(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

COURBEVOIE

(11) **N° de publication :** **3 029 355**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) **N° d'enregistrement national :** **14 61760**

(51) Int Cl[8] : ***H 01 L 37/00*** *(2017.01)*

(12) **BREVET D'INVENTION** **B1**

(54) GENERATEUR THERMOELECTRIQUE.

(22) **Date de dépôt :** 02.12.14.

(30) **Priorité :**

(43) **Date de mise à la disposition du public de la demande :** 03.06.16 Bulletin 16/22.

(45) **Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention :** 02.02.18 Bulletin 18/05.

(56) **Liste des documents cités dans le rapport de recherche :**

Se reporter à la fin du présent fascicule

(60) **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

◯ **Demande(s) d'extension :**

(71) **Demandeur(s) :** *STMICROELECTRONICS (CROLLES 2) SAS Société par actions simplifiée* — FR.

(72) **Inventeur(s) :** DUBOIS EMMANUEL, ROBILLARD JEAN-FRANCOIS, MONFRAY STEPHANE et SKOTNICKI THOMAS.

(73) **Titulaire(s) :** STMICROELECTRONICS (CROLLES 2) SAS Société par actions simplifiée.

(74) **Mandataire(s) :** CASALONGA & ASSOCIES.

FR 3 029 355 - B1

Générateur thermoélectrique

Des modes de réalisation de l'invention concernent les générateurs thermoélectriques, et plus précisément les générateurs thermoélectriques intégrés comprenant un matériau semi-conducteur.

Des applications possibles de l'invention sont notamment l'alimentation de dispositifs électriques de faible et moyenne puissance grâce à la récupération d'énergie thermique tels que :

- des capteurs de communications distribués dans un environnement fixe (bâtiments, sols) ou mobile (automobile, aéronefs) ;
- des appareils de mesure autonomes à visée médicale alimentés par la chaleur du corps.

La présente invention pourrait également être appliquée par exemple dans le cadre de la récupération/dissipation de l'énergie thermique au sein de circuits microélectroniques.

Les dispositifs de générateurs thermoélectriques intégrés comprennent généralement une architecture de thermopiles verticales miniaturisées couplées en série et utilisant des matériaux thermoélectriques classiques tels que le tellure de bismuth (Bi_2Te_3).

Cependant la structure verticale de ces générateurs et les matériaux thermoélectroniques usuels sont difficilement compatibles avec les procédés classiques de fabrication CMOS.

Selon un mode de réalisation, il est proposé un générateur thermoélectrique de structure compatible avec des réalisations de façon intégrée et avec des procédés de fabrication CMOS.

Selon un mode de réalisation, il est proposé un générateur thermoélectrique dont l'élément actif est de structure essentiellement plane, et dont l'architecture permet de redistribuer le flux thermique dans le plan de l'élément actif.

Selon un autre mode de réalisation, il est proposé un générateur thermoélectrique dont l'élément actif est structuré par ingénierie phononique et dont la conductivité thermique très réduite dans certaines directions et plus importante dans d'autres directions, lui

confère des propriétés thermoélectriques supérieures à celles des générateurs actuels.

Selon un aspect, il est proposé un générateur thermoélectrique comprenant une membrane semi-conductrice contenant au moins une jonction P-N, cette membrane étant suspendue entre un premier support destiné à être couplé à une source thermique froide et un deuxième support destiné à être couplé à une source thermique chaude.

La membrane semi-conductrice, qui forme l'élément actif du générateur thermoélectrique, est par nature un élément essentiellement plan et généralement fin, et sa réalisation s'intègre aisément dans le procédé de fabrication de circuits intégrés CMOS.

La membrane peut s'étendre parallèlement aux supports, par exemple à égale distance de ces derniers.

Une telle configuration du générateur thermoélectrique, qui se distingue nettement des structures conventionnelles de l'art antérieur, peut alors être qualifiée de « planaire » par abus de langage par opposition aux structures verticales de l'art antérieur.

Les supports peuvent être rigides, par exemple métalliques ou semi-conducteurs.

En variante les supports peuvent être flexibles ce qui permet au générateur d'épouser une surface courbe par exemple.

Selon un mode de réalisation, la membrane semi-conductrice contient plusieurs bandes alternativement de type de conductivité N et P formant plusieurs jonctions P-N couplées en série, chaque jonction P-N s'étendant entre une première face de la membrane située en regard du premier support et une deuxième face de la membrane située en regard du deuxième support, ladite membrane étant suspendue par des moyens de suspension comportant des piliers thermiquement conducteurs distribués de façon alternée sur les deux faces de la membrane, chaque pilier reliant une jonction P-N au support correspondant.

La présence de plusieurs bandes N et P permet d'augmenter la puissance du générateur thermoélectrique et la distribution alternée

des piliers permet de redistribuer le flux thermique dans le plan de la membrane.

Selon encore un autre mode de réalisation, les piliers thermiquement conducteurs situés sur l'une des faces comportent

- au moins deux piliers dits de contact, électriquement conducteurs, couplés à au moins deux endroits du support correspondant de façon à générer un signal électrique et isolés du support correspondant par un isolant électrique thermiquement conducteur ;
- des piliers dits de liaison, électriquement conducteurs et électriquement isolés du support correspondant par un isolant électrique thermiquement conducteur.

Les piliers situés sur l'autre face comportent uniquement des piliers de liaison électriquement conducteurs et électriquement isolés du support correspondant par un isolant électrique thermiquement conducteur.

Il est particulièrement avantageux que la membrane suspendue soit à structure phononique, c'est-à-dire comprenant un réseau d'inclusions de constitution différente du matériau semi-conducteur de la membrane.

Comme il est bien connu de l'homme du métier, les phonons sont les modes de vibration des atomes dans le réseau cristallin du matériau silicium.

La structure phononique est notamment réalisée en introduisant des trous (cristal phononique artificiel) dans la membrane, par exemple en silicium, pour conduire à une réduction importante de conductivité thermique. De ce fait, on peut obtenir des propriétés thermoélectriques supérieures aux matériaux thermoélectriques actuels.

Il est avantageusement proposé un réseau d'inclusions périodique avec au moins un pas de répétition inférieur au libre parcours moyen des phonons thermiques et supérieur à la longueur d'onde des phonons thermiques.

En effet, l'efficacité du cristal phononique à filtrer les phonons est notamment déterminée par le pas de répétition.

Pour bénéficier d'un effet cumulatif du filtrage des phonons thermiques à différentes fréquences, il est proposé d'utiliser une succession de différents pas de répétition de tailles croissantes, autrement dit, un gradient de pas de répétition.

Il est également proposé d'utiliser par exemple une succession d'inclusions de tailles croissantes afin de renforcer l'effet cumulatif du filtrage des phonons thermiques à différentes fréquences.

Avantageusement, la membrane semi-conductrice à structure phononique peut prévoir de combiner les deux caractéristiques précédentes (pas de répétition et inclusions de tailles croissantes) pour augmenter encore le filtrage des phonons thermiques à différentes fréquences et donc encore améliorer les performances du générateur thermoélectrique.

Lorsque le matériau semi-conducteur est du silicium, le pas de répétition d'inclusion est avantageusement supérieur à 2 nm et inférieur à 200 nm et l'épaisseur de la membrane est avantageusement comprise entre 10 nm et 2 µm.

Le réseau d'inclusions est avantageusement symétrique. La symétrie du réseau d'inclusions apporte un effet intéressant permettant d'induire des propriétés dépendantes de la direction de propagation. Les différentes densités d'inclusions dans les directions d'orientations au sein d'un réseau d'inclusions symétrique influencent les conductivités thermiques des directions d'orientations correspondantes. Plus la densité d'inclusions est élevée, plus la conductivité thermique correspondante est faible.

Il est donc préférable d'avoir une densité d'inclusions plus élevée, (c'est-à-dire une conductivité thermique plus faible) entre deux zones de la membrane semi-conductrice à structure phononique couplées aux deux piliers adjacents liés respectivement aux supports différents pour obtenir une influence minimale de la différence de température entre ces deux zones. De la même manière, on peut laisser une densité d'inclusions plus faible (c'est-à-dire une conductivité thermique plus élevée) dans la direction d'orientation des jonctions afin d'obtenir une température plus homogène le long de ces jonctions.

Ainsi selon un mode de réalisation, le réseau d'inclusions, symétrique, comporte des premières directions d'orientations comportant une première densité d'inclusions et une deuxième direction d'orientation comportant une deuxième densité d'inclusions plus faible que la première densité, les bandes de jonctions P-N sont parallèles à la deuxième densité d'orientation, et la trace sur l'une des faces d'un pilier situé sur l'autre face est alignée selon les premières directions d'orientation avec l'un quelconque des piliers adjacents situés sur ladite une des faces.

Selon un autre mode de réalisation, les piliers sont distribués alternativement en quinconce de façon alternée sur les deux faces de la membrane, les piliers situés sur chacune des deux faces de la membrane formant des groupes de carrés, la trace sur l'une des faces d'un pilier situé sur l'autre face se situant au centre d'un carré de piliers situés sur ladite une des faces.

Le générateur est avantageusement réalisé de façon intégrée, et selon un autre aspect, il est proposé un circuit intégré incorporant un générateur thermoélectrique tel que défini ci-avant.

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront à l'étude de la description détaillée de modes de mise en œuvre et de réalisation, pris à titre d'exemples non limitatifs et illustrés par les dessins annexés sur lesquels :

- les figures 1 à 3 sont relatives à différents modes de réalisation d'un générateur thermoélectrique selon l'invention
- les figures 4 à 20 illustrent de manière schématique différentes étapes d'un exemple de procédé de réalisation d'un générateur thermoélectrique selon l'invention.

On se réfère maintenant aux figures 1 à 3 pour illustrer un mode de réalisation d'un générateur thermoélectrique selon l'invention incorporé au sein d'un circuit intégré CI.

Sur la figure 1, on a représenté une vue de dessus par ciel d'un mode de réalisation d'un générateur thermoélectrique 1 selon l'invention. La figure 2 est une section selon la ligne II-II de la figure

1. La figure 3 illustre un agrandissement du réseau d'inclusions de la membrane suspendue à structure phononique sur la figure 1.

En se référant aux figures 1 et 2, on voit que le générateur thermoélectrique 1 comporte ici une membrane mince semi-conductrice de géométrie plane 2. La membrane 2 est dite suspendue : la membrane est maintenue par des piliers 7-23 entre un premier support 5 et un deuxième support 6. Les deux supports 5 et 6 sont destinés à être couplés respectivement avec une source thermique froide et une source thermique chaude.

La source chaude peut être par exemple une partie chaude d'un circuit intégré et source froide peut être une partie plus froide du circuit intégré.

En variante la source chaude peut être par exemple un tuyau véhiculant un fluide chaud et la source froide l'air ambiant.

Si le générateur est placé dans une montre par exemple, la source chaude peut être la peau humaine et la source froide l'air ambiant.

La membrane 2 se situe ici à égale distance des supports 5 et 6. Cette symétrie de la structure permet notamment de faciliter la réalisation de la membrane.

La membrane comprend une alternance de bandes dopées N et P 3, 4 formant plusieurs jonctions P-N 3, 4 connectées en série. Chaque jonction P-N s'étend entre une première face F1 de la membrane située en regard du premier support 5 et une deuxième face F2 de la membrane située en regard du deuxième support 6.

Les matériaux de deux supports peuvent être en métal ou en silicium. Par exemple, le support 6 peut être une partie d'un substrat silicium réalisé dans des procédés classiques de fabrication CMOS.

On peut également utiliser des films métalliques, par exemple de l'acier inoxydable ou de l'aluminium, pour les supports 5 et 6.

Les supports peuvent être rigides ou présenter une certaine flexibilité au même titre que la membrane silicium 2.

Les piliers 7 à 23 sont thermiquement et électriquement conducteurs. Chaque pilier connecte une jonction P-N d'un côté et est

isolé du support correspondant par un isolant électrique (Ex : 24 pour le pilier 8) thermiquement conducteur.

Les piliers situés sur la première face F1 comportement deux piliers dits de contacts 25 et 26 électriquement conducteurs couplés à deux endroits E1, E2 du support 5 de façon à générer un signal électrique. Ils sont isolés du support 5 par un isolant électrique thermiquement conducteur (Ex : 27 pour le pilier de contact 26).

Lorsque les supports 5 et 6 sont couplés respectivement à la source froide et à la source chaude, la membrane thermoélectrique 2 est soumise à un gradient thermique ce qui génère une différence de potentiel entre les deux endroits E1 et E2.

Les autres piliers sont en fait des piliers dits de liaison. L'espace entre la face F2 et le support 6 ne comporte que des piliers de liaison 11, 12, 13.

Ces piliers dits de liaison 8, 9, 19, 11, 12, 13 contribuent à redistribuer le flux thermique dans le plan de la membrane au niveau des jonctions P-N.

Comme illustré sur les figures 1 et 2, les piliers 7 à 23 sont distribués alternativement en quinconce de façon alternée sur les deux faces F1 et F2 de la membrane 2 (Ex : les piliers 7, 8, 17, 18 sur la face F1 et le pilier 14 sur F2).

On peut voir que les piliers situés sur chacune des deux faces de la membrane forment des groupes de carrés, par exemple les piliers 7, 8, 17 et 18.

La trace sur la face F1 du pilier 14 situé sur la face F2 se situe au centre du carré de piliers 7, 8, 17 et 18 situés sur la face F1.

On se réfère maintenant plus particulièrement à la figure 3 pour montrer des exemples d'éléments caractéristiques d'un réseau d'inclusions de la membrane silicium.

Pour conserver les propriétés électriques du réseau cristallin tout en réduisant la propagation des phonons, il est préférable de travailler dans le régime balistique, c'est-à-dire d'introduire une structure d'inclusions de tailles inférieure au libre parcours moyen des phonons (~200 nm à 300 K pour le silicium).

La figure 3 présente une membrane mince de silicium à structure phononique comprenant un ensemble périodique de motifs (inclusions) présentant un contraste mécanique avec le matériau de la membrane mince. Ainsi les inclusions peuvent comprendre un matériau semi-conducteur différent que celui de la membrane, par exemple Ge ou SiGe, ou être simplement remplies d'air.

Par ailleurs, il est avantageux que la structure phononique présente les caractéristiques suivantes, prises isolément ou préférentiellement en combinaison au moins pour certaines d'entre elles :

- un pas de répétition p inférieur au libre parcours moyen des phonons thermiques (~200 nm à 300K dans le silicium) et supérieur à la longueur d'onde des phonons thermiques (~2 nm à 300K dans le silicium);
- une symétrie du réseau (hexagonal, carré...) ;
- une taille t d'inclusions périodiques (cristal phononique) inférieure au libre parcours moyen des phonons thermiques et supérieure à la longueur d'onde des phonons thermiques ;
- une forme symétrique d'inclusions (carré, cylindriques, triangulaire).

Par ailleurs l'épaisseur e de la membrane a également une influence. Ainsi cette épaisseur se situe normalement entre 10 nm et 2 µm pour le silicium afin d'avoir des propriétés thermoélectriques notablement meilleures que dans l'état de l'art.

Par ailleurs, un autre effet intéressant offert par la symétrie de la structure phononique au sein de la membrane semi-conductrice illustrée sur la figure 3 est d'induire des propriétés dépendantes de la direction de propagation.

Autrement dit, des modes phononiques de même fréquence acquièrent des vitesses différentes suivant la direction de propagation.

Dans le cas de ladite membrane à structure phononique, cela se traduit par le fait que plus les inclusions sont denses dans une

direction d'orientation, plus la conductivité thermique est petite dans cette direction.

Sur la figure 3, les directions d'orientation en diagonales D1 présentent une densité maximale d'inclusions. Par conséquent, on a les plus faibles conductivités thermiques dans ces directions d'orientation D1 (appelée direction d'orientation de conductivité thermique minimale). Les directions D2 ayant une densité d'inclusions plus faibles ont des conductivités thermiques plus élevées.

Ainsi, le flux thermique sera guidé vers ces directions D2 pour une redistribution plus rapide et plus homogène du flux thermique le long des jonctions P-N.

En revenant sur la figure 1, la zone agrandie illustre la structure du réseau d'inclusions RZ de la membrane silicium à structure phononique 2. Le réseau d'inclusions est périodique et symétrique. Plus précisément, ce réseau d'inclusions est en forme de carrés ayant une densité d'inclusions plus élevée dans les premières directions D1 et une densité plus faible dans les deuxièmes directions d'orientation D2.

Comme on peut voir sur la figure 1, la trace 14 sur l'une des faces (F1 par exemple) d'un pilier 14 situé sur l'autre face (F2) et l'un quelconque des piliers adjacents (7, 8, 17, 18) situés sur ladite une des faces (F1) sont alignées selon les premières directions d'orientation D1.

En conséquence, la conductivité thermique de la membrane silicium à structure phononique entre ces piliers est minimisée et on obtient alors les propriétés thermoélectriques plus performantes et une différence de température plus importante. Ainsi, la tension générée par le générateur thermoélectrique sera également plus élevée.

En outre, les directions d'orientation D2 induisant les conductivités thermiques plus élevées sont parallèles aux jonctions des jonctions P-N. De ce fait, on peut obtenir une température plus homogène dans les jonctions.

Ces caractéristiques de conductivité thermique en combinaison avec une redistribution du flux thermique dans le plan de la membrane

grâce à la distribution alternée des piliers permettent d'obtenir un générateur thermoélectrique présentant des performances améliorées.

Des exemples d'étapes technologiques permettant une réalisation d'un exemple de générateur thermoélectrique selon l'invention sont présentés sur les figures 4 à 20.

Ce mode de mise en œuvre est montré à titre illustratif et n'est pas limitatif. Plusieurs variantes peuvent être envisagées.

Comme illustré sur la figure 4, on utilise ici un substrat de type silicium sur isolant communément désigné par l'homme du métier sous l'acronyme anglo-saxon « SOI » (« Silicium On Insulator »).

Le substrat du type silicium sur isolant comporte un film semi-conducteur 28, par exemple en silicium, situé au-dessous d'une couche isolante enterrée 29, communément désignée sous l'acronyme anglo-saxon de « BOX » (« Buried-OXide ») elle-même située au-dessus d'un substrat porteur 30, par exemple un caisson semi-conducteur.

L'épaisseur du film en silicium 28 détermine l'épaisseur finale de la membrane thermoélectrique 2. Selon les caractéristiques définies ci-avant, il est préférable d'avoir une épaisseur entre 10 nm et 2 µm.

Les figures 5 à 9 concernent les étapes de l'implantation du film 28.

Sur la figure 5, on commence par le dépôt d'une couche de résine photosensible 31 pour préparer une photolithographie 32 dans l'étape suivante. On peut utiliser par exemple une couche de résine inorganique négative dite HSQ.

On applique ensuite une photolithographie à gradient d'exposition 32 (figure 6). En appliquant l'écriture directe au laser, on obtient alors les différentes profondeurs d'exposition sur la couche de résine 31.

La couche de résine photosensible 31 présente maintenant après développement (figure 7) un profil d'épaisseur variable et elle sert de masque pour la dilution d'implantation ionique dans l'étape suivante.

Comme illustré sur la figure 8, on peut utiliser une deuxième résine organique 33 (par exemple la résine dite SAL 601) ayant une sélectivité par rapport à la résine 31 servant de masque. A la suite

d'une lithographie de second niveau et le développement de la deuxième résine 33, on effectue une implantation de dopants 34 de type N. Le profil vertical du masque de résine inorganique 31 permet de moduler latéralement la concentration de dopants de façon à améliorer le rendement thermoélectrique.

Par analogie, un troisième niveau de lithographie sur une nouvelle couche de résine organique 35 (par exemple la résine dite SAL 601) et une implantation de dopants 36 de type P sont appliqués comme illustré sur la figure 9. Un recuit du film 28 est effectué à la fin pour l'activation des dopants.

De cette manière, on a formé des jonctions P-N 3', 4' couplées en série dans le film 28 en silicium. Elles se distinguent des jonctions P-N 3, 4 décrites ci-avant par le fait qu'elles ne possèdent pas encore une structure phononique.

On peut noter que l'implantation d'éléments dopants avec une modulation de concentration dans le plan de la membrane active (film 28) est optionnelle ici. Elle pourra être réalisée par la méthode de photolithographie à gradient d'exposition ou par toute autre méthode permettant de réaliser un masque de dilution.

La réalisation de la structure phononique est illustrée sur les figures 10 à 13.

La figure 10 est un agrandissement de la zone de dopants 4' type P du film mince 28. Une couche de résine photosensible ou électro-sensible positive 37 (par exemple la résine dite PMMA ou ZEP520) est déposée sur le film mince.

En effectuant une lithographie électronique 38 dans l'étape illustrée sur la figure 11, on peut obtenir les motifs du cristal phononique par écriture électronique.

Les zones exposées dans l'étape illustrée sur la figure 11 sont ensuite éliminées dans l'étape montrée sur la figure 12, puis le silicium est gravé pour former les inclusions 39.

Alternativement, la réalisation de la structure phononique pourra être réalisée par d'autres méthodes de structuration telles que la nano-impression suivie par des gravures sèches ou humides.

On élimine enfin la couche de résine électro-sensible positive dans l'étape présentée sur la figure 13. De ce fait, le filme mince thermoélectrique 28 contenant les jonctions P-N (3, 4) à structure phononique est réalisée.

La poursuite de la réalisation du générateur thermoélectrique est illustrée sur les figures 14 à 20.

On effectue tout d'abord un dépôt d'une couche métallique 40 sur le film à structuration phononique, par exemple par un dépôt dit « PECVD », ce qui détermine la hauteur de piliers.

Après avoir déposé une première couche de résine photosensible, on utilise un masque de structuration pour déterminer la géométrie de piliers par lithographie optique. Une pulvérisation cathodique est ensuite effectuée pour former une couche d'isolant électrique 41 située au-dessus de la couche métallique 40 et de la couche de résine de structuration. On enlève cette dernière par un procédé dit de « Lift-Off » et la micro-structuration finale des piliers est réalisée par ablation photo-thermique au laser sur les zones métalliques non couvertes de la couche d'isolant électrique thermiquement conducteur, comme illustré sur la figure 14.

Sur la figure 15, une couche de résine adhésive temporaire 42 est déposée sur la face F2 de la membrane comprenant les piliers métalliques. On colle ensuite sur la couche de résine adhésive temporaire 42 un support temporaire 43 constitué d'un matériau résistant aux étapes d'attaque chimique ultérieure.

On effectue alors des attaques mécaniques puis chimiques afin de retirer le substrat silicium 30 et la couche d'oxyde 29 du substrat SOI. En conséquence, le film mince 28 est prêt pour la réalisation des piliers sur la face F1 comme présenté sur la figure 16.

On forme des piliers métalliques de la face F1 d'une façon analogue à celle illustrée sur la figure 14. On peut noter que les piliers métalliques sont implémentés en quinconce de façon alternée sur les deux faces du film. Chaque pilier est couplé avec une jonction P-N et les piliers de deux faces ne sont pas alignés sur un même plan vertical comme illustré sur la figure 17.

On peut également noter que les épaisseurs de piliers et d'isolants électriques thermiquement conducteurs au-dessus des piliers sont identiques sur les deux faces de la membrane.

Comme illustré sur la figure 18, le premier support 5, par exemple une feuille de métal flexible (tel que l'acier inoxydable, de l'aluminium, etc... avec une bonne conductivité thermique) destiné à être couplé à une source thermique froide est déposé sur les couches d'isolant situées au-dessus des piliers métalliques 7 à 10 de la face F1 par une étape classique de transfert et collage.

On réalise ensuite de façon classique des vias de contact pour la connexion électrique aux emplacements E1, E2 (figure 19).

Enfin, on peut dissoudre la résine adhésive temporaire 42 sur la face F2 du film pour le libérer et obtenir la membrane 2 du générateur thermoélectrique 1. Le deuxième support 6 destiné à être couplé à une source thermique chaude est réalisé d'une façon analogue à celle du premier support 5 (figure 20).

On obtient ainsi le générateur thermoélectrique 1 intégré comprenant une membrane semi-conductrice 2 à structure phononique suspendue.

REVENDICATIONS

1. Générateur thermoélectrique, comprenant une membrane semi-conductrice (2) contenant au moins une jonction P-N (3, 4) suspendue entre un premier support (5) destiné à être couplé à une source thermique froide et un deuxième support (6) destiné à être couplé à une source thermique chaude, la membrane suspendue (2) étant à structure phononique (27) comprenant un réseau d'inclusions (39) de constitution différente du matériau semi-conducteur de la membrane.

2. Générateur thermoélectrique selon la revendication 1, dans lequel la membrane semi-conductrice (2) contient plusieurs bandes alternativement de type de conductivité N (3) et P (4) constituant plusieurs jonctions P-N couplées en série, chaque jonction P-N s'étendant entre une première face de la membrane située en regard du premier support (5) et une deuxième face de la membrane située en regard du deuxième support (6), ladite membrane (2) étant suspendue par des moyens de suspension comportant des piliers thermiquement conducteurs (7-23) distribués de façon alternée sur les deux faces (F1, F2) de la membrane, chaque pilier reliant une jonction P-N au support correspondant.

3. Générateur thermoélectrique selon la revendication 2, dans lequel les piliers situés sur l'une des faces comportent au moins deux piliers dits de contact (25, 26) électriquement conducteurs couplés à au moins deux endroits du support (E1, E2) correspondant de façon à générer un signal électrique et isolés du support correspondant par un isolant électrique (27) thermiquement conducteur, et des piliers dits de liaison électriquement conducteurs et électriquement isolés du support correspondant par un isolant électrique (24) thermiquement conducteur, et les piliers situés sur l'autre face comportent uniquement des piliers dits de liaison électriquement conducteurs et électriquement isolés du support correspondant par un isolant électrique thermiquement conducteur.

4. Générateur thermoélectrique selon la revendication 2 ou 3, dans lequel le réseau d'inclusions (RZ) est symétrique et comporte des premières directions d'orientations (D1) comportant une première densité d'inclusions et une deuxième direction d'orientation (D2) comportant une deuxième densité d'inclusions plus faible que la première densité, les bandes de jonctions P-N (3 et 4) sont parallèles à la deuxième densité d'orientation (D2), et la trace sur l'une des faces d'un pilier (15) situé sur l'autre face est alignée selon les premières directions d'orientation avec l'un quelconque des piliers adjacents (8, 9, 18, 19) situés sur ladite une des faces.

5. Générateur thermoélectrique selon la revendication 4, dans lequel les piliers (7-23) sont distribués alternativement en quinconce de façon alternée sur les deux faces de la membrane, les piliers situés sur chacune des deux faces de la membrane formant des groupes de carrés, la trace sur l'une des faces d'un pilier (15) situé sur l'autre face se situant au centre d'un carré de piliers (8, 9, 18, 19) situés sur ladite une des faces.

6. Générateur thermoélectrique selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le réseau d'inclusions (RZ) est périodique avec au moins un pas (p) de répétition inférieur au libre parcours moyen des phonons thermiques et supérieur à la longueur d'onde des phonons thermiques.

7. Générateur thermoélectrique selon la revendication 6, dans lequel le réseau d'inclusions (RZ) comporte une succession de différents pas (p) de répétition de tailles croissantes.

8. Générateur thermoélectrique selon l'une des revendications 6 et 7, dans lequel le réseau d'inclusions (RZ) comporte une succession d'inclusions de tailles croissantes.

9. Générateur thermoélectrique selon l'une des revendications 6 à 8, dans lequel le matériau semi-conducteur (2) comprend du silicium et au moins un pas (p) de répétition est supérieur à 2 nm et inférieur à 200 nm.

10. Générateur thermoélectrique selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le matériau semi-conducteur (2) comprend du

silicium et l'épaisseur (e) de la membrane est comprise entre 10 nm et 2 µm.

11. Générateur thermoélectrique selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la membrane (2) s'étend parallèlement aux supports (5, 6).

12. Générateur thermoélectrique selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la membrane (2) est à égale distance des supports (5, 6).

13. Générateur thermoélectrique selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les supports (5, 6) sont rigides.

14. Générateur selon la revendication 13, dans lequel les matériaux des supports (5, 6) sont métalliques ou semi-conducteurs.

15. Générateur thermoélectrique selon l'une des revendications 1 à 12, dans lequel les supports (5, 6) sont flexibles.

16. Générateur thermoélectrique selon l'une des revendications précédentes, réalisé de façon intégrée.

17. Circuit intégré incorporant un générateur thermoélectrique selon l'une des revendications 1 à 16.

FIG.1

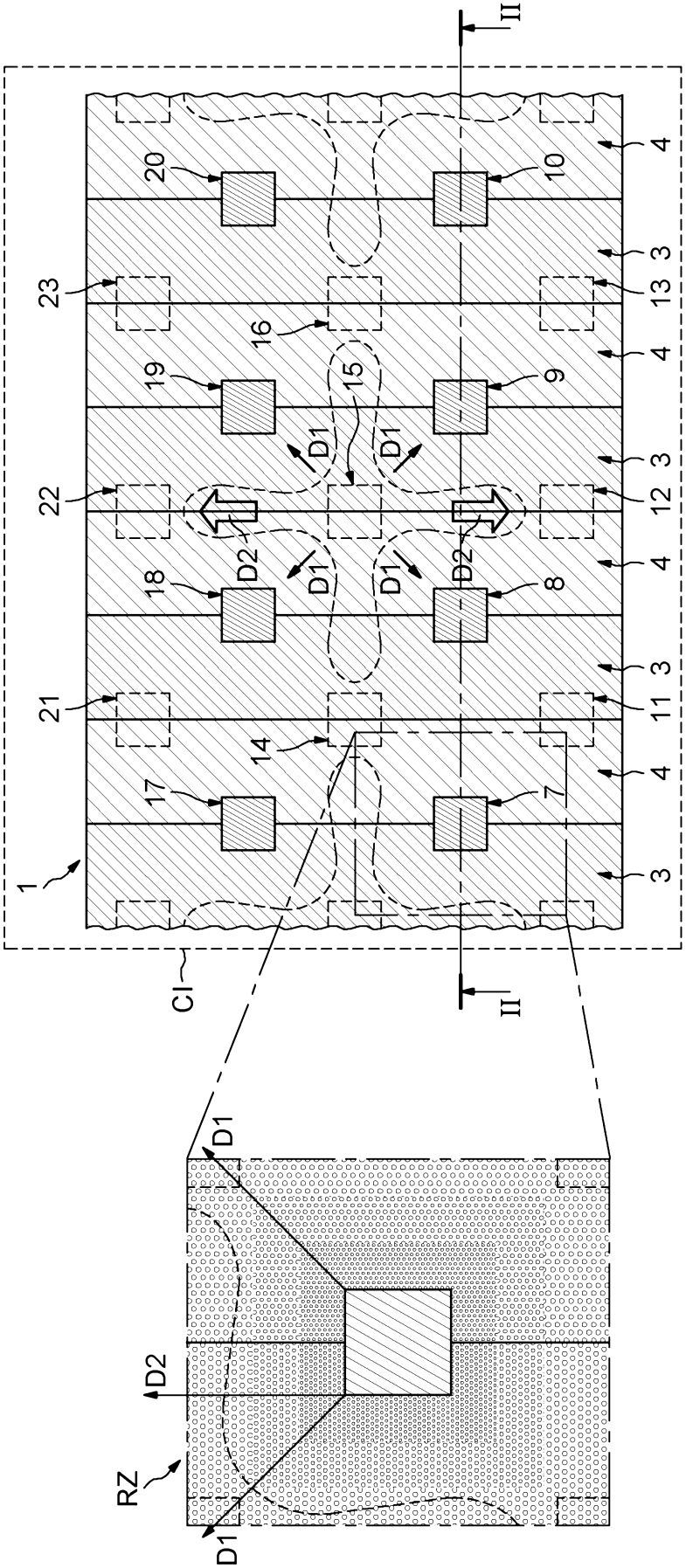

II
20
10
4
23
3
13
16
19
15
9
D1
D1
22
12
D2
D1
D1
D2
18
8
21
11
14
17
7
1
CI
II
D1
D2
RZ
D1

FIG.2

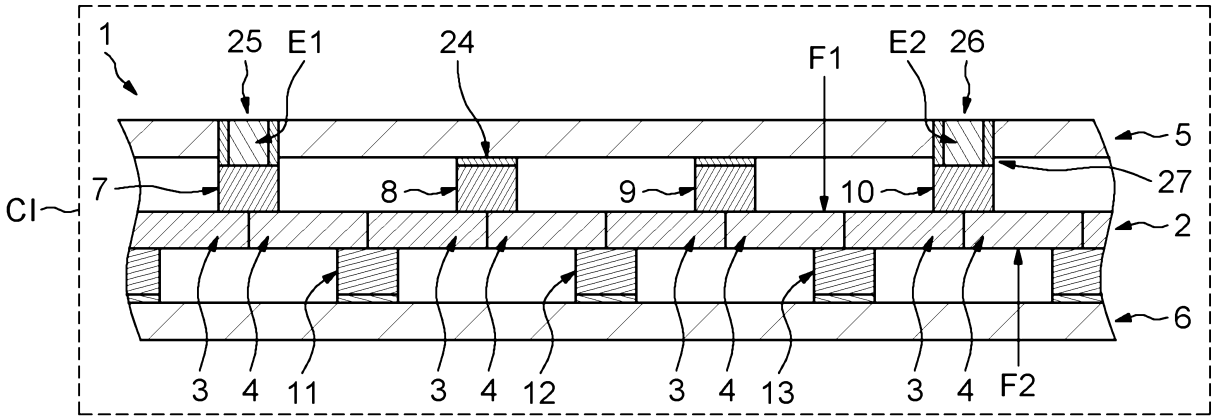


FIG.3

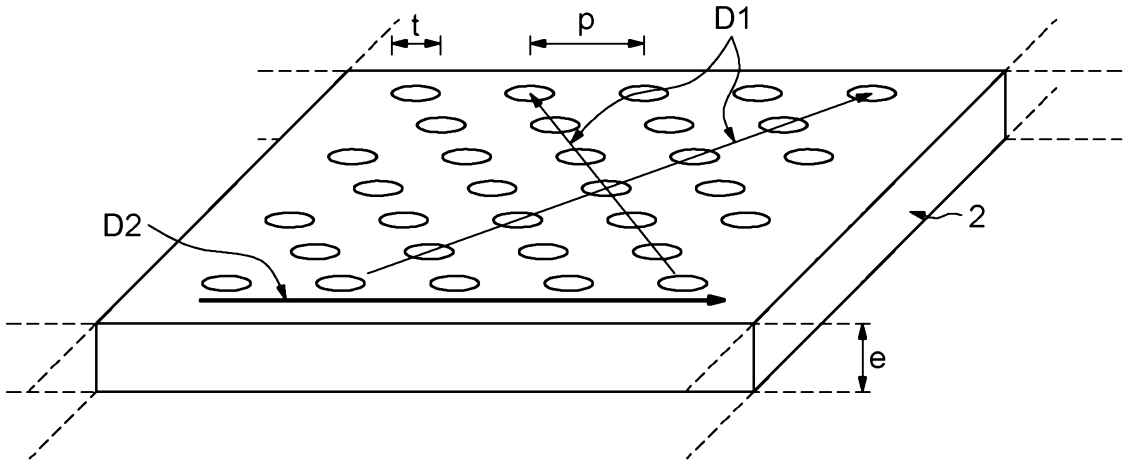


FIG.4

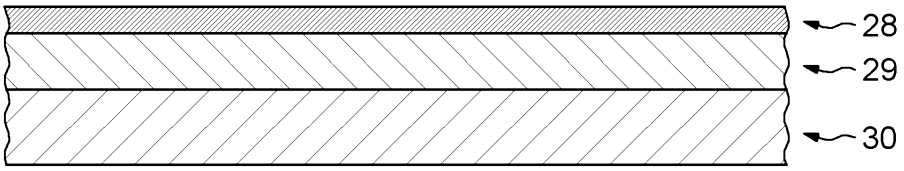


FIG.5

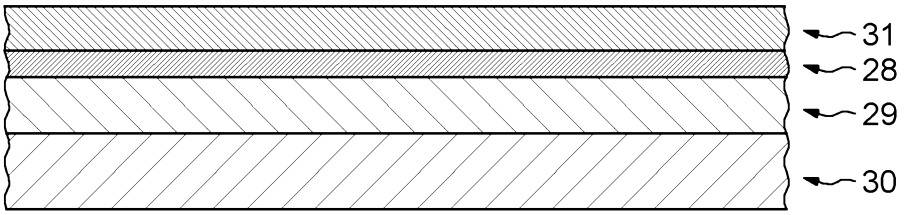


FIG.6

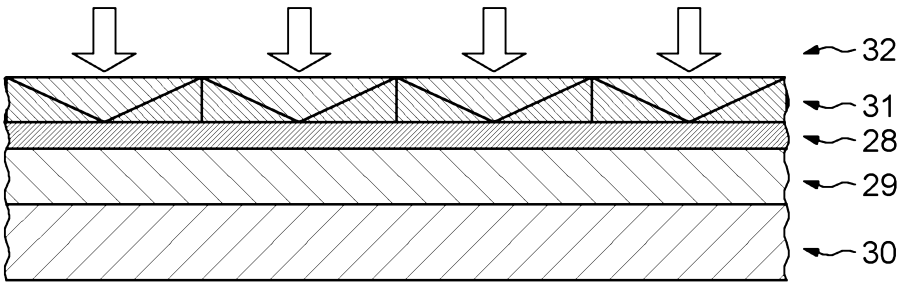


FIG.7

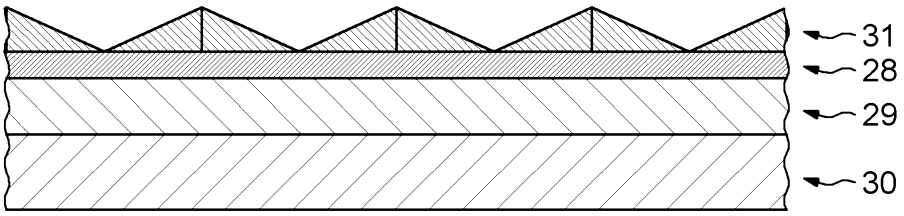


FIG.8

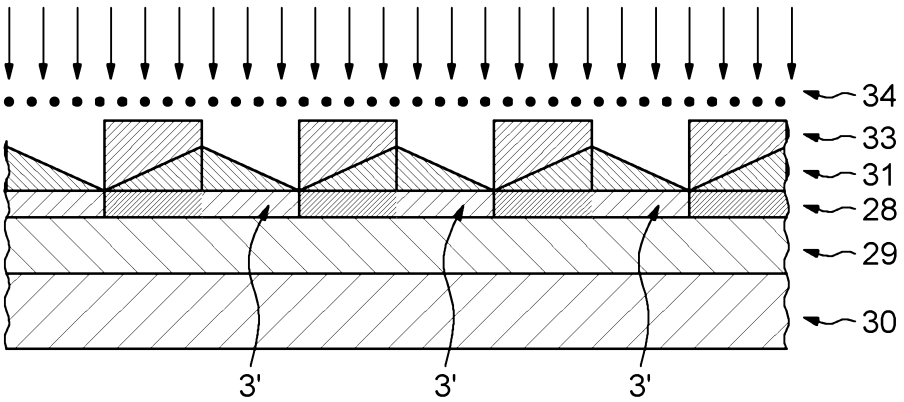


FIG.9

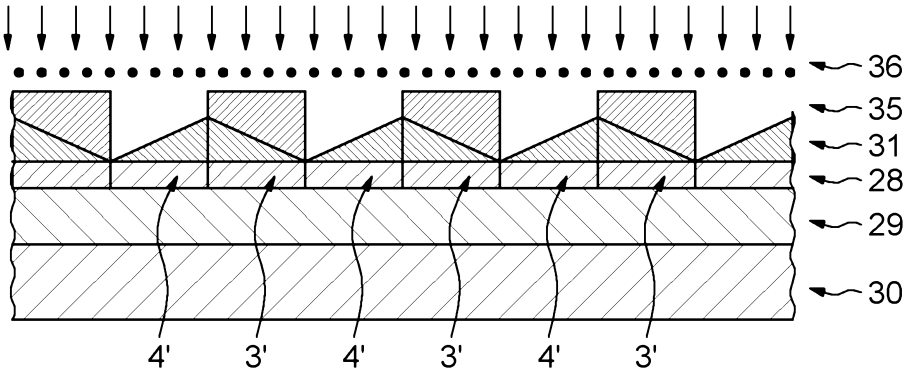


FIG.10

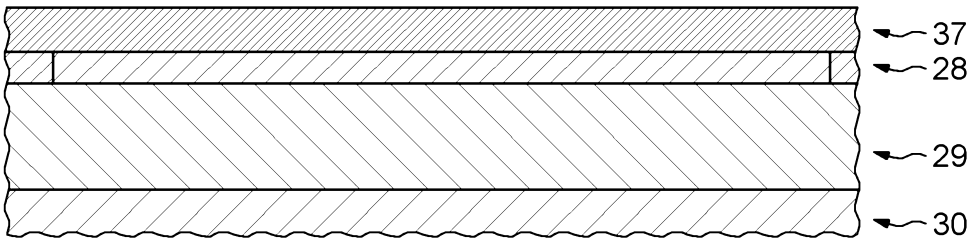


FIG.11

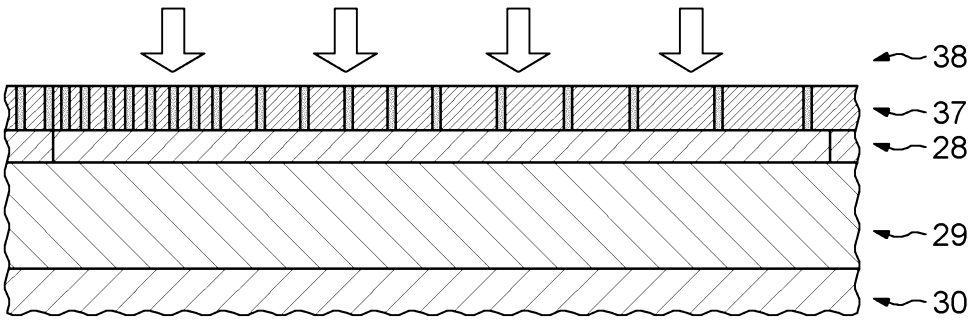


FIG.12

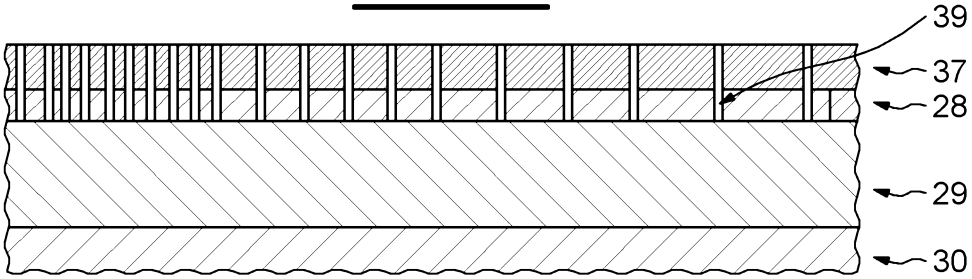


FIG.13

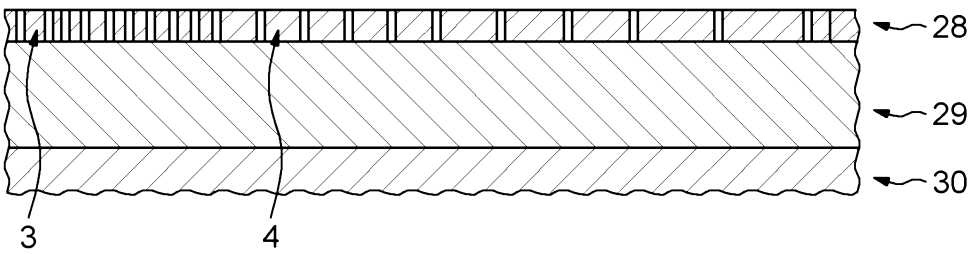


FIG.14

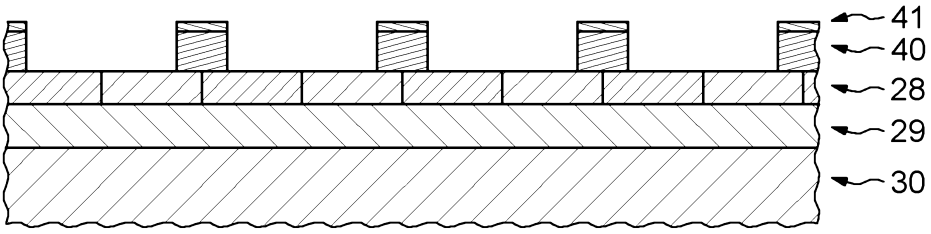


FIG.15

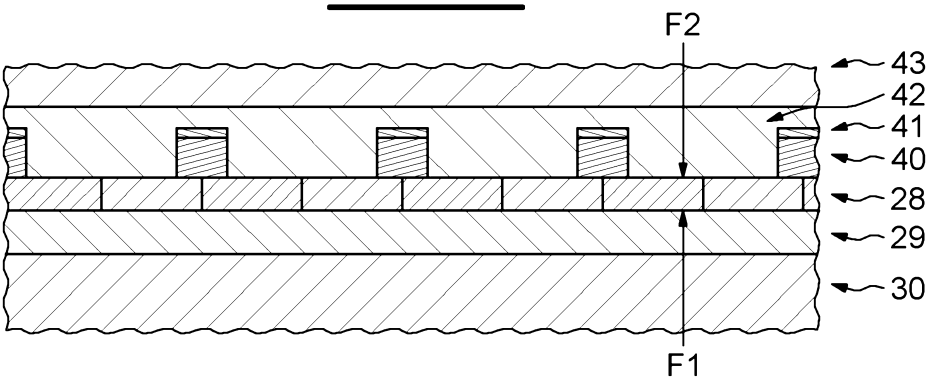


FIG.16

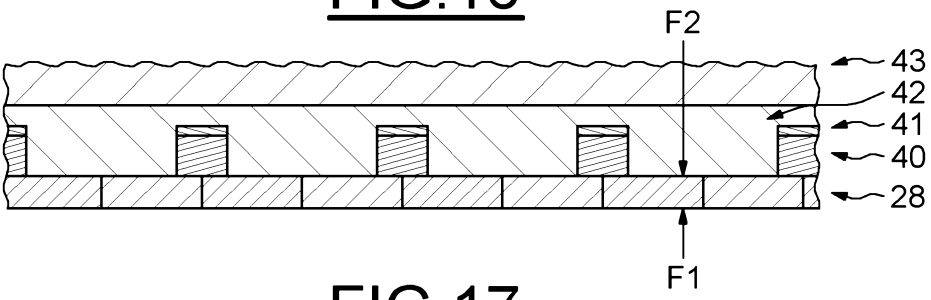


FIG.17

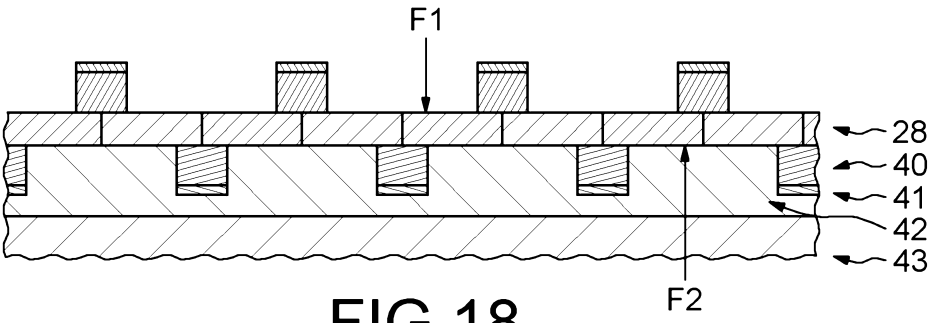


FIG.18

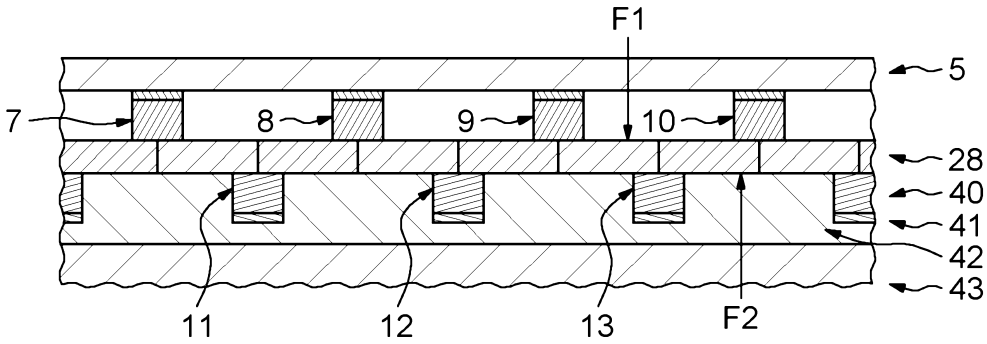


FIG.19

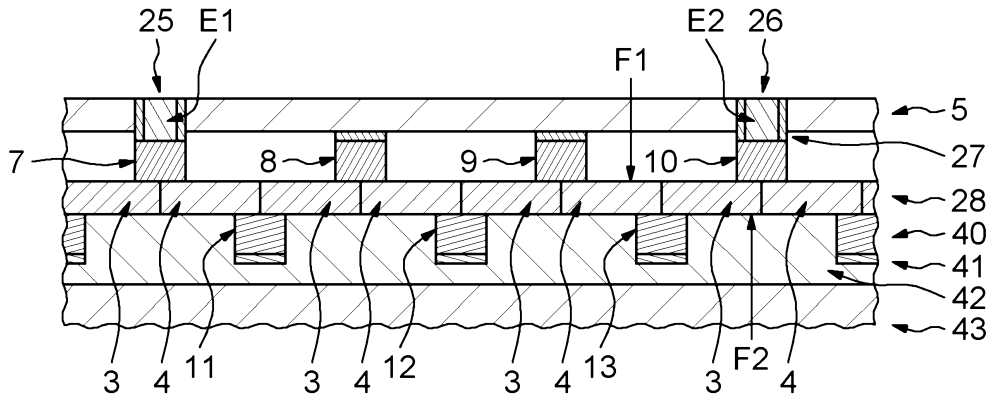
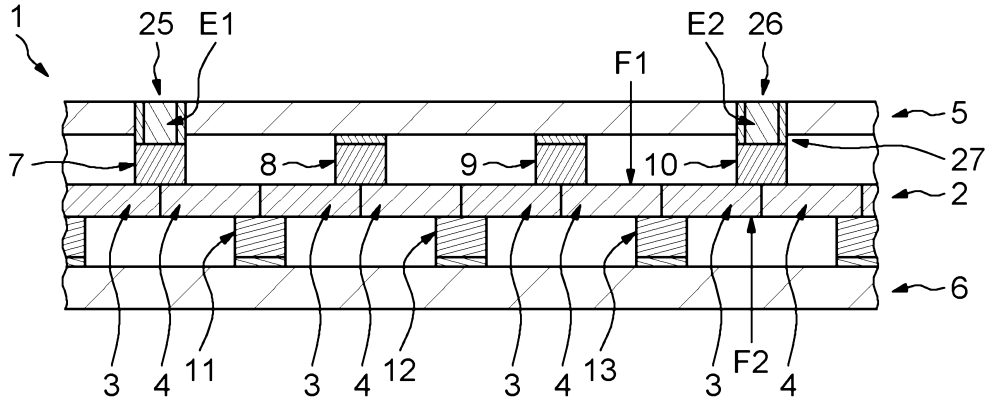

25
E1
E2
26
F1
5
7
8
9
10
27
28
40
41
42
43
3
4
11
3
4
12
3
4
13
3
F2
4

FIG.20


1
25
E1
E2
26
F1
5
7
8
9
10
27
2
6
3
4
11
3
4
12
3
4
13
3
F2
4

N° d'enregistrement national : 1461760 N° de publication : 3029355

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-17 et R.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveauté) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ÉTABLISSEMENT DU PRÉSENT RAPPORT DE RECHERCHE

- ☐ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.
- ☐ Le demandeur a maintenu les revendications.
- ☒ Le demandeur a modifié les revendications.
- ☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.
- ☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.
- ☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITÉS DANS LE PRÉSENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

- ☒ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.
- ☒ Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.
- ☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.
- ☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

N° d'enregistrement national : 1461760 N° de publication : 3029355

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

GB 1 016 102 A (PYE LTD)
5 janvier 1966 (1966-01-05)

JP 2014 154761 A (FURUKAWA ELECTRIC CO LTD)
25 août 2014 (2014-08-25)

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

JP 2012 222244 A (FUJITSU LTD)
12 novembre 2012 (2012-11-12)

JIN XIE ET AL: "Design, Fabrication, and Characterization of CMOS MEMS-Based Thermoelectric Power Generators", JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, IEEE SERVICE CENTER, US, vol. 19, no. 2, 1 avril 2010 (2010-04-01), pages
317-324, XP011301373, ISSN: 1057-7157

KOCKMANN N ET AL: "Microstructured In-Plane Thermoelectric Generators with Optimized Heat Path", SOLID-STATE SENSORS, ACTUATORS AND MICROSYSTEMS CONFERENCE, 2007. TRANSDUCERS 2007. INTERNATIONAL, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 10 juin 2007 (2007-06-10), pages
133-136, XP031215989, ISBN: 978-1-4244-0841-2

US 2013/206199 A1 (LASSITER MATTHEW [US] ET AL)
15 août 2013 (2013-08-15)

US 2012/017962 A1 (SKOTNICKI THOMAS [FR] ET AL)
26 janvier 2012 (2012-01-26)

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT

N° d'enregistrement national : 1461760 N° de publication : 3029355

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES