



CONFÉDÉRATION SUISSE

OFFICE FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

⑤ Int. Cl.³: G 02 B

27/17

Brevet d'invention délivré pour la Suisse et le Liechtenstein
 Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein



⑫ FASCICULE DU BREVET A5

⑪

632 851

⑳ Numéro de la demande: 10650/79

㉔ Date de dépôt: 30.11.1979

㉓ Priorité(s): 14.12.1978 FR 78 35265

㉔ Brevet délivré le: 29.10.1982

㉔ Fascicule du brevet
 publié le: 29.10.1982

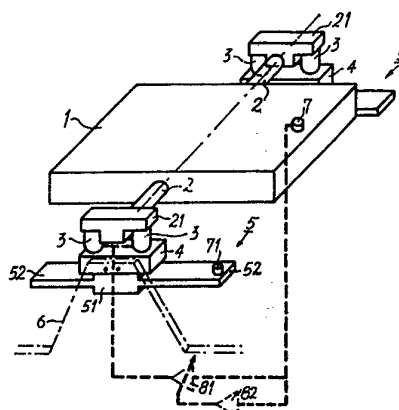
㉓ Titulaire(s):
 Office National d'Etudes et de Recherches
 Aéronautiques (O.N.E.R.A.),
 Châtillon-sous-Bagneux (FR)

㉔ Inventeur(s):
 Jean-Claude Tichtinsky, Orsay (FR)

㉔ Mandataire:
 Ritscher & Seifert, Zürich

⑤ Dispositif vibrant pour le traitement d'un faisceau optique.

⑤ Dispositif vibrant pour le traitement d'un faisceau optique, du genre comportant un organe optique (1) et un résonateur mécanique (2) imprimant à l'organe optique un mouvement de vibration relativement à un bâti (6). Ledit dispositif comporte en outre un deuxième résonateur mécanique (5) ayant la même fréquence de résonance que le premier et couplé à celui-ci au moyen du bâti, de telle sorte que les deux résonateurs (2 et 5) vibrent en opposition de phase.



REVENDICATIONS

1. Dispositif vibrant pour le traitement d'un faisceau optique comprenant:

- un premier résonateur mécanique dit «résonateur principal» (1, 2, 21), comprenant un organe optique (1), des moyens élastiques à au moins un degré de liberté (2), des moyens de liaison de l'organe optique auxdits moyens élastiques,
- un bâti (6) et des moyens (3) pour imprimer à l'organe optique, relativement au bâti, un mouvement vibratoire de résonance ayant ledit degré de liberté et dont la fréquence est celle du résonateur principal,
- un second résonateur mécanique dit «résonateur auxiliaire» (5) accordé sur la fréquence propre du résonateur principal, ayant le même degré de liberté et vibrant en opposition de phase pour que les sollicitations mécaniques périodiques appliquées respectivement par les deux résonateurs à une portion du bâti aient, à tout instant, une même direction et des sens opposés,
- des moyens de liaison (4 ou 21) d'un des résonateurs à une portion du bâti, ledit dispositif étant caractérisé en ce que le résonateur auxiliaire (5) comporte un ensemble de lames (52) élastiques encastrées par l'une de leurs extrémités et dimensionnées pour entrer en oscillation à la fréquence propre du résonateur principal.

2. Dispositif vibrant selon la revendication 1, caractérisé en ce que les moyens (3) pour imprimer le mouvement vibratoire de résonance à l'organe optique (1) sont liés au résonateur principal (2) et en ce que le résonateur auxiliaire (5) est lié à ladite portion du bâti (6).

3. Dispositif vibrant selon la revendication 1, caractérisé en ce que les moyens (3) pour imprimer le mouvement vibratoire de résonance à l'organe optique (1) sont liés au résonateur auxiliaire (5) et en ce que le résonateur principal (2) est lié à ladite portion du bâti (6).

4. Dispositif vibrant selon l'une quelconque des revendications 2 ou 3 dans lequel le résonateur principal comprend l'organe optique (1), une barre de torsion (2) assurant le rappel élastique et dont l'axe coïncide avec l'axe de rotation du mouvement de l'organe optique, des moyens de liaison (21) dudit organe optique à la barre de torsion (2) et des moyens (3) pour imprimer à l'organe optique un mouvement vibratoire rotatif, caractérisé en ce que le résonateur auxiliaire (5) comporte deux couples de lames vibrantes (52), chaque couple étant disposé au voisinage de ladite portion du bâti (6).

5. Dispositif vibrant selon la revendication 4, caractérisé en ce que les moyens (3) pour imprimer le mouvement vibratoire rotatif à l'organe optique (1) comportent deux excitateurs piézo-électriques dont les faces opposées sont reliées respectivement aux supports d'extrémité (21) de la barre de torsion (2) et au résonateur auxiliaire (5) au moyen d'une embase (4), les couples de lames élastiques (52) s'étendant symétriquement de part et d'autre de l'embase (4) dans un plan perpendiculaire au plan axial commun du résonateur principal et des excitateurs.

6. Dispositif vibrant selon la revendication 5, caractérisé en ce que chaque exciteur (3) comprend deux empilements parallèles de disques piézo-électriques, alimentés par un générateur de tension alternative, les deux excitateurs étant alimentés en phase, chacun des empilements d'un même exciteur étant alimenté en opposition de phase.

7. Dispositif vibrant selon l'une quelconque des revendications 4 à 6, caractérisé en ce que les moyens (3) pour imprimer le mouvement vibratoire rotatif comportent, en outre, un capteur (7) de déplacement lié à l'un des résona-

teurs et un amplificateur (81) dont l'entrée est connectée à la sortie dudit capteur et dont la sortie commande les excitateurs (3).

8. Dispositif vibrant selon la revendication 7, caractérisé en ce que le capteur de déplacement (7) est lié au résonateur principal.

9. Dispositif vibrant selon l'une quelconque des revendications 7 ou 8, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens de commande de gain (82) connectés audit capteur (7) et dont la sortie agit sur le gain de l'amplificateur (81).

10. Dispositif vibrant selon la revendication 1, caractérisé en ce que le résonateur auxiliaire (5) est lié directement à ladite portion de bâti (6) et en ce que le résonateur principal (2) est lié à ladite portion de bâti par l'intermédiaire du résonateur auxiliaire (5).

11. Dispositif vibrant selon la revendication 10, caractérisé en ce que le résonateur auxiliaire (5) est constitué par une embase (121) solidaire de ladite portion de bâti (130) et prolongée par quatre lames flexibles (52, 53) disposées selon deux axes géométriques rectangulaires pour former les branches d'une croix, en ce que les moyens (3) d'imprimer le mouvement vibratoire à l'organe optique sont constitués par quatre empilements (111-114) de disques piézo-électriques fixés sur l'embase respectivement à proximité de la naissance des quatre lames, centrés sur les axes de ces lames et supportant l'organe optique pour constituer avec lui le résonateur principal.

12. Dispositif vibrant selon la revendication 11, caractérisé en ce que les deux empilements (111-112) centrés sur l'un des axes sont excités en opposition de phase par un premier générateur électrique de signaux alternatifs, à la fréquence de résonance du résonateur principal autour dudit axe, en ce que les deux empilements (113-114) alignés sur l'autre axe sont excités en opposition de phase par un deuxième générateur électrique de signaux alternatifs à la fréquence de résonance du résonateur principal autour dudit axe et en ce que les quatre lames (52, 53) flexibles sont respectivement dimensionnées pour entrer en résonance sous l'effet des vibrations engendrées par le résonateur principal.

L'invention est relative à un dispositif vibrant pour le traitement d'un faisceau optique, c'est-à-dire à un dispositif comportant un organe optique et des moyens pour imprimer à celui-ci un mouvement vibratoire relativement à un bâti supportant le dispositif.

On entend ici par «organe optique» tout élément destiné à imposer à un faisceau de radiations électromagnétiques un traitement optique tel qu'une réflexion, une réfraction, une diffraction, une modulation de phase ou d'amplitude, etc... Comme exemples d'organes optiques éventuellement soumis à un mouvement vibratoire de rotation ou de translation relativement à un bâti d'appareil d'optique ou d'élément de banc optique, on peut citer les grilles mobiles ou les miroirs de renvoi de spectromètres infrarouges à grilles, les réseaux utilisés dans les techniques holographiques, les maquettes de photo-élasticimétrie, etc...

Le but général de l'invention est de maintenir le bâti immobile malgré le mouvement vibratoire du dispositif qu'il supporte.

Le mouvement vibratoire est obtenu soit au moyen d'une commande mécanique positive (comportant par exemple un moteur électrique d'entraînement et une liaison par bielle ou par came), soit au moyen d'un oscillateur mécanique supportant l'organe optique et excité à sa fréquence fondamentale de résonance. Cette deuxième solution est en général pré-

férée, notamment pour des raisons d'encombrement et de rendement.

Mais un dispositif vibrant à résonateur lié à un bâti excite des vibrations dans celui-ci. Cet inconvénient devient fort gênant lorsque l'appareil ou le banc est destiné à des essais ou des mesures qui exigent un niveau de résolution élevé et/ou une grande sensibilité. La solution à laquelle on est amené tout naturellement est de surdimensionner le bâti pour augmenter sa rigidité et sa masse. Elle est acceptable pour des appareils ou bancs utilisés à poste fixe mais ne l'est plus pour des appareils montés dans des aéronefs ou des satellites, dans lesquels la masse du matériel embarqué est impérativement limitée.

On a déjà proposé dans le brevet français n° 2 116 089 une solution permettant dans certains cas de réduire l'excitation du bâti. Elle consiste, dans un dispositif à résonateur à barre de torsion destiné à faire osciller un miroir de rotation, à lier les extrémités de la barre de torsion au bâti par des pivots élastiques, c'est-à-dire par des organes flexibles dont la raideur en torsion est très inférieure à la raideur de la barre. Il ne s'agit là que d'une solution particulière et de toute façon peu satisfaisante (notamment pour un appareil embarqué) car la portion de bâti liée directement au résonateur est soumise à un moment de torsion qui n'est pas négligeable et qui vient de la réaction du système excitateur. Les vibrations transmises au bâti de l'appareil et aux autres organes qu'il supporte entraînent une dissipation d'énergie qui ne peut être empruntée qu'à l'organe d'excitation du résonateur. Le coefficient de résonance Q du système vibrant se trouve altéré et dépend de l'amortissement interne de la structure constituée par l'appareil et éventuellement par son support. Or, cet amortissement varie lui-même avec les conditions ambiantes (température, pression, sollicitations mécaniques dues notamment à l'inertie en cas d'accélération, gravité variable, etc...). Les paramètres caractérisant le mouvement de vibration (notamment la fréquence et l'amplitude) ne sont plus des constantes).

On a aussi proposé de réduire les vibrations parasites engendrées sur le support d'un dispositif animé d'un mouvement oscillant en disposant sur le support un amortisseur dynamique sans frottement constitué par un système oscillant comprenant une masse supportée par des moyens élastiques judicieusement dimensionnés et fixés au support. Les vibrations parasites excitent l'amortisseur dynamique qui oscille et produit une force de réaction qui est, à chaque instant, égale et opposée à la force perturbatrice. Les amortisseurs dynamiques étudiés jusqu'ici conviennent pour les applications industrielles dans lesquelles on accepte un niveau résiduel de vibration important en raison de la masse des installations ou de l'environnement existant, mais ces amortisseurs ne sont pas suffisamment performants pour être efficaces lorsqu'ils sont installés sur des appareils d'optique du genre mentionné ci-dessus.

L'invention permet d'éviter tous ces inconvénients car elle procure un dispositif vibrant qui ne réagit pas sur la portion de bâti à laquelle il est lié. Plus précisément, ce dispositif inclut des moyens de compensation sensibles et efficaces qui appliquent à tout moment à ladite portion de bâti une réaction qui annule la réaction appliquée par le résonateur.

Le dispositif vibrant pour le traitement d'un faisceau optique selon l'invention comporte:

- un premier résonateur mécanique dit «résonateur principal» comprenant un organe optique, des moyens élastiques à au moins un degré de liberté, des moyens de liaison de l'organe optique auxdits moyens élastiques,
- un bâti et des moyens pour imprimer à l'organe optique, relativement au bâti, un mouvement vibratoire de résonance

ayant ledit degré de liberté et dont la fréquence est celle du résonateur principal,

- un second résonateur mécanique dit «résonateur auxiliaire» accordé sur la fréquence propre du résonateur principal, ayant le même degré de liberté et vibrant en opposition de phase pour que les sollicitations mécaniques périodiques appliquées respectivement par les deux résonateurs à une portion du bâti aient, à tout instant, une même direction et des sens opposés,
- des moyens de liaison d'un des résonateurs à une portion du bâti, ledit dispositif étant caractérisé en ce que le résonateur auxiliaire comporte un ensemble de lames élastiques encastrées par l'une de leurs extrémités et dimensionnées pour entrer en oscillation à la fréquence propre du résonateur principal.

Dans une forme de réalisation de l'invention le résonateur auxiliaire est directement lié à ladite portion du bâti et est relié au résonateur principal par les moyens qui communiquent à l'organe optique le mouvement vibratoire de résonance.

Dans une variante de réalisation, dans laquelle le rendement mécanique est amélioré, c'est le résonateur principal qui est relié au bâti.

En régime vibratoire permanent, le couplage des deux résonateurs par la portion de bâti leur impose de vibrer en opposition de phase avec un rapport d'amplitude tel que les sollicitations mécaniques périodiques appliquées respectivement par les deux résonateurs à la portion de bâti ont à tout instant des amplitudes égales, une même direction et des sens opposés, soit:

I_1 l'inertie (ou masse dynamique) du résonateur principal, K_1 sa raideur dans le ou les degrés de liberté qui lui sont assignés, a_1 la valeur instantanée du déplacement (angulaire et/ou linéaire) du barycentre dudit résonateur et A_1 l'amplitude de ce déplacement;

I_2 l'inertie du système constitué par la portion de bâti et par les moyens de liaison des deux résonateurs à cette portion de bâti, K_2 sa raideur dans le ou les mêmes degrés de liberté, a_2 la valeur instantanée du déplacement de son barycentre et A_2 l'amplitude de ce déplacement;

enfin I_3 l'inertie du résonateur auxiliaire, K_3 sa raideur dans le ou les mêmes degrés de liberté, a_3 la valeur instantanée du déplacement de son barycentre et A_3 l'amplitude de ce déplacement.

Dans un système non amorti, en raison du couplage existant entre les deux résonateurs par la portion de bâti, le système des équations de mouvement est le suivant:

$$\left. \begin{aligned} I_1 (d^2 a_1 / dt^2) + K_1 (a_1 - a_2) &= 0 \\ I_2 (d^2 a_2 / dt^2) + K_1 (a_2 - a_1) + K_3 (a_2 - a_3) &= 0 \\ I_3 (d^2 a_3 / dt^2) + K_2 (a_3 - a_2) &= 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

pour une fréquence de vibration quelconque F , le système des équations de déplacement est le suivant (t étant le temps):

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= A_1 \sin 2\pi Ft \\ a_2 &= A_2 \sin 2\pi Ft \\ a_3 &= A_3 \sin 2\pi Ft \end{aligned} \right\} (2)$$

Si l'on appelle F_p la fréquence propre commune des deux oscillateurs, soit

$$F_p = 2\pi (K_1 / I_1)^{1/2} = 2\pi (K_2 / I_2)^{1/2} \quad (3)$$

on tire des équations précédentes le système d'équations suivant:

$$\left. \begin{aligned} - A_1 F^2 + F p^2 (A_1 - A_2) &= 0 \\ - A_3 F^2 + F p^2 (A_3 - A_2) &= 0 \\ I_1 A_1 + I_2 A_2 + I_3 A_3 &= 0 \end{aligned} \right\} (4)$$

Ce système possède, entre autres, trois solutions particulières:

$$- \text{pour } F=0, \quad A_1=A_2=A_3 \quad (5)$$

$$- \text{pour } F=F_p, \quad A_2=0 \text{ et } A_1 I_1 + A_2 I_2 = 0 \quad (6)$$

$$- \text{pour } F=F_p \{1 + [(I_1 + I_3)/I_2]^{1/2}\} \quad (7)$$

$$A_1 = A_3 \text{ et } A_2 = A_1 [(I_2 + I_3)/I_2]$$

La relation (5) n'a pas d'intérêt puisqu'elle correspond à l'immobilité des deux résonateurs. Les relations (6) et (7) correspondent respectivement aux deux fréquences propres du système mécanique.

$F=F_p$, d'après (6), correspond au cas où la fréquence propre de l'ensemble est égale à la fréquence propre des deux résonateurs (considérés isolément) oscillant en opposition de phase. On voit que l'amplitude du résonateur auxiliaire demeure telle que la sollicitation qu'il exerce sur la portion de bâti annule à tout instant la sollicitation exercée par le résonateur principal. La portion de bâti est soumise à tout instant à des efforts et/ou à des couples rigoureusement antagonistes et demeure parfaitement immobile. Le régime oscillatoire du système est stable.

$F+F_p \{1 + [(I_1 + I_3)/I_2]^{1/2}\}$, d'après (7), correspond au cas où les deux résonateurs sont en phase, les sollicitations exercées par ceux-ci s'additionnent à tout instant et sont équilibrées par les réactions de la portion de bâti à laquelle sont imposés des déplacements importants dissipateurs d'énergie. Le coefficient d'amortissement et le facteur de résonance du système mécanique sont respectivement beaucoup plus grand et beaucoup plus faible que dans le cas précédent. Il s'agit donc d'un régime instable. Si le système est inséré dans une boucle électromécanique d'oscillation, il acquiert rapidement et conserve la fréquence $F=F_p$ qui correspond au régime stable et à l'immobilité quasi absolue de la portion de bâti.

Les calculs qui précèdent ont été conduits sans que l'on ait fait aucune hypothèse:

- sur le ou les degrés de liberté assignés au mouvement de l'organe optique et par conséquent aux résonateurs (rotation et/ou translation);
- sur le mode de déformation des moyens élastiques des résonateurs (flexion, torsion, etc...);
- sur la nature des moyens destinés à imprimer le mouvement vibratoire à l'organe optique (moyens piézo-électriques, électromagnétiques, etc...);
- sur celui des résonateurs sur lesquels agissent lesdits moyens et sur la région dudit résonateur à laquelle est appliquée l'excitation;
- sur la position relative des deux résonateurs entre eux et par rapport à la portion de bâti.

L'invention va être décrite en relation avec les figures suivantes:

- La figure 1a représente, en partie sous la forme d'une vue en perspective, en partie sous la forme d'un diagramme de blocs, un dispositif conforme à l'invention pour animer un miroir d'un mouvement rotatif d'oscillation;

- La figure 1b est une vue partielle d'une variante de réalisation de l'invention;

- La figure 2 est un schéma sommaire de la partie mécanique d'un dispositif conforme à l'invention et comportant un résonateur principal animé d'un mouvement de translation et un résonateur auxiliaire selon la figure 1a;

- La figure 3 représente schématiquement une application de l'invention à un système de pointage optique d'un faisceau laser.

5 Quel que soit le résonateur sur lequel agissent directement les moyens d'excitation, on appellera résonateur principal celui qui supporte l'organe optique à faire vibrer.

On considère d'abord la figure 1a. Le miroir 1 est fixé par deux côtés opposés à deux barres de torsion 2 qui se terminent respectivement par deux supports de barres 21. En fait, la fixation s'opère l'intermédiaire d'une armature liée aux barres de torsion et non représentée, sur laquelle le miroir est collé. Le miroir 1, les barres de torsion 2 et les supports de barres 21 constituent le résonateur principal. Chaque support de barre 21 est fixé à une portion 6 du bâti de l'appareil par l'intermédiaire d'un excitateur de vibrations constitué par deux empilements 3 de disques piézo-électriques et d'embase 4 fixées à la portion 6 du bâti. Les axes des deux empilements 3 interposés entre chaque support 21 et l'embase 4 correspondante sont parallèles entre eux et disposés de part et d'autre de l'axe géométrique de la barre de torsion 2 correspondante dans un plan perpendiculaire audit axe. Les deux empilements piézo-électriques 3 d'un même excitateur sont alimentés par des courants alternatifs à la fréquence propre du résonateur principal et en opposition de phase au moyen d'une chaîne de commande électronique. Les deux excitateurs sont évidemment alimentés en phase. En vue de rendre le système insensible aux variations de température, cette chaîne est constituée essentiellement par un capteur de déplacement du miroir (ici un accéléromètre 7) fixé au miroir et par un amplificateur 81 dont l'entrée est connectée à la sortie du capteur 7 et dont la sortie alimente les excitateurs. Le système mécano-électrique ainsi constitué est auto-oscillant et s'accorde constamment sur la fréquence du résonateur principal. Une boucle de commande de gain est représentée par un amplificateur 82 dont l'entrée est, elle aussi, connectée au capteur 7 et dont la sortie est connectée à une entrée de commande de gain de l'amplificateur 81. Cette boucle agit sur le gain de l'amplificateur 81 pour que l'amplitude du signal du capteur 7 reste constante, de telle sorte que l'amplitude du mouvement de vibration du miroir 1 demeure elle-même constante.

Conformément à l'invention, un «résonateur mécanique auxiliaire» est lié à la portion 6 du bâti. Il est constitué par deux organes 5 à lames élastiques vibrantes respectivement fixés par leur embase 51 sur celle des faces de chaque embase 4 qui est opposée à la face supportant un excitateur 3. Chaque organe 5 comporte deux lames flexibles 52 qui s'étendent symétriquement de part et d'autre du plan axial commun du résonateur principal et des excitateurs 3. Les quatre lames 52, disposées dans un plan perpendiculaire audit plan axial, sont dimensionnées pour que leur fréquence de résonance soit égale à celle du résonateur principal. Leur ensemble équivaut à un pendule de torsion à grand coefficient de résonance et à très faible coefficient d'amortissement et ce pendule est entretenu en oscillation par un déplacement infime de la portion de bâti 6.

La figure 1b représente une variante de réalisation de l'invention qui diffère de la réalisation représentée figure 1a en ce que l'excitateur de vibrations, constitué par les deux empilements 3 de disque piézo-électriques, est inséré entre le résonateur auxiliaire 53 et la portion du bâti 6 au lieu de l'être entre le résonateur principal et ladite portion de bâti. L'excitateur 3 excite donc indirectement le résonateur principal et directement le résonateur auxiliaire.

Le dispositif de l'invention, tel qu'il vient d'être décrit en référence à la figure 1a, a été utilisé sur un spectromètre à

grille fixe et à miroir vibrant destiné à être embarqué sur un satellite. Le miroir 1, collé dans une monture en invar, mesure 100×100×30 mm. Les deux barres de torsion 2, dont le diamètre est de 9,3 mm et la longueur de 10 mm, sont en acier Z 30 C 13. Chacun des deux empilements 3 de chaque excite-
5 teur est constitué par un empilement de cinq disques en céramique piézo-électrique (dont l'épaisseur est de 2 mm et le diamètre de 14 mm) et est alimenté par une tension efficace de 1,16 V. Les deux lames flexibles 52 de chacun des deux éléments du résonateur auxiliaire 5, en acier Z 30 C 13, ont une
10 longueur de 63 mm et une section de 2,3×15 mm. La fréquence de résonance du système est de 504 Hz, l'amplitude angulaire des oscillations du miroir est de 6,25 secondes d'arc et le facteur de résonance $Q=560$. Ce dernier demeure stable quelle que soit la nature du bâti associé. Si l'on supprime le
15 résonateur auxiliaire 5, on constate que, selon les caractéristiques mécaniques et géométriques du bâti associé (module d'élasticité du matériau, formes et dimensions) la fréquence de résonance varie dans les limites comprises entre 508 et 520 Hz et le facteur de résonance Q entre 7,5 et 150. Ces résultats confirment amplement les avantages de l'invention.

La figure 2 a pour objet de montrer qu'un résonateur auxiliaire à lames vibrantes tel que celui de la figure 1a ou 1b peut être utilisé en conjonction avec un résonateur principal animant un organe optique en translation au lieu de l'animer en

rotation. Le résonateur principal R5 (inertie M5, raideur R5), qui supporte l'organe O5 est excité par l'excitateur E5. Le résonateur auxiliaire R'5, fixé par son embase centrale C5 sur la face du bâti B opposée à celle qui supporte le résonateur R5, comporte des lames élastiques L5 qui vibrent toutes en opposition de phase avec la masse M5.

La figure 3 montre un dispositif conforme à l'invention pour le pointage optique d'un faisceau laser vers une cible. Ce dispositif comporte un miroir plan 100 et un dispositif de
10 commande de vibrations du miroir qui comprend deux couples 111-112 et 113-114 d'empilements de disques piézo-électriques fixés sur le résonateur auxiliaire 120 lié au bâti 130. Les couples 111-112 et 113-114 sont alimentés au moyen de deux générateurs électriques de signaux alternatifs, non
15 représentés, à des fréquences correspondant à la fréquence de résonance selon les deux axes de rotation OX et OY du résonateur principal. Celui-ci est constitué par le miroir 100 lié directement aux empilements 111, 112, 113, 114; le rappel élastique du miroir selon les deux axes OX et OY s'effectue
20 grâce à la raideur des empilements de disques piézo-électriques. Le résonateur auxiliaire comporte deux couples orthogonaux alignés sur les axes OX et OY de lames flexibles 52 et 53 qui sont encastrées dans une base cruciforme 121 et dimensionnées pour entrer en résonance sous l'effet des
25 vibrations engendrées par le résonateur principal.

FIG.1A

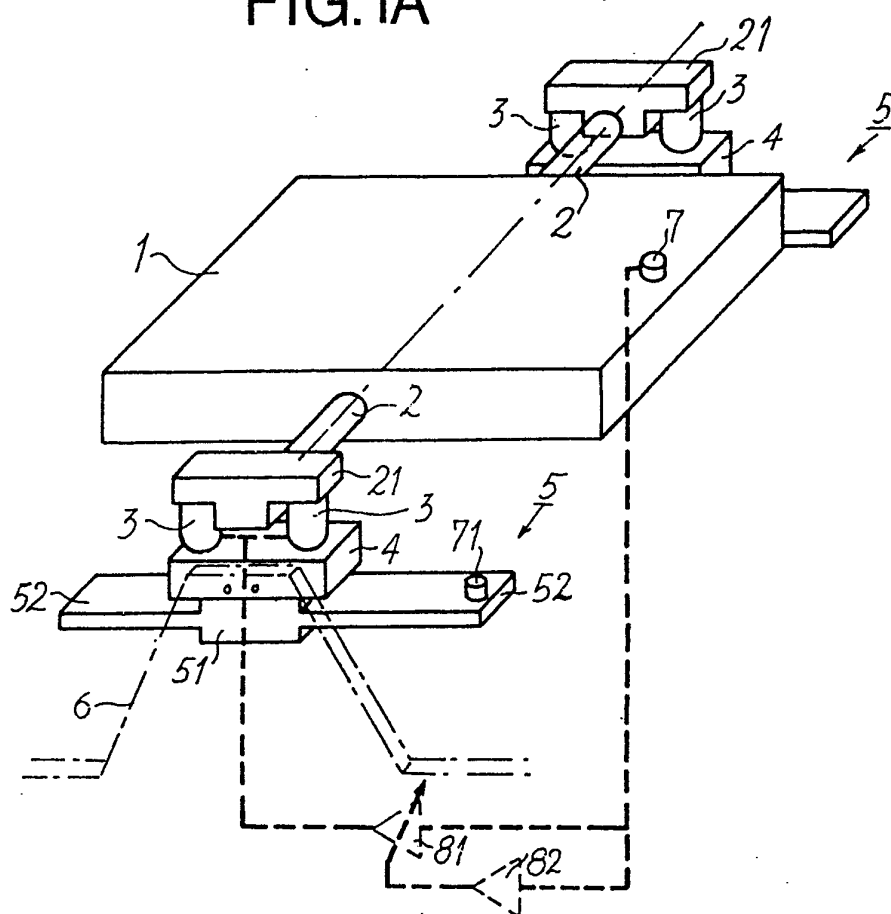
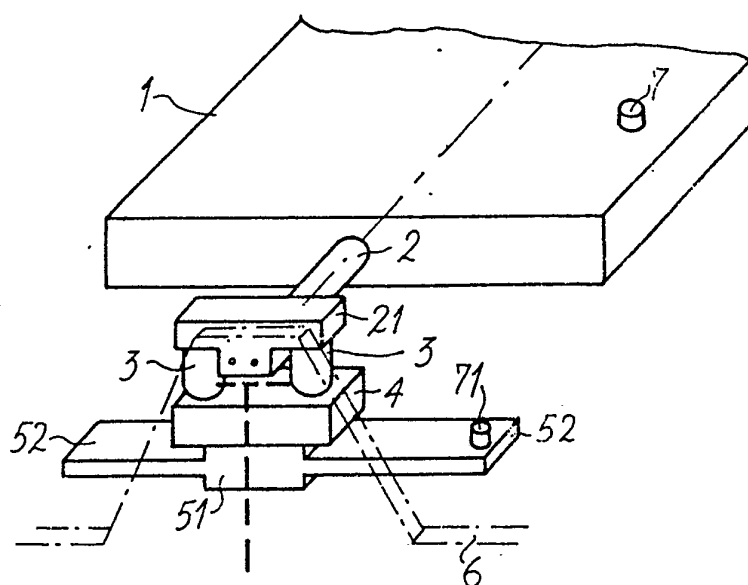


FIG.1B



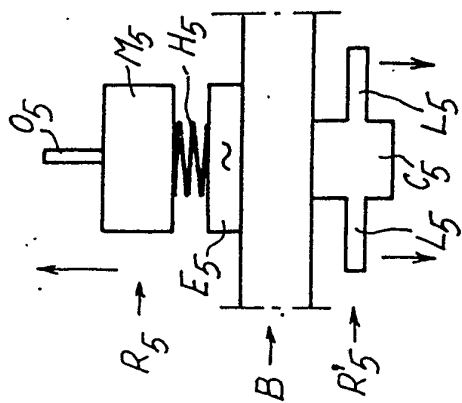


FIG. 2

FIG. 3

