans la couche de silicium 11. Un rayon lumineux frappant orthogonalement la cellule photovoltaïque aura tendance à se réfléchir et à rester piégé dans la couche de silicium 11.

Deuxièmement, la diffraction sur les bords des trous qui représentent des petites marches 12 résultant de la gravure différentielle. On a alors une diffraction de la lumière du type réseau blazé. Ce réseau favorise la réflexion de la lumière dans les ordres d'interférence supérieurs, correspondant à une forte inclinaison des rayons lumineux, plutôt qu'une réflexion orthogonale des rayons lumineux.

Comme le montre la figure 7, les cavités pyramidales 10 sont réparties comme les grains d'alliage 4 et donc de manière aléatoire, ce qui améliore la distribution de la lumière dans la couche mince de silicium 11.

Le phénomène de réseau blazé tend à maintenir les fortes longueurs d'onde dans la couche de silicium 11.

Cette technique permet de faire diffracter les photons sur la surface du réseau ainsi créé et de les piéger dans les couches de silicium 11.

La structuration de la surface de la couche de silicium 11 permet d'atténuer la réflectivité du substrat métallique texturé cristallographiquement 1.

L'invention concerne également une cellule photovoltaïque comprenant un dispositif texturé cristallographiquement 1 tel que décrit précédemment.

Selon un mode de réalisation possible de l'invention, la cellule photovoltaïque comprend un dispositif texturé cristallographiquement 13 dans lequel le substrat métallique texturé cristallographiquement 1 présente une teneur en nickel égale à 41%

en poids par rapport au poids total de l'alliage constituant le substrat métallique. Le silicium de la couche mince de silicium polycristallin 11 peut être dopé. Il peut être dopé P ou N, soit au phosphore ou soit au bore, selon le type de diode désirée (PIN ou NIP).

La cellule photovoltaïque comprend également une couche mince de silicium intrinsèque polycristallin 14, non dopée, déposée sur le dispositif texturé cristallographiquement 13, une couche mince de silicium polycristallin dopé 15, déposée sur la couche mince de silicium intrinsèque polycristallin 14, une couche mince d'un oxyde transparent conducteur 16 déposée sur la couche mince de silicium polycristallin dopé au bore 15, et une grille métallique 17 disposée sur la couche mince d'un oxyde transparent conducteur 16 et comprenant plusieurs éléments dont un élément de grille central 18.

Le silicium de la couche mince de silicium polycristallin dopé 15 peut être dopé N ou P, soit au phosphore ou soit au bore, selon le type de diode désirée (PIN ou NIP).

La couche mince d'un oxyde transparent conducteur 16 peut être une couche d'oxyde d'indium-étain (ITO), de ZnO ou SnO₂, par exemple.

Les couches dopées sont très fines par rapport à l'épaisseur de la couche mince de silicium intrinsèque polycristallin 14.

Le silicium de la couche de silicium 11 est massivement cristallin, la part de silicium amorphe est inférieure à 1%. De plus, le silicium a une orientation préférentielle: les grains sont orientés avec leur plan {111} et {100} parallèles aux plans de l'alliage fer-nickel fortement texturé.

Un mode d'assemblage possible consiste à découper des plaquettes de cellule photovoltaïque, par exemple carrées et de connecter la surface supérieure sur la surface inférieure de la cellule photovoltaïque suivante en utilisant des méplats de cuivre.

Selon un autre mode de réalisation possible de l'invention, le dispositif texturé cristallographiquement 13 et les différentes couches minces 14 à 16 de la cellule photovoltaïque sont traversés par un connecteur 19, comme représenté sur la figure 9. Le connecteur 19 est relié à l'élément de grille central 18 et débouche à l'extérieur de la cellule photovoltaïque à travers la surface de connexion 2 du substrat métallique texturé cristallographiquement 1.

Le connecteur 19 est entouré d'un isolant 20 s'étendant depuis la surface de connexion 2 du substrat métallique texturé cristallographiquement 1 jusqu'à l'élément de grille central 18.

Une telle cellule photovoltaïque est appelée cellule photovoltaïque à contact arrière. Les deux connexions sont situées du même côté de la cellule photovoltaïque, c'est-à-dire du côté de la face arrière de la cellule photovoltaïque et plus précisément du côté de la surface de connexion 2 du substrat métallique texturé cristallographiquement 1. Le substrat métallique texturé cristallographiquement 1 est connecté négativement

(connexion négative) et le connecteur 19 est connecté positivement (connexion positive).

Il est possible de procéder selon le procédé de fabrication qui suit et qui comprend une étape de laminage et texturation de l'alliage fer-nickel.

5 Le procédé de fabrication comprend également une étape de gravure chimique de trous dans la surface du substrat métallique texturé cristallographiquement 1. On protège les zones qui ne doivent pas être gravées. La technique utilisable est celle employée pour fabriquer des "shadow-masks" de tubes à rayons cathodiques.

10 Une autre étape consiste à nettoyer la surface texturée non gravée par les techniques connues.

Puis, du silicium est déposé selon la méthode décrite ci-dessus et on fabrique une surface photovoltaïque.

15 Les trous qui contiennent aussi des couches de silicium sont ensuite nettoyés par sablage: il suffit de retourner le substrat métallique texturé cristallographiquement 1 et de graver en utilisant le substrat métallique texturé cristallographiquement 1 comme masque.

Les trous sont isolés, il suffit de sérigraphier la face arrière de la cellule photovoltaïque sans dépôt de silicium à l'aide d'un polymère fragile (qui pourra être sablé).

20 Et puis, à l'aide d'une buse, on sable un trou dans la zone isolante.

On sérigraphie un conducteur sur la couche mince d'oxyde d'indium-étain 16 qui remplira les trous et renverra, en face arrière de la cellule photovoltaïque, les électrons collectés par la couche mince d'oxyde d'indium-étain 16.

Les zones de découpe du métal sont sablées.

25 Puis, le métal est découpé par des techniques conventionnelles. On obtient alors des cellules photovoltaïques de silicium à contact arrière qui peuvent être utilisées comme les wafers conventionnels pour la fabrication de modules photovoltaïques.

30 L'invention concerne également un module photovoltaïque comprenant une série de cellules photovoltaïques 31 se présentant chacune sous la forme d'une bande de dimension de l'ordre de 20 mm de large, comme représenté sur la figure 10.

Les cellules photovoltaïques de l'art antérieur comprennent des substrats en forme de bandes de grande largeur, qui sont en général des plaquettes de 15x15 cm.

35 Pour obtenir des sources d'énergie conformes aux besoins, il faut concevoir une structure générant une différence de potentiel de plusieurs volts, par exemple de 12 volts.

Or la tension de circuit ouvert de la diode silicium est de l'ordre de 0,5 volt. Une solution consiste à mettre en série plusieurs bandes de cellules photovoltaïques 31 pour atteindre la tension donnée.

Le module photovoltaïque formé de cellules photovoltaïques sous forme de bande 31 comprend une couche mince de polymère 21 et deux couches minces de colle thermoréactivable (EVA) 22, 23, dont une première 22 et une deuxième 23 couches minces de colle thermoréactivable. La première couche mince de colle thermoréactivable 22 est déposée sur la couche mince de polymère 21.

Le module photovoltaïque comprend également une couche conductrice 24 formée d'une pluralité de cellules photovoltaïques sous forme de bande 31, et de deux bandes de cuivre 25 disposées aux extrémités respectives de la couche conductrice 24.

Les cellules photovoltaïques sous forme de bande 31 et les deux bandes de cuivre 25 sont disposées entre les première 22 et deuxième 23 couches minces de colle thermoréactivable, parallèlement les unes par rapport aux autres, inclinées par rapport aux couches minces de colle thermoréactivable 22, 23 et en se chevauchant de façon à former une rangée selon une direction parallèle aux couches minces de colle thermoréactivable 22, 23.

La pluralité de cellules photovoltaïques sous forme de bande 31 et les deux bandes de cuivre 25 forment une connexion en série.

Chaque cellule photovoltaïque sous forme de bande 31 est en contact au voisinage de chacune de ses extrémités respectives avec une autre cellule photovoltaïque sous forme de bande 31, sauf les deux cellules photovoltaïques sous forme de bande 31 situées à l'extrémité de la couche conductrice 24 qui sont chacune en contact avec une seule cellule photovoltaïque sous forme de bande 31 au voisinage de l'une de leurs extrémités et avec une bande de cuivre 25 au voisinage de l'autre de leurs extrémités.

La série de bandes de cellules photovoltaïques sous forme de bande 31 et les deux bandes de cuivre 25 sont disposés de façon à former comme une succession de « dominos » renversés. Chaque cellule photovoltaïque sous forme de bande 31 comprend une face avant 26 et une face arrière 27, ainsi des première 28, et deuxième 29 extrémités.

Chaque face arrière 27 d'une cellule photovoltaïque sous forme de bande 31 est en contact avec la première couche mince de colle thermoréactivable 22, à proximité de sa première extrémité 28.

Chaque face arrière 27 d'une cellule photovoltaïque sous forme de bande 31 est en contact avec une autre cellule photovoltaïque sous forme de bande 31, à proximité de sa deuxième extrémité 29.

Chaque face avant 26 d'une cellule photovoltaïque sous forme de bande 31 est en contact avec une autre cellule photovoltaïque sous forme de bande 31, à proximité de sa première extrémité 28.

Chaque face avant 26 d'une cellule photovoltaïque sous forme de bande 31 est en contact également avec la deuxième couche mince de colle thermoréactivable 23, à proximité de sa deuxième extrémité 29.

Les deux bandes de cuivre 25 disposées aux extrémités respectives de la couche conductrice 24 permettent au module photovoltaïque d'être connecté latéralement.

Le module photovoltaïque comprend également une couche mince de polyméthylméthacrylate (PMMA) 30 déposée sur la deuxième couche mince de colle thermoréactivable 23.

La couche mince d'oxyde d'indium-étain 16 des cellules photovoltaïques sous forme de bande 31 est transparente et conductrice.

Le procédé de fabrication du module photovoltaïque est décrit ci-dessous.

Une première couche de colle thermoréactivable (EVA) 16 est déposée sur la bande polymère 21.

Les cellules photovoltaïques sous forme de bande 31 sont déposées parallèlement sur la bande polymère 21 qui assure l'isolation électrique. La bande polymère 21 peut être du polyimide ou du polyméthylméthacrylate (PMMA), par exemple.

Les cellules photovoltaïques sous forme de bande 31 sont mises en recouvrement sur une distance de 5 mm environ. Les contacts réalisés ainsi mettent les cellules photovoltaïques sous forme de bande 31 en connexion série.

Les deux bandes de cuivre 25 sont disposées aux extrémités de la couche conductrice 24 en recouvrement.

La deuxième couche mince de colle thermoréactivable (EVA) 23 est disposée sur la surface de la couche conductrice 24.

La couche mince de polyméthylméthacrylate (PMMA) 30 est ensuite appliquée sur la surface de la deuxième couche mince de colle thermoréactivable (EVA) 23.

L'ensemble est enfin solidarisé par pressage à chaud (lamination).

On obtient ainsi un module photovoltaïque dont la différence de potentiel dépend du nombre de cellules photovoltaïques sous forme de bande 31 juxtaposées.

Le procédé de fabrication des modules photovoltaïques comprend une étape de découpe de bandes de dispositif texturé cristallographiquement 13 pour obtenir des bandes de dispositif texturé cristallographiquement 13 de plus petites dimensions. Cette étape de découpe sur le rouleau d'alliage intervient après le dépôt des différentes couches minces. Les bandes de dispositif texturé cristallographiquement 13 sont découpées à la taille voulue, selon les applications.

Pour découper les dispositifs texturés cristallographiquement 13, il faut éviter de fissurer le silicium. Et donc préalablement, il faut créer un sillon sur le substrat métallique texturé cristallographiquement 1 qui est revêtu de silicium. Le sillon est créé en utilisant une technique de micro sablage: des fines particules d'alumine sont projetées à l'aide d'une buse sur la surface de silicium.

Il est ainsi possible de réaliser un sillon exempt de silicium sur la surface 3 du substrat métallique texturé cristallographiquement 1, et ayant une largeur bien contrôlée, comme par exemple une largeur de 2 mm.

Il est ensuite possible de découper les bandes de dispositif texturé cristallographiquement 13 avec des outils conventionnels, par exemple des cisailles rotatives, en prenant la précaution de protéger la surface des cylindres avec une bande d'élastomère.

5 Le procédé de découpe des dispositifs texturés cristallographiquement 13 peut être réalisé selon un autre mode de réalisation de l'invention.

Des sillons 32 sont gravés dans la bande de substrat métallique texturé cristallographiquement 1 pour faciliter une découpe ultérieure, comme représenté sur la figure 11.

10 Après dépôt de silicium sur le substrat métallique texturé cristallographiquement 1, les sillons 32 sont sablés pour éliminer les courts-circuits. Les attaches sont ensuite découpées.

L'invention concerne également un procédé de dépôt de couches minces à base de silicium sur un substrat métallique texturé cristallographiquement 1, tel que décrit
15 précédemment.

Selon un mode de réalisation de l'invention, le dépôt de couches minces polycristalline à base de silicium est réalisé par une méthode de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et avantageusement par une méthode de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma radiofréquence (RFPECVD), la fréquence appliquée
20 au plasma étant de 13,56 MHz. Selon deux modes de réalisation différents, le dépôt peut être réalisé sur un substrat métallique texturé cristallographiquement 1 ayant subi une gravure chimique ou sans gravure chimique.

La température du plasma doit être inférieure à 300 °C, de préférence de l'ordre de 200 °C. Le plasma comprend avantageusement un mélange gazeux de tétrafluorure de silicium (SiF₄), d'hydrogène et d'argon. Il est également possible de remplacer le
25 tétrafluorure de silicium par du silane (SiH₄).

La croissance orientée ou épitaxiale de couches minces de silicium polycristallin 11 sur alliage fer-nickel est favorisée par la texture cristallographique de l'alliage et par les conditions du plasma

30 Comme exemple de réalisation, les meilleurs résultats sont obtenus par dépôt à partir de la dissociation de mélanges gazeux de SiF₄, d'hydrogène et d'argon, avec des débits de gaz en centimètres cubiques par minute de (1,2,40) (sccm), sous une pression totale de 1800 mTorr, une puissance radiofréquence de 16 W et une température de substrat 1 d'environ 200 °C. La température de substrat 1 doit être
35 inférieure à 300 °C.

Le résultat est l'obtention d'une couche mince de silicium 11 complètement cristallisée par dépôt direct à basse température (200 °C) sur un substrat 1 formé d'un alliage fer-nickel comprenant 41% de nickel.

La quantification des fractions cristallines peut être obtenue par des mesures d'ellipsométrie spectroscopique.

L'analyse des mesures d'ellipsométrie spectroscopique à l'aide d'un modèle optique permet de quantifier la fraction cristalline ainsi que de distinguer entre gros grains (tailles entre 0,1 μm et 1 μm) et petit grains (< 0,1 μm), comme décrit dans le document « A. Abramov, Y. Djeridane, R. Vanderhaghen, and P. Roca i Cabarrocas: "Large grain $\mu\text{c-Si:H}$ films deposited at low temperature: growth process and electronic properties". J. Non Cryst. Solids 352 (2006) pp. 964-967».

Le tableau 2 donne les fractions cristallines d'une couche de silicium polycristallin ainsi que de la couche de rugosité (6 nm) pour une couche mince polycristalline à base de silicium 11, obtenue à l'aide des mesures d'ellipsométrie spectroscopique.

	<u>Epaisseur (nm)</u>	<u>Fraction petit grain</u>	<u>Fraction gros grain</u>	<u>Fraction de vide</u>
15	<u>6</u>	<u>38</u>	<u>35</u>	<u>27</u>
	<u>379</u>	<u>57</u>	<u>38</u>	<u>5</u>

Les résultats du modèle optique permettant de reproduire les mesures d'ellipsométrie montrent que la couche de silicium 11 qui a une épaisseur de 379 nm comprend un mélange de 57% de petits cristaux, 38% de gros cristaux et 5% de vide (ce dernier étant associé à l'hydrogène incorporé dans la couche et une faible porosité probablement aux joints de grains).

Pour faire varier ces paramètres, il est possible de faire varier les conditions opératoires : mélange des gaz, pression, puissance radiofréquence et température du substrat.

Les gaz sources sont le SiF_4 , l'hydrogène et pour les gaz dopants le triméthylbore et la phosphine. Dans le plasma 33, les collisions inélastiques entre les électrons énergétiques (accélérés par le champ électrique radiofréquence) et le silane génèrent des radicaux, des ions et des espèces excitées. Les espèces réactives produites dans le plasma 33 vont se condenser sur le substrat 1 pour former (atome après atome) une couche mince en général désordonnée.

Cette technique permet le dépôt de couches minces à base de silicium 11 à basse température (typiquement entre 100°C et 300°C), sur des substrats 1 de grandes surfaces (pouvant atteindre 5 m^2).

La figure 12 représente un mode opératoire de dépôt de couches minces à base de silicium 11 sur un substrat métallique texturé cristallographiquement 1, par décomposition chimique des gaz réactifs dans un plasma 33 de décharge à basse température.

La figure 13 représente un agrandissement de la zone de croissance 35 du silicium sur la couche mince polycristalline 11 pendant le mode opératoire représenté sur la figure 12. Cet exemple correspond à la croissance à partir de silane (radicaux SiH_3).

Les produits de dissociation des gaz précurseurs 34 "condensent" sur le substrat
5 métallique texturé cristallographiquement 1 formant une couche mince minces à base de silicium 11. Les produits de dissociation des gaz précurseurs 34 sont des nanocristaux qui peuvent être utilisés comme briques élémentaires pour la croissance de la couche de silicium polycristallin. L'interface plasma/solide se fait sur une épaisseur de matériau appelée zone de croissance 35 et implique des réactions
10 contrôlées par la température du substrat métallique texturé cristallographiquement 1 et l'énergie apportée par les ions et par l'hydrogène atomique (recuit chimique). A l'interface plasma/solide, il se produit des phénomènes de physisorption 36, d'abstraction d'hydrogène 37, de recombinaison (Si_2H_6) 38 et de désorption 39.

Il est également possible d'optimiser les procédés de dépôt pour synthétiser des
15 nanocristaux de silicium 34 dans les plasmas de silane (SiH_4) et de tétrafluorure de silicium (SiF_4), comme décrit dans le document « P. Roca i Cabarrocas, Th Nguyen-Tran, Y. Djeridane, A. Abramov, E. Johnson and G. Patriarche: "Synthesis of silicon nanocrystals in silane plasmas for nanoelectronics and large area electronic devices". J. Phys. D: Appl. Phys. 40 (2007) pp. 2258-2266 ».

20 Il est également possible d'utiliser d'autres techniques de dépôt CVD, comme par exemple la CVD plasma micro-ondes ou la CVD assistée par filament chaud (HWCVD), dans le but d'augmenter la vitesse de dépôt ou de diminuer la densité des défauts dans la couche intrinsèque (non dopée intentionnellement).

Le procédé de dépôt selon l'invention permet d'obtenir une couche mince
25 polycristalline à base de silicium 11 sans aucune pollution du silicium par le substrat métallique texturé cristallographiquement 1. Les rendements de conversion sont également améliorés.

Ainsi, selon l'invention, le substrat métallique texturé cristallographiquement 1
30 permet de favoriser les mécanismes de croissance épitaxiale ou orientée à gros grains du silicium, directement pendant les phases de dépôts.

Le fait que le coefficient moyen de dilatation de l'alliage fer-nickel soit légèrement supérieur ou égal à celui du film mince polycristallin à base de silicium 11 permet de limiter les contraintes thermiques générées sur la couche mince polycristalline à base de silicium 11 en fonctionnement et d'augmenter la durée de vie des cellules
35 photovoltaïques.

REVENDICATIONS

1. Substrat métallique texturé cristallographiquement (1) comprenant une surface de connexion (2) et une surface (3) destinée à accueillir un dépôt de couche mince, ledit substrat métallique texturé cristallographiquement (1) étant constitué d'un alliage présentant un système cristallin cubique à faces centrées et une texture cristallographique cube {100} <001> majoritaire, la surface destinée à accueillir le dépôt de couche mince (3) comprenant des grains (4) présentant majoritairement des plans cristallographiques {100} parallèles à la surface (3) destinée à accueillir un dépôt de couche mince,

caractérisé en ce que :

- l'alliage est un alliage fer-nickel ayant une composition comprenant, en % en poids par rapport au poids total dudit alliage :
 - Ni \geq 30 %,
 - Cu \leq 15 %,
 - Cr \leq 15 %,
 - Co \leq 12 %,
 - Mn \leq 5 %,
 - S < 0,0007 %,
 - P < 0,003 %,
 - B < 0,0005 %,
 - Pb < 0,0001 %,

- les pourcentages en nickel, chrome, cuivre, cobalt et manganèse sont tels que l'alliage satisfait la condition suivante :

$$34 \% \leq (\text{Ni} + \text{Cr} + \text{Cu}/2 + \text{Co}/2 + \text{Mn}), \text{ et}$$

- l'alliage comprend jusqu'à 1% en poids d'un ou plusieurs éléments désoxydants choisis parmi le silicium, le magnésium, l'aluminium et le calcium, le reste des éléments constituant l'alliage étant du fer et des impuretés.

2. Substrat métallique texturé cristallographiquement selon la revendication 1, caractérisé en ce que les pourcentages en nickel, chrome, cuivre, cobalt et manganèse sont tels que l'alliage satisfait la condition suivante :

$$34 \% \leq (\text{Ni} + \text{Cr} + \text{Cu}/2 + \text{Co}/2 + \text{Mn}) \leq 54 \%,$$

- le coefficient moyen de dilatation de l'alliage, α_{20}^{100} , entre 20°C et 100°C, étant supérieur à 10^{-6} K^{-1} , et de préférence compris entre 10^{-6} K^{-1} et $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

3. Substrat métallique texturé cristallographiquement selon l'une quelconque des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que la surface (3) destinée à accueillir un dépôt de couche mince du substrat métallique texturé cristallographiquement (1) présente une rugosité R_a inférieure à 150 nm, et de préférence inférieure à 50 nm.
4. Substrat métallique texturé cristallographiquement selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que le substrat métallique texturé cristallographiquement (1) est mince avec une épaisseur comprise entre 0,5 mm et 0,05 mm, de préférence de l'ordre de 0,1 mm.
5. Substrat métallique texturé cristallographiquement selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que les grains (4) sur la surface (3) destinée à accueillir un dépôt de couche mince sont gravés en forme de pyramide présentant des plans {111} et des marches (12) selon les plans {100} de façon à former un réseau de type réseau blazé.
6. Dispositif texturé cristallographiquement caractérisé en ce qu'il comprend un substrat métallique texturé cristallographiquement (1), tel que défini selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, sur lequel a été déposée une couche mince polycristalline à base de silicium (11), la couche mince polycristalline (11) présentant une orientation cristallographique préférentielle {100} et {111}.
7. Dispositif texturé cristallographiquement selon la revendication 6, caractérisé en ce que le paramètre de maille cristalline du substrat métallique texturé cristallographiquement (1) est identique ou presque à celui de la couche mince polycristalline à base de silicium (11).
8. Dispositif texturé cristallographiquement selon l'une quelconque des revendications 6 ou 7, caractérisé en ce que le coefficient moyen de dilatation de l'alliage constituant le substrat métallique texturé cristallographiquement (1) est proche de celui de la couche mince polycristalline (11).
9. Dispositif texturé cristallographiquement selon l'une quelconque des revendications 6 à 8, caractérisé en ce que la couche mince polycristalline (11) à base de silicium

présente une épaisseur inférieure à 10 μm , de préférence inférieure à 5 μm , et comprend des cristaux de silicium de dimension comprise entre 0,1 μm et 2 μm .

- 5 10. Cellule photovoltaïque caractérisée en ce qu'elle comprend un dispositif texturé cristallographiquement (13) tel que défini selon l'une quelconque des revendications 6 à 9.
- 10 11. Cellule photovoltaïque selon la revendication 10 caractérisée en ce qu'elle comprend :
- un dispositif texturé cristallographiquement (13) dans lequel :
 - le substrat métallique texturé cristallographiquement (1) présente une teneur en nickel égale à 41% en poids par rapport au poids total de l'alliage constituant le substrat métallique (1),
 - 15 • le silicium de la couche mince de silicium polycristallin (11) est dopé,
 - une couche mince de silicium intrinsèque polycristallin (14) déposée sur le dispositif texturé cristallographiquement (13),
 - une couche mince de silicium polycristallin dopé (15), déposée sur la couche mince de silicium intrinsèque polycristallin (14),
 - 20 - une couche mince d'un oxyde transparent conducteur (16) déposée sur la couche mince de silicium polycristallin dopé (15), et
 - une grille métallique (17) disposée sur la couche mince d'oxyde transparent conducteur (16) et comprenant plusieurs éléments dont un élément de grille central (18).
- 25 12. Cellule photovoltaïque selon la revendication 11 caractérisée en ce que le dispositif texturé cristallographiquement (13) et les différentes couches minces (14, 15, 16) sont traversés par un connecteur (19) relié à l'élément de grille central (18) et débouchant à l'extérieur de la cellule photovoltaïque à travers la surface de connexion (2) du substrat métallique texturé cristallographiquement (1), ledit
- 30 connecteur (19) étant entouré d'un isolant (20) s'étendant depuis la surface de connexion (2) du substrat métallique texturé cristallographiquement (1) jusqu'à l'élément de grille central (18).
- 35 13. Module photovoltaïque caractérisé en ce qu'il comprend :
- une couche mince de polymère (21),
 - deux couches minces de colle thermoréactivable (22, 23), dont une première (22) et une deuxième (23) couches minces de colle thermoréactivable, la

première couche mince de colle thermoréactivable (22) étant déposée sur la couche mince de polymère (21),

- une couche conductrice (24) formée d'une pluralité de cellules photovoltaïques, telles que définies selon la revendication 12, et de deux bandes de cuivre (25) disposées aux extrémités respectives de la couche conductrice formée d'une pluralité de cellules photovoltaïques (31), lesdites cellules photovoltaïques (31) étant sous forme de bandes et les deux bandes de cuivre (25) étant disposées entre les première (22) et deuxième (23) couches minces de colle thermoréactivable, parallèlement les unes par rapport aux autres, inclinées par rapport aux couches minces de colle thermoréactivable (22, 23) et en se chevauchant de façon à former une rangée de cellules photovoltaïques (31) et de bandes de cuivre (25) en contact selon une direction parallèle aux couches minces de colle thermoréactivable (22, 23), la pluralité de cellules photovoltaïques (31) et les deux bandes de cuivre (25) formant une connexion en série, et
- une couche mince de polyméthylméthacrylate (30) déposée sur la deuxième couche mince de colle thermoréactivable (23).

14. Procédé de dépôt de couches minces à base de silicium sur un substrat métallique texturé cristallographiquement (1), tel que défini selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce qu'il est réalisé par une méthode de dépôt chimique en phase vapeur (CVD), la température du plasma étant inférieure à 300 °C, de préférence de l'ordre de 200 °C.

15. Procédé de dépôt de couches minces à base de silicium selon la revendication 14 caractérisé en ce que la méthode de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est une méthode de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma radiofréquence (RFPECVD), le plasma comprenant un mélange gazeux de SiF_4 , d'hydrogène et d'argon, et la puissance radiofréquence utilisée étant de l'ordre de 16 W.

16. Procédé de dépôt de couches minces à base de silicium selon l'une quelconque des revendications 14 ou 15, caractérisé en ce que la croissance épitaxiale du silicium est obtenue à partir de nanocristaux de silicium synthétisés dans le plasma.

1/6

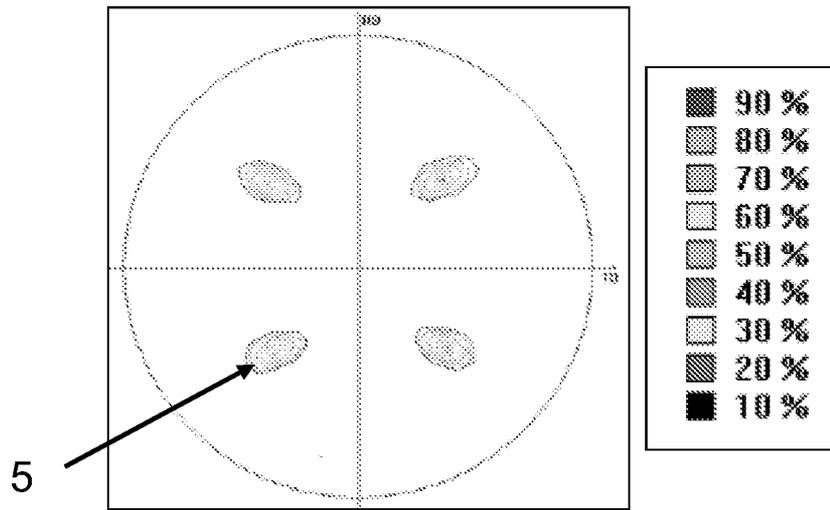


FIGURE 1

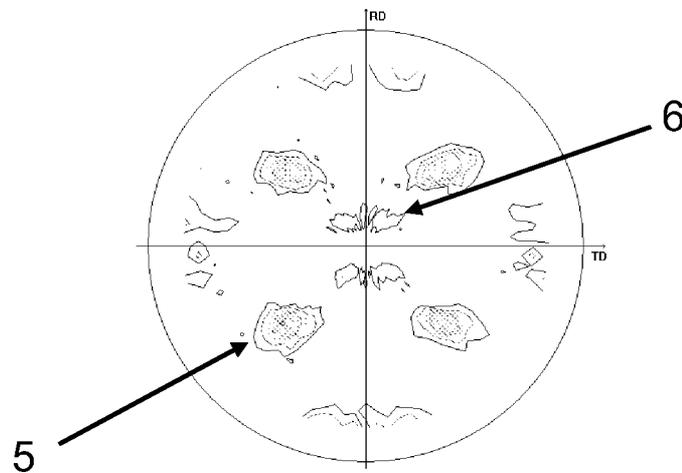


FIGURE 2

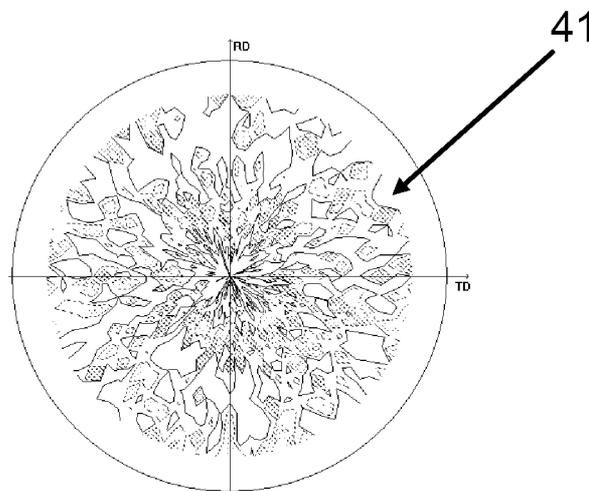


FIGURE 3

2/6

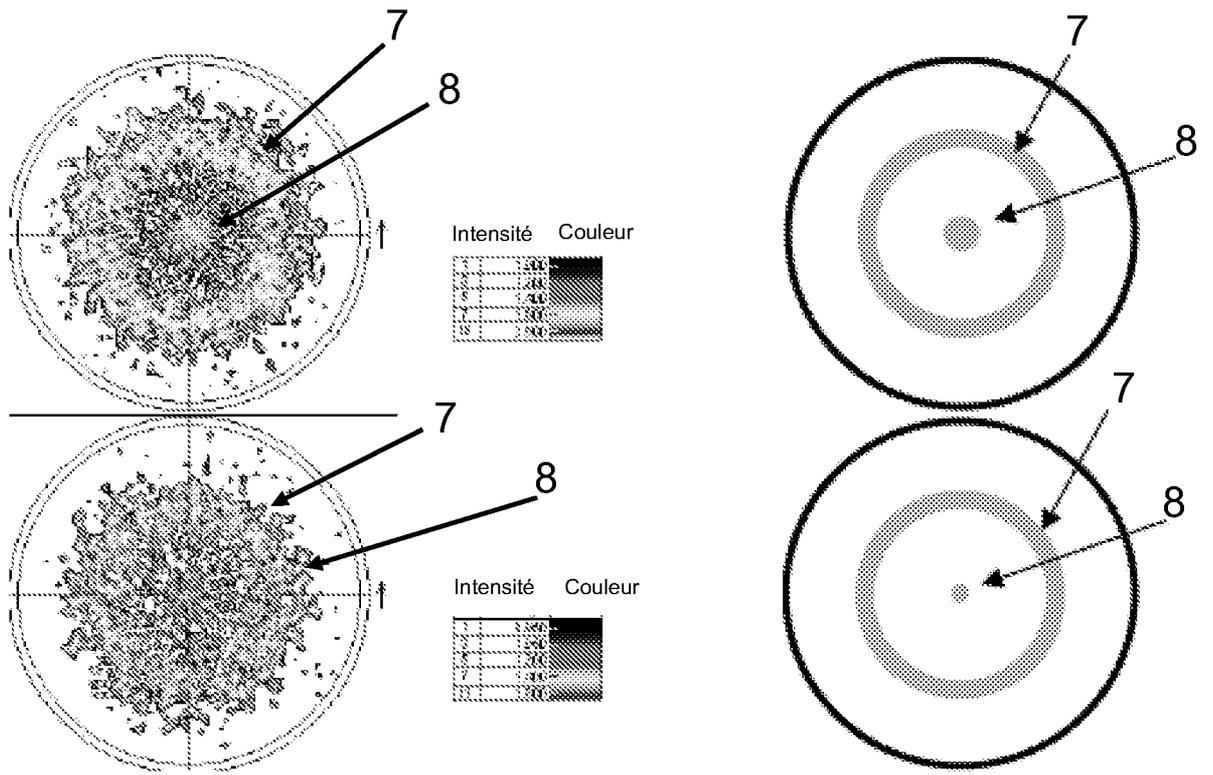
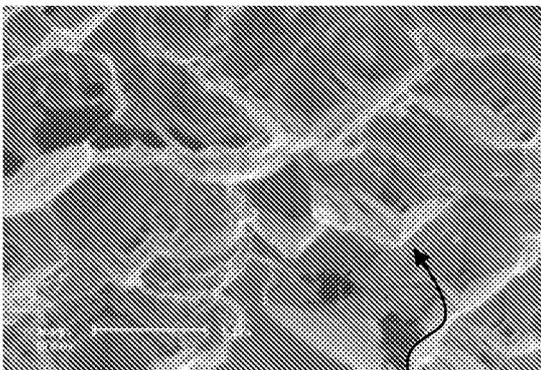
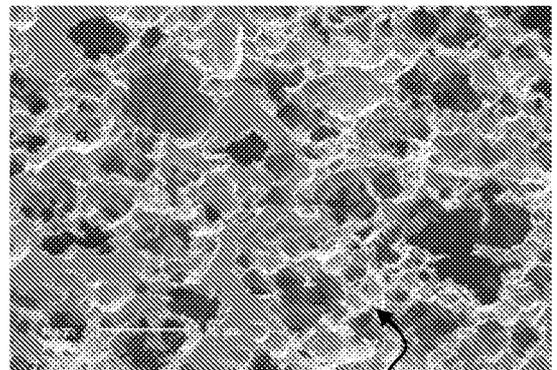


FIGURE 4



3 4

FIGURE 5a



3 4

FIGURE 5b

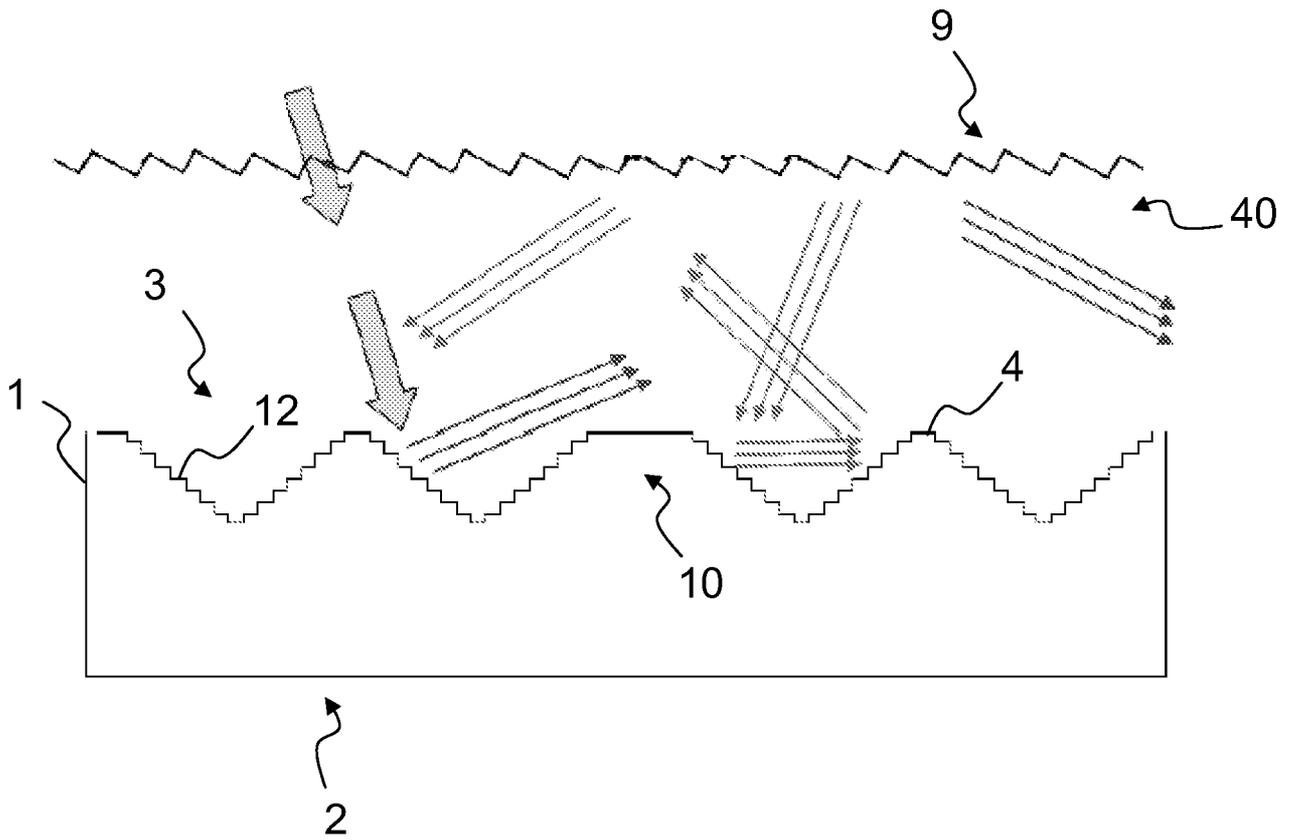


FIGURE 6

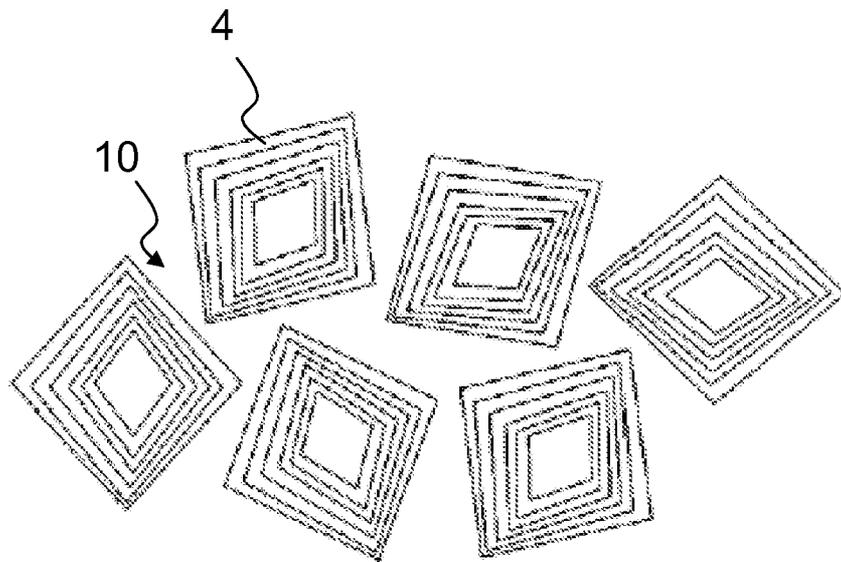


FIGURE 7

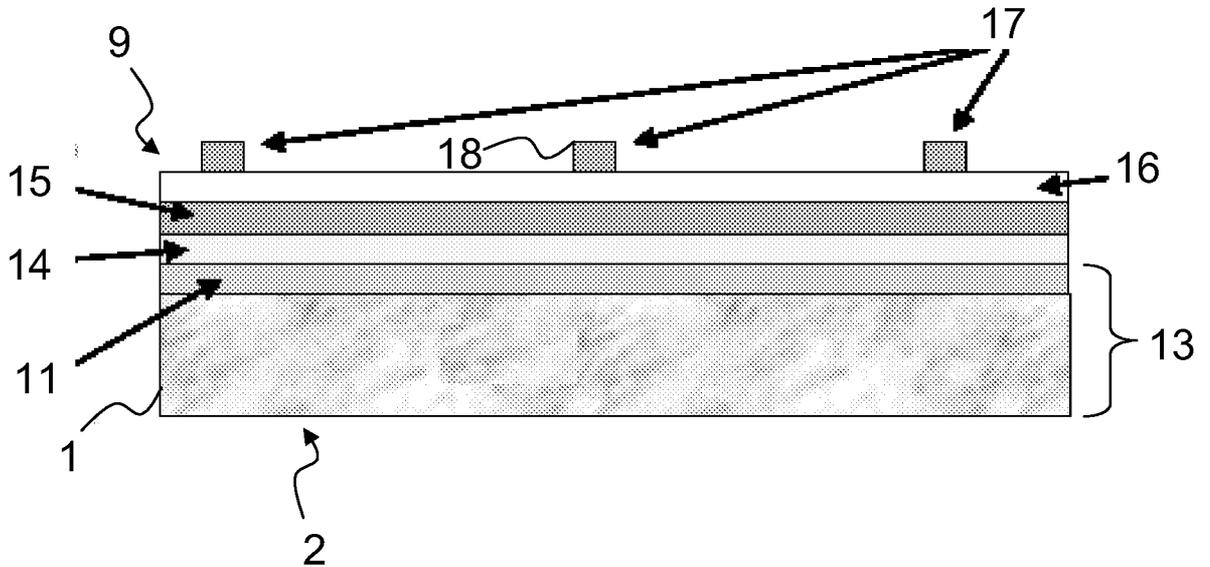


FIGURE 8

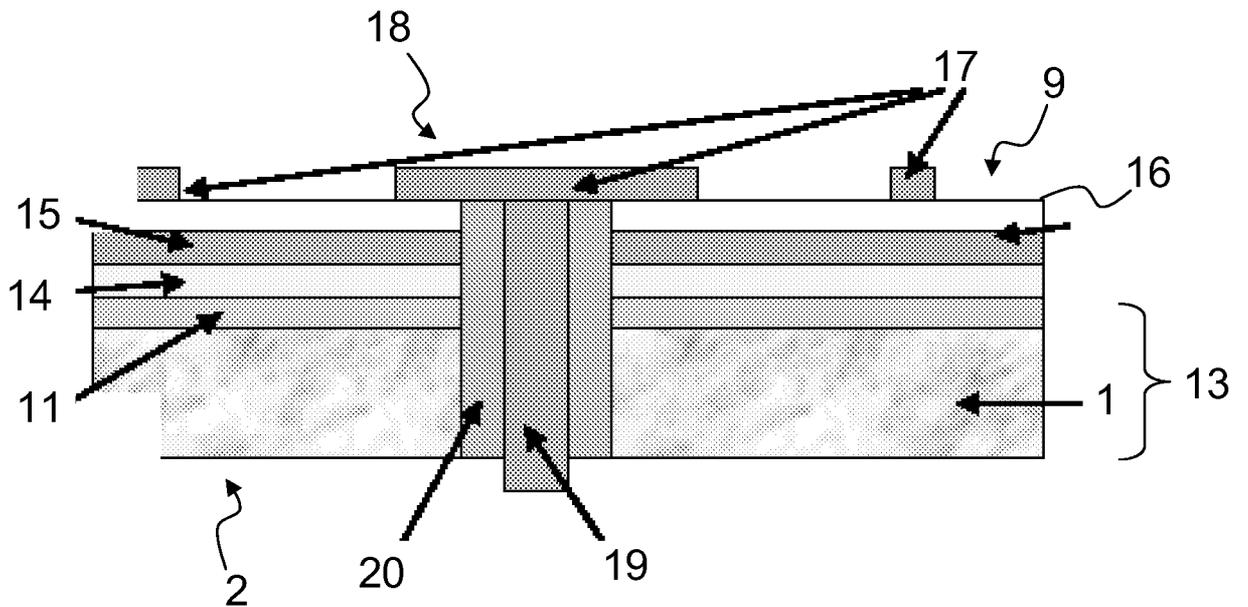


FIGURE 9

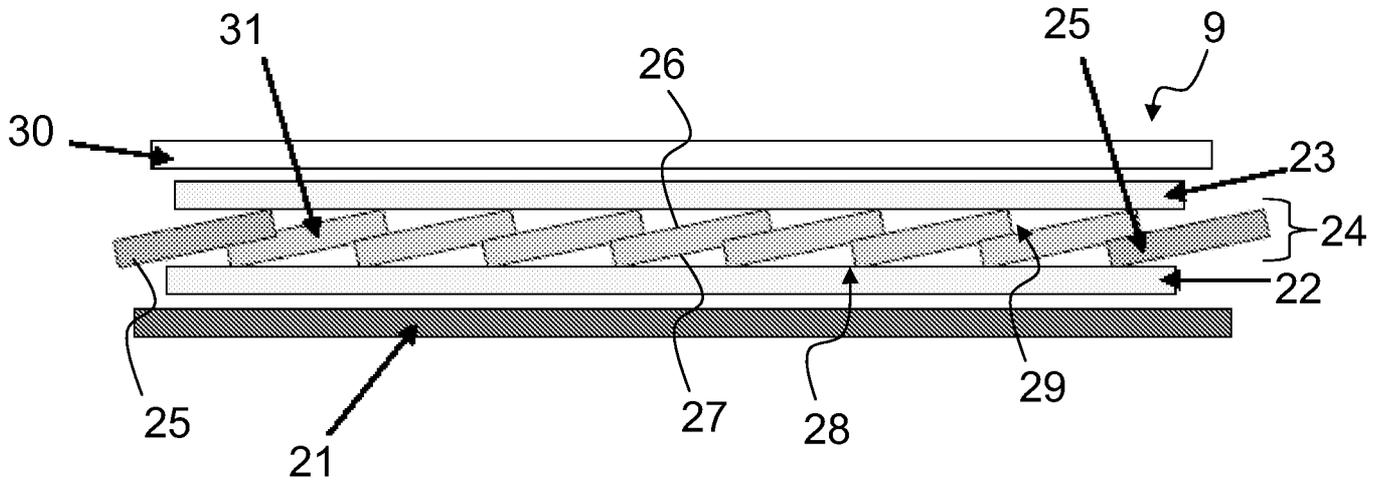


FIGURE 10

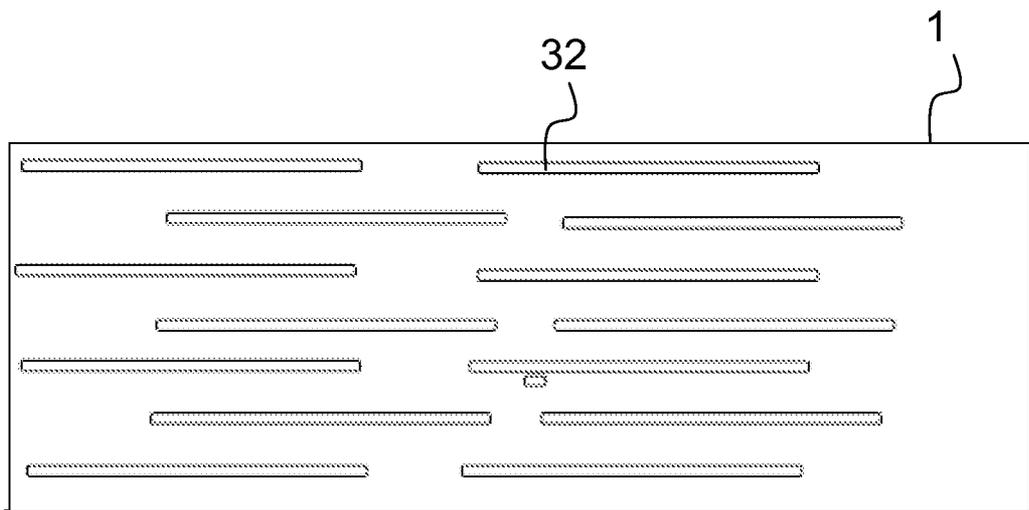


FIGURE 11

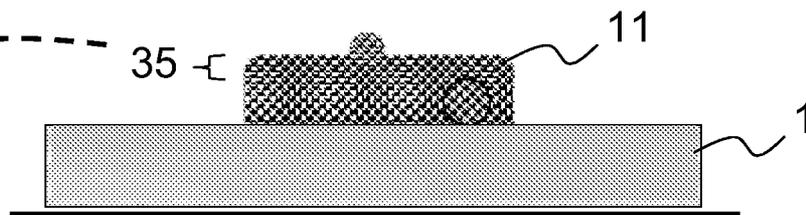
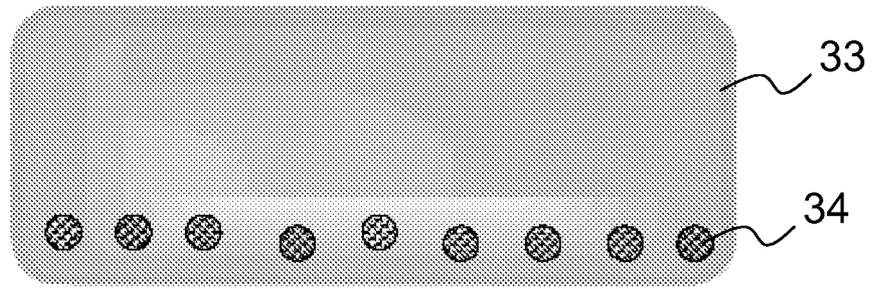


FIGURE 12

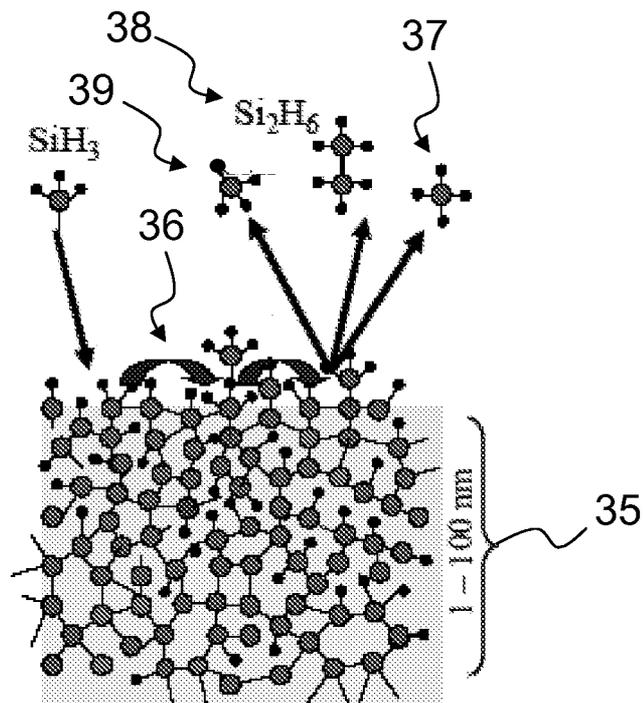
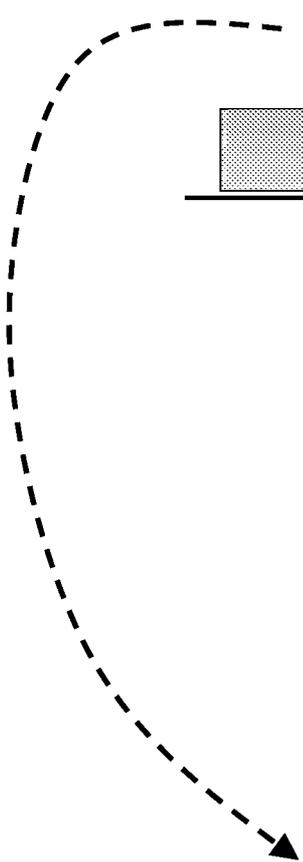


FIGURE 13