(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication : **2 555 312**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) N° d'enregistrement national : **83 18385**

(51) Int Cl⁴ : G 01 J 5/12; B 64 G 3/00.

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) **Date de dépôt :** 18 novembre 1983.

(30) **Priorité :**

(43) **Date de la mise à disposition du public de la demande :** BOPI « Brevets » n° 21 du 24 mai 1985.

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

(71) **Demandeur(s) :** *SOCIETE ANONYME D'ETUDES ET REALISATIONS NUCLEAIRES — SODERN, société anonyme.* — FR.

(72) **Inventeur(s) :** Yvon Salles, François Xavier Doittau et Marcel Georges Hebert.

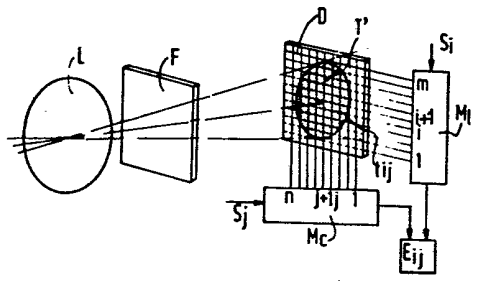
(73) **Titulaire(s) :**

(74) **Mandataire(s) :** Henri Gaudel, société civile SPID.

(54) Capteur statique d'horizon infrarouge perfectionné utilisant une matrice de thermopiles.

(57) Capteur opto-électronique utilisable dans l'infrarouge et comportant un système optique L, F formant l'image T' d'un objet visé (par exemple la Terre) sur un détecteur D. Selon l'invention, ce détecteur est constitué d'une matrice de thermopiles t_{ij} réalisée sur un support de silicium qui permet l'intégration des moyens d'accès M_l, M_c en mode aléatoire à chaque thermopile. Le capteur ne nécessite pas de refroidissement et n'exige pas la modulation spatiale ou temporelle de l'image.

Application : capteurs d'horizon terrestre pour satellite artificiel.



FR 2 555 312 - A1

Vente des fascicules à l'IMPRIMERIE NATIONALE, 27, rue de la Convention — 75732 PARIS CEDEX 15

CAPTEUR STATIQUE D'HORIZON INFRAROUGE PERFECTIONNE UTILISANT UNE MATRICE DE THERMOPILES.

L'invention concerne un capteur opto-électronique du type comportant un système optique formant sur un détecteur l'image de l'objet visé, utilisable dans une bande spectrale allant du visible à l'infrarouge lointain et procédant à la reconnaissance des formes et à la mesure de la position dudit objet.

Dans un état antérieur de l'art, il est connu de mesurer l'attitude d'un satellite géostationnaire stabilisé selon les trois axes par rapport à la Terre, c'est-à-dire de mesurer les dépointages en roulis et tangage de ce satellite, à l'aide de capteurs d'horizon et en particulier de capteurs statiques.

Ces derniers observent la Terre dans un domaine spectral limité à la bande 14-16 µm (bande d'absorption du CO_2 contenu dans l'atmosphère) qui est reconnue comme la plus stable. Ils ont un champ de vue conique de demi-angle au sommet au moins égal à la somme du rayon apparent de la terre (8,7°) et du dépointage admis en roulis ou en tangage (d'une fraction de degré à plusieurs degrés) dans le mode de fonctionnement normal (pointé fin et non pas acquisition).

Les éléments du capteur sensibles au rayonnement sont au moins quatre détecteurs (deux par axe sensible) disposés par paires, par exemple selon les directions Nord-Sud pour le roulis, Est-Ouest pour le tangage.

Ces détecteurs ont, selon une direction radiale par rapport à l'axe optique du capteur, une longueur au moins égale à deux fois le dépointage admis en roulis ou en tangage et sont placés de manière à ce que l'image de l'horizon, à dépointage nul, soit située au milieu de la longueur du détecteur.

La largeur de ces détecteurs n'est pas critique.

Ces détecteurs sont, dans un mode préférentiel, du type thermocouple ou thermopile (assemblage de thermocouples).

Leur réponse unitaire est de la forme :

$R = S.T_o.A_o.(\Omega e.Le - \Omega_t(L_t - L_s))$

dans laquelle :

S est la sensibilité du détecteur (Volt/Watt) ;

T_o le facteur de transmission moyen de l'objectif qui forme l'image de la Terre, et du filtre qui définit la bande passante, à l'intérieur de cette bande passante ;

A_o l'aire de la pupille d'entrée ;

Ω_e l'angle solide correspondant à la surface du détecteur recouverte par l'image de la Terre ;

L_e la luminance de la Terre, dans la bande passante du filtre

Ω_t l'angle solide correspondant à la surface totale du détecteur ;

L_t la luminance du détecteur considéré comme un corps noir à la température T ($250°K < T < 320°K$) dans la bande passante du filtre ;

L_s la luminance de l'espace : corps noir à la température 4°K, dans la bande passante du filtre.

Les dépointages en roulis et tangage sont mesurés en calculant la différence des réponses des détecteurs appariés : Nord, Sud en roulis, Est, Ouest en tangage, mais pour que les mesures soient exactes, il faut que pour chaque paire de détecteurs, les paramètres S, T_o, A_o, L_e, L_t, L_s Ω_t soient égaux entre eux, Ω_e variant seul, proportionnellement au dépointage, d'une manière positive pour l'un des détecteurs constituant la paire de mesure, négative pour l'autre.

Si l'on parvient effectivement à contrôler les paramètres liés aux détecteurs appariés au point de les rendre égaux, aux tolérances près, et si la luminance de l'espace L_s est bien constante en tous points, aucune action n'est, par contre, possible sur le paramètre L_e : luminance de la Terre observée en différents points de la Terre.

La luminance locale de la Terre varie, en particulier, d'une manière déterministe en fonction de la latitude et de la saison, d'une manière aléatoire en fonction des irrégularités météorologiques.

Ces variations sont des causes d'erreur de mesure de l'attitude qui, pour une différence donnée entre la luminance au Nord et au Sud de la Terre, est d'autant plus importante que le champ de dépointage admis, c'est-à-dire la longueur des détecteurs, est plus grand.

Divers dispositifs ont été étudiés et réalisés afin de compenser automatiquement les variations déterministes de la luminance locale de la Terre et d'en limiter les effets ; ils ont donné lieu au dépôt des brevets français n° 2 105 527 (Dispositif de compensation de l'erreur de zéro d'un détecteur astral), n° 2 216 560 (Procédé de correction de la réponse d'un senseur d'horizon statique embarqué à bord d'un satellite stabilisé, et, senseur d'horizon comportant application dudit procédé), et n° 2 353 043 (Senseur d'horizon perfectionné pour satellite artificiel).

On a pensé de plus à fractionner le champ de vue d'un détecteur en différents éléments indépendants de plus petite dimension, ce qui a donné lieu à une réalisation et au dépôt du brevet français n° 2 260 884 (Procédé de réalisation d'un support pour détecteur de rayonnement optique à thermopiles, et détecteur ainsi réalisé).

Dans la pratique, on aboutit finalement à des erreurs résiduelles, dues aux variations aléatoires de la luminance locale de la Terre, que l'on ne sait pas rendre inférieure à une valeur comprise entre 0,03° et 0,05° pour des champs de vue de dépointage variant d'environ un demi degré à environ un degré.

Enfin, les variations locales de la luminance de la Terre restant malgré tout assez faibles, ces procédés de mesure ne permettent pas la mesure du lacet, c'est-à-dire l'attitude du satellite autour du troisième axe dirigé vers la géocentrique.

Pour parvenir à des mesures plus précises dans un champ de dépointage élargi, on a pensé à recourir à un moyen de mesure différent ; il consiste à définir le contour de l'horizon terrestre à l'aide d'un grand nombre de points répartis tout le long de ce contour, points dont les coordonnées sont mesurées, puis à calculer, à partir des coordonnées de ces multiples points, les coordonnées du centre du géoïde, dont le diamètre est d'ailleurs connu. Il est connu que la précision obtenue est d'autant plus grande que le nombre de points est plus élevé, que ce procédé de mesure permet de s'affranchir des variations systématiques de la luminance locale de la Terre (que l'on peut d'ailleurs mesurer), de s'affranchir en grande partie des variations aléatoires de la luminance locale de la Terre (que l'on peut détecter), quel que soit le dépointage du satellite. A la limite, on peut observer la Terre dans une bande spectrale différente de la bande 14-16 µm sans dégrader sensiblement la précision des mesures du roulis et du tangage et utiliser alors les plus importantes variations systématiques de la luminance locale (cas de la bande spectrale 8-12 µm) pour faire une mesure du lacet avec une précision toutefois inférieure à celle obtenue en roulis et tangage.

La multiplication de points de détection de l'horizon est obtenue en utilisant un détecteur sous forme de matrice comportant par exemple m.n éléments indépendants et en exploitant la réponse d'un tel détecteur pour localiser les transitions espace-Terre sur tout le pourtour de la Terre.

Compte tenu de la rotondité du géoïde, la position de son centre est connue avec une résolution bien meilleure que C/m, C étant le champ de vue global et avec une précision bien meilleure que celle qui découle d'une mesure faite par une "balance" analogique entre les signaux d'un détecteur Nord et d'un détecteur Sud (ou Est et Ouest), la multiplicité des points de mesure, tant sur l'horizon qu'à son voisinage, permettant la réduction des erreurs.

Ce procédé de mesure implique l'utilisation d'une matrice d'éléments sensibles en nombre suffisant, et d'assez grande dimension, compte tenu des contraintes causées par l'objectif de formation d'image dans une bande infrarouge.

Dans l'état actuel de l'art on sait fabriquer des matrices de 32 x 32 éléments en matériau semi-conducteur sensible au rayonnement dans la bande 14-16 µm (ou 8-12 µm) qui ont une détectivité élevée dans ces bandes mais exigent un refroidissement à 70°K qui peut difficilement être assuré pour des missions de grande durée dans l'espace.

On sait également fabriquer des matrices de 32 x 32 éléments pyroélectriques, qui ne requièrent pas de refroidissement mais exigent une modulation de l'image (temporelle ou spatiale) ce qui pèse lourdement sur la fiabilité du viseur utilisant un tel détecteur.

Par ailleurs, ces différents types de matrices sont généralement réalisés suivant une technique hybride et l'association de la matrice sensible avec un multiplexeur reste un problème délicat qui constitue un facteur de limitation du nombre des éléments sensibles, comme l'est, également, la limitation des dimensions maximales des matériaux mis en oeuvre.

La présente invention a pour but de pallier les inconvénients et limitations énumérés ci-dessus.

A cet effet, le capteur réalisé conformément à l'invention est caractérisé en ce que ledit détecteur est constitué par une matrice d'éléments sensibles indépendants les uns des autres, disposés sur m lignes et n colonnes, chacun desdits m.n éléments sensibles étant une thermopile ne nécessitant pas de refroidissement ni de modulation spatiale ou temporelle de ladite image et disposée sur un support de silicium qui intègre les moyens permettant l'accès électrique en mode aléatoire à chacun desdits éléments sensibles, ladite image de l'objet visé étant au moins en partie formée à l'intérieur de ladite matrice.

Le diamètre du support de silicium peut atteindre 100 mm et le nombre d'éléments sensibles indépendants peut atteindre 128 x 128 et même 256 x 256.

Dans l'application de la présente invention aux capteurs d'horizon embarqués sur les satellites, les mouvements de dépointage comportent des composantes roulis et tangage combinées entre elles. De ce fait, le centre du géoïde subit un déplacement apparent dans une direction quelconque dont l'amplitude et la direction sont finalement mesurables en coordonnées polaires, à partir d'un point qui représente la position désirée de ce centre, que l'on peut souhaiter variable, et à partir d'une direction choisie comme référence que l'on peut également souhaiter variable.

Pour connaître ce déplacement apparent du centre, on mesure de combien se déplace chaque point du géoïde, c'est-à-dire de l'horizon qui est facilement discernable sur un fond d'espace froid, puisque la position du centre est définie dès lors que l'on a mesuré la position du contour dont les dimensions sont réputées connues. On décompose ensuite ce déplacement en composantes roulis et tangage par projection du déplacement du centre du géoïde sur des axes orthogonaux qui sont préférentiellement rendus parallèles aux lignes et aux colonnes des éléments sensibles du détecteur.

Les mouvements de lacet provoquent une rotation du contour du géoïde autour de son centre. La mesure du lacet devient possible dès que des points ou zones particuliers du contour peuvent être identifiés grâce aux différences qu'ils peuvent présenter par rapport aux points voisins.

Il n'est donc pas nécessaire d'analyser complètement l'image du géoïde formée par l'objectif du viseur sur les m.n éléments sensibles de la matrice ou thermopiles mais seulement les points situés juste de part et d'autre de l'horizon. Le nombre d'éléments dont les réponses doivent être prises en compte est alors notablement inférieur au nombre total

d'éléments. A titre d'exemple, si C est le champ de vue global du détecteur, 17,4° le diamètre apparent de la Terre, et en posant m = n, le nombre N d'éléments à consulter est :

$$N = \frac{2 \times 17,4 \times \Pi}{C/m} \cdot \frac{\Pi}{4}$$

alors que le nombre total d'éléments est m.n. Avec m = n = 128, N = 440 et m.n = 16 384.

Cette réduction très sensible du nombre d'éléments à consulter permet, en conservant une faible constante de temps de réponse du capteur, de faire travailler les circuits de traitement à une fréquence qui reste assez basse, mais il faut que l'on puisse accéder, d'une manière aléatoire, aux m.n éléments de la matrice qui sont thermiquement et électriquement indépendants.

La description suivante en regard des dessins annexés, le tout donné à titre d'exemple, fera bien comprendre comment l'invention peut être réalisée.

La figure 1 représente schématiquement les organes essentiels d'un capteur d'horizon conforme à l'invention.

La figure 2 représente la matrice de thermopiles réalisée pour le capteur de l'invention.

Sur la figure 1, les organes essentiels du capteur d'horizon comportent un système optique constitué par une lentille L et un filtre interférentiel F qui limite les rayonnements échangés à la fraction contenue dans la bande spectrale utilisée, ledit système optique formant en T' dans le plan du détecteur D l'image de l'objet observé, par exemple la Terre.

Conformément à l'invention, le détecteur D est constitué par une matrice d'éléments sensibles disposés sur m lignes et n colonnes, chacun des m.n éléments sensibles étant une thermopile déposée sur un support de silicium et qui présente l'avantage de ne pas nécessiter de refroidissement et de percevoir le rayonnement infrarouge non modulé.

Pour parvenir à un accès aléatoire aux thermopiles, les extrémités d'une polarité donnée des n thermopiles alignées sur la même ligne de rang i ($1 < i < m$) sont connectées à un conducteur unique, parallèle à cette ligne, disposé entre la ligne de rang i et la ligne de rang i + 1 et qui sort de la zone des éléments sensibles pour aboutir au multiplexeur M_l. Ce motif est répété autant de fois qu'il y a de lignes, soit m fois.

Les extrémités de l'autre polarité des m thermopiles alignées sur la même colonne sont connectées à un autre conducteur unique, parallèle à cette colonne disposé entre la colonne de rang j ($1 < j < n$) et la colonne de rang j + 1 et qui sort de la zone des éléments sensibles pour aboutir au multiplexeur M_c. Ce motif est répété autant de fois qu'il y a de colonnes, soit n fois.

A l'aide des multiplexeurs adressables auxquels aboutissent les m conducteurs de ligne et les n conducteurs de colonne, on peut extraire la réponse E_{ij} de la thermopile t_{ij} définie par la ligne de rang i et la colonne de rang j, et de celle-là seulement, en adressant aux multiplexeurs les ordres S_i et S_j rendant passants les éléments des rangs appropriés et maintenant les autres bloqués.

Les multiplexeurs sont formés par intégration dans le support de Silicium avant formation des conducteurs de lignes et de colonnes. Pour des besoins de fiabilité, il est possible de redonder les multiplexeurs en prolongeant les conducteurs lignes et colonnes de part et d'autre de la zone des thermopiles.

Sur la figure 2 représentant une vue partielle de la matrice de thermopiles, la figure 2a est une coupe transversale suivant un conducteur de ligne et la figure 2b est la vue de dessus correspondante.

La coupe de la figure 2a suivant un plan perpendiculaire à celui de la figure 2b et passant par exemple par le conducteur compris entre les lignes i et i + 1 fait

apparaître la semelle métallique 1', le support de silicium 1 d'épaisseur e = 200 µm, le trou pyramidal tronqué 2 pratiqué dans ce support et correspondant à la partie de silicium enlevée par photogravure (avec une pente des parois de la gravure $\alpha = 54,7°$ imposée par les orientations 100 du monocristal), le substrat 3 constitué par une "peau" d'oxyde de silicium SiO_2, le conducteur de ligne 4 et la couche isolante de SiO_2 5 entre le conducteur de ligne 4 et le conducteur de colonne 6.

La vue de dessus de la figure 2b montre le conducteur de ligne 4 entre les lignes de rangs i et i + 1 et le conducteur de colonne 6 entre les colonnes de rangs j et j + 1. Le dessin de l'élément sensible 11 associé à la ligne i et à la colonne j montre successivement l'élément électro-positif 7 connecté au conducteur de colonne 6, la soudure chaude 8, l'élément électro-négatif 9 et la soudure froide 10. L'ensemble 7, 8, 9 et 10 forme un thermocouple et ledit élément sensible 11 est constitué par la mise en série de 6 thermocouples identiques disposés suivant une grecque avec le dernier élément électro-négatif connecté au conducteur de ligne 4.

Du point de vue mécanique, thermique et électrique les matrices de thermopile sont réalisées comme suit :

Sur une semelle métallique bonne conductrice de la chaleur et assez robuste pour assurer la fixation mécanique du détecteur, on colle un support en silicium d'épaisseur environ 200 µm qui a subi au préalable les traitements suivants.

Dans une première phase, une oxydation permet de former une couche de SiO_2 d'épaisseur comprise entre 0,1 µm et 1 µm qui constitue le substrat des thermopiles, lui-même recouvert d'une mince couche de 0,1 µm de nitrure de silicium Si_3N_4 afin d'éviter toute attaque ultérieure lors de l'élimination de la couche de SiO_2 déposée entre les jeux de conducteurs lignes et colonnes et d'assurer une bonne adhérence des métallisations de ces conducteurs.

Dans une seconde phase, le silicium est photogravé sur la face opposée à celle supportant le substrat de SiO_2, de manière à faire disparaître le silicium dans une série de n colonnes de m lignes de trous carrés (ou rectangulaires) qui restent recouverts de la seule pellicule de SiO_2 précédemment formée. Par suite de l'orientation du monocristal de silicium d'origine, la pente des parois des trous est 54,7° et pour un support d'épaisseur 200 µm les dimensions de la face ouverte des trous sont de 282 µm supérieurs aux dimensions du même trou sous la pellicule de SiO_2.

Pour que l'épaisseur minimale de silicium entre deux trous ne soit pas nulle, il faut que l'espacement entre deux trous de dimension e, côté substrat, soit supérieur à 282 + e µm. Avec des trous carrés de côté e = 100 µm, on peut donc faire tenir une matrice de 128 x 128 éléments dans un support de 45 x 50 mm de côté.

C'est sur cet ensemble support troué et substrat que l'on vient déposer les conducteurs de lignes et de colonnes qui se croisent nécessairement et pour éviter tout contact intempestif entre ces conducteurs, on emploie le mode de réalisation suivant :

Dans une première phase, on procède par évaporation sous vide d'un alliage conducteur (T_i - P_t - Au), au dépôt d'un premier jeu de conducteurs, ceux de ligne par exemple.

Dans une deuxième phase, l'ensemble de la zone couverte par le premier jeu conducteur est recouverte d'un diélectrique épais (SiO_2 de 8 000 Å d'épaisseur) déposé par plasma à basse température.

Dans une troisième phase, on procède, par évaporation sous vide d'un métal conducteur, au dépôt du second jeu de conducteurs, ceux de colonne par exemple.

Dans une quatrième phase, on élimine la couche de SiO_2, déposée pendant la seconde phase, par une attaque en surface, de manière à retrouver le substrat sur lequel on déposera les thermopiles. L'isolement par le SiO_2 reste par

contre intact entre le premier jeu et le deuxième jeu de conducteurs. Les capacités parasites qui sont formées entre les conducteurs aux croisements de ceux-ci, ne provoquent pas de perturbation lors du fonctionnement, car, comme expliqué par la réduction du nombre des éléments à consulter, le fonctionnement ne fait pas appel à des fréquences élevées.

Sur les cases de substrat délimitées par le réseau de m.n conducteurs ainsi réalisé, on vient ensuite déposer les thermopiles selon un processus déjà connu.

Chaque thermopile est constituée d'une grecque de couples connectés en série dont les extrémités sont électriquement raccordées aux conducteurs de lignes et de colonnes. Les thermopiles sont formées de manière telle que les soudures "chaudes" soient alignées au milieu des trous et les soudures "froides" alignées de part et d'autre des trous au-dessus des parties du substrat qui recouvrent le support en Silicium. Les soudures chaudes sont donc thermiquement isolées du support alors que les soudures froides sont thermiquement couplées au support, compte tenu de la faible épaisseur du substrat. La surface sensible du détecteur est ensuite recouverte d'une couche isolante et d'un dépôt absorbant le rayonnement infrarouge, tel le noir d'or.

Les multiplexeurs lignes et colonnes sont placés sur la surface de la tranche de Silicium qui n'est pas occupée par les thermopiles, aussi loin de celle-ci qu'il est possible pour éviter un couplage thermique.

Du point de vue optique, les dimensions citées plus haut pour le détecteur : 45 à 50 mm de côté de surface sensible conduisent à un objectif dont la longueur focale est de l'ordre de 90 mm pour un champ global de l'ordre de 30°.

Un tel objectif, habituellement constitué d'une simple lentille en Germanium, forme une image de la Terre qui souffre de courbure de champ alors que la matrice de thermopiles est nécessairement plane.

Si les dépointages admis restent faibles, on peut ne pas corriger la courbure de champ en faisant la mise au point exacte pour le contour de l'horizon sur le plan des thermopiles, car la dégradation de la netteté de l'image de ce contour est faible aux faibles dépointages.

Il n'en est pas de même avec des dépointages plus importants qui impliquent une correction plus ou moins parfaite de la courbure de champ, en fonction des dépointages admis, à l'aide des procédés habituellement utilisés.

Il est bien entendu que la description ci-dessus d'une application de l'invention aux capteurs d'horizon embarqués sur des satellites est faite uniquement à titre d'exemple non limitatif et que le même principe de fonctionnement peut être appliqué à d'autres dispositifs.

REVENDICATIONS :

1. Capteur opto-électronique du type comportant un système optique formant sur un détecteur l'image de l'objet visé, utilisable dans une bande spectrale allant du visible à l'infrarouge lointain et procédant à la reconnaissance des formes et à la mesure de la position dudit objet, caractérisé en ce que ledit détecteur est constitué par une matrice d'éléments sensibles indépendants les uns des autres, disposés sur m lignes et n colonnes chacun desdits m.n éléments sensibles étant une thermopile ne nécessitant pas de refroidissement ni de modulation spatiale ou temporelle de ladite image et déposée sur un support de Silicium qui intègre les moyens permettant l'accès électrique en mode aléatoire à chacun desdits éléments sensibles, ladite image de l'objet visé étant au moins en partie formée à l'intérieur de ladite matrice.

2. Capteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que les éléments sensibles du détecteur qui sont utilisés sont seulement ceux situés juste de part et d'autre du contour de ladite image contrastant sur un fond continu, ou ceux situés au voisinage immédiat des images de points de l'objet faisant contraste avec le reste de l'objet, afin de réduire le nombre de thermopiles de la matrice qu'il faut interroger pour définir la forme et/ou la position de l'objet observé.

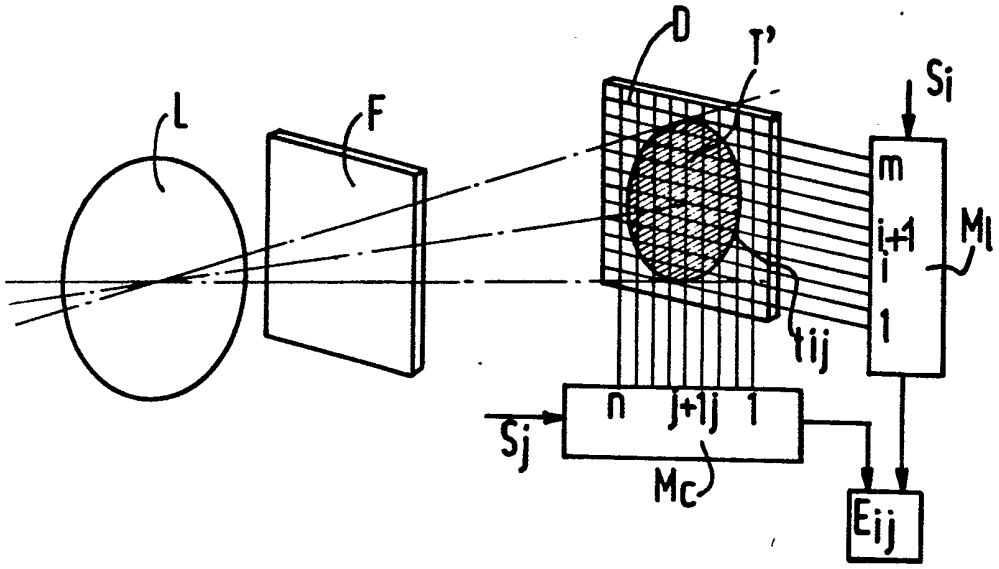
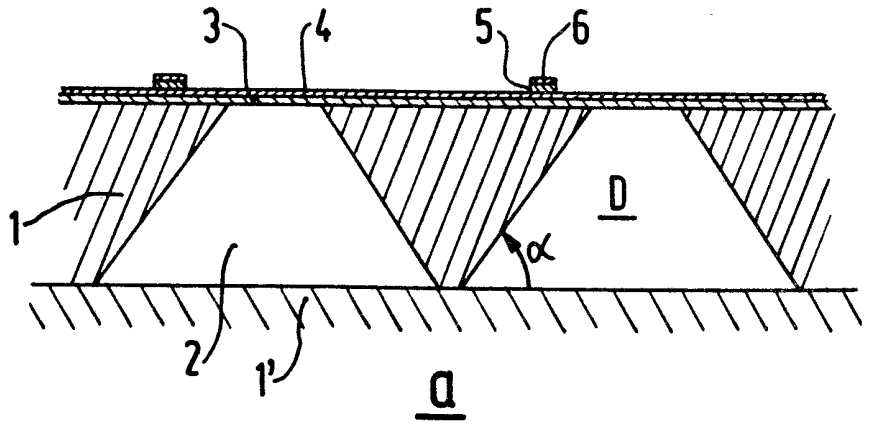
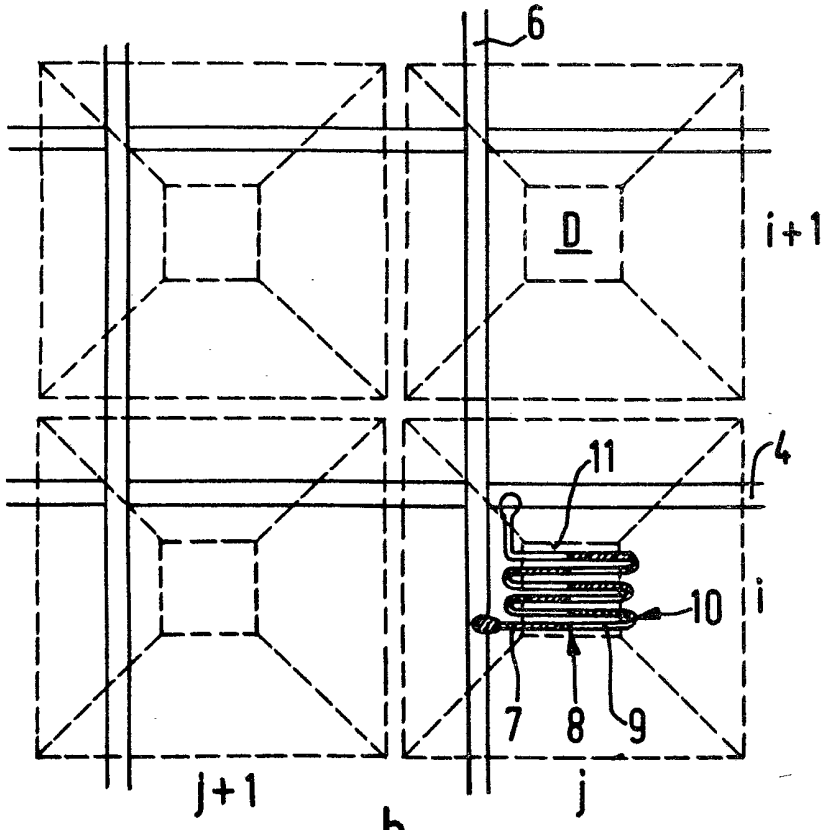


FIG.1



a



b

FIG.2