

12 **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

21 Numéro de dépôt: 86400354.6

51 Int. Cl.⁴: **G 10 K 11/30**

22 Date de dépôt: 19.02.86

30 Priorité: 28.02.85 FR 8502977

72 Inventeur: Nongaillard, Bertrand
5, rue Blanqui
F-59135 Wallers(FR)

43 Date de publication de la demande:
03.09.86 Bulletin 86/36

72 Inventeur: Rouvaen, Jean-Michel
45, rue du Jolimetz
F-59300 Valenciennes(FR)

84 Etats contractants désignés:
AT BE CH DE FR GB IT LI LU NL SE

72 Inventeur: Logette, Patrice
13, rue de Valmy
F-59000 Lille(FR)

71 Demandeur: CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (CNRS)
15, Quai Anatole France
F-75007 Paris(FR)

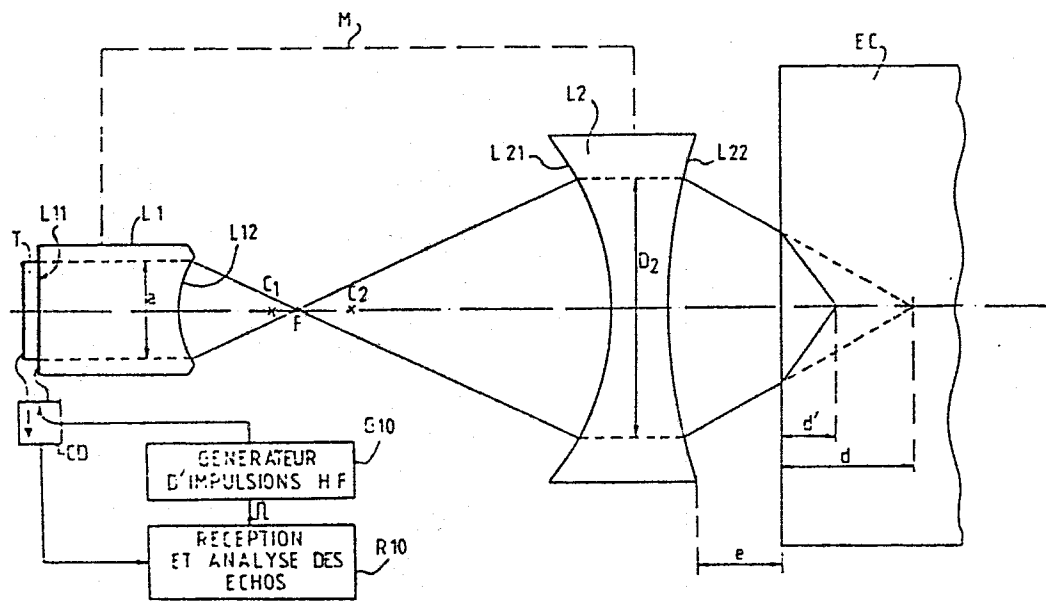
72 Inventeur: Thomin, Guy
101, rue Jean-Jaurès Aulnoy
F-59300 Valenciennes(FR)

74 Mandataire: Plaçais, Jean-Yves et al,
Cabinet Netter 40, rue Vignon
F-75009 Paris(FR)

64 Dispositif acoustique multi-lentilles à grandissement et focale variables.

57 Un transducteur d'ultrasons (T) est monté sur la face plane (L11) d'un barreau de corindon qui présente à son autre extrémité un dioptre concave (L12). Celui-ci coopère, au voisinage de la position confocale dans un premier milieu conducteur d'ultrasons, avec un premier dioptre concave (L21) d'une autre lentille (L2) dont le dioptre de sortie (L22), également concave, est couplé à l'échantillon par un second milieu conducteur d'ultrasons. En faisant varier les positions relatives des deux lentilles, on peut analyser l'échantillon dans tout son volume, en obtenant des images.

FIG. 3



ANVAR Aff. 17

1

Dispositif acoustique multi-lentilles à grandissement
et focale variables.

L'invention concerne la microscopie acoustique.

La microscopie acoustique offre certains avantages par rapport à la microscopie optique traditionnelle. Tout
5 d'abord, elle permet d'explorer non seulement la surface d'un corps, mais aussi les zones proches de la surface, non visibles dès lors que le corps est opaque. De plus, pour les corps transparents, elle permet de faire apparaître des contrastes acoustiques,
10 là où l'optique ne donne que peu d'informations.

Ainsi, à une fréquence acoustique de l'ordre du gigahertz, on obtient une résolution spatiale acoustique comparable à celle de l'optique, et qui ouvre des horizons nouveaux, notamment en biologie.
15

A des fréquences un peu plus basses, de l'ordre de la centaine de mégahertz, la microscopie acoustique est susceptible de procurer un moyen de contrôle non des-

destructif des matériaux dans leur volume. Mais cette voie est encore peu explorée à l'heure actuelle.

5 Il convient de rappeler tout d'abord que, si l'on cherche en acoustique à raisonner comme en optique, il existe néanmoins des différences entre ces deux disciplines.

10 En optique traditionnelle, le mot "lentille" est associé à une forme en ménisque. Il en est différemment en acoustique, où la fonction "lentille" est réalisée par un dioptré, c'est-à-dire par l'interface entre un solide et un milieu de couplage. On conservera néanmoins le mot "lentille", comme il est d'usage, pour définir le corps solide qui porte un ou plusieurs dioptrés de ce type.

15

Par ailleurs, il est habituel dans les raisonnements d'optique, de travailler sur des indices de réfraction supérieurs à l'unité. On appellera donc ici "indice du dioptré" l'indice relatif du milieu de couplage par rapport au solide, et 20 cet indice est défini par le rapport de la vitesse des ondes acoustiques dans le solide à celle dans le milieu de couplage.

25 Il a été indiqué précédemment que l'usage de la microscopie acoustique à des fins de contrôle non destructif des matériaux dans leur volume est peu répandu à l'heure actuelle. Il existe en effet un préjugé, suivant lequel le franchissement du dioptré constitué par le milieu de couplage acoustique et l'échantillon à examiner crée sur le faisceau acoustique des aberrations qui l'empêchent d'atteindre une résolution 30 satisfaisante.

Le Demandeur a observé qu'en fait les "rayons" très inclinés, qui créeraient cette aberration, sont fortement atténués

à la traversée de l'interface milieu de couplage/échantillon. Il est alors possible de réduire lesdites aberrations, pourvu que les aberrations dues aux lentilles elles-mêmes ne soient pas prédominantes. Ce facteur, et d'autres considérations développées plus loin, conduisent à préférer des
5 lentilles d'indice élevé, notamment supérieur à 4.

Il a été proposé dans la Demande de Brevet français n° 84 01597 du 2 Février 1984, non encore publiée, de
10 faire usage d'une sonde électro-acoustique focalisée, opérant autour de 100 mégahertz.

Cette Demande de Brevet antérieure a mis en lumière une autre difficulté : lorsque l'on observe un échantillon
15 à l'aide d'un faisceau acoustique focalisé (pour avoir une bonne résolution), le temps d'examen devient rapidement prohibitif si le volume de l'échantillon est important.

Le Demandeur a constaté que, pour réaliser une image ou
20 une détection dans tout le volume d'un échantillon, il est nécessaire d'utiliser plusieurs lentilles dont les profondeurs de champ permettent de couvrir la totalité de l'épaisseur de l'échantillon. Il faudrait par exemple plus de dix lentilles pour contrôler un échantillon de céramique
25 d'épaisseur 10 millimètres avec une résolution uniforme.

Une autre difficulté intervient alors : la profondeur de champ et la résolution obtenues dans le matériau de l'échantillon dépendent de l'angle d'ouverture que présente le faisceau focalisé dans
30 le milieu de couplage. Mais cet angle d'ouverture est à son tour en relation avec la taille du transducteur utilisé, et par conséquent avec l'impédance électrique de celui-ci. Or, il est souhaitable que cette impédance électrique ait une valeur nominale de 50 ohms, qui est l'impédance interne
35 du générateur d'excitation. Il faut donc disposer d'un degré de liberté supplémentaire pour pouvoir rendre compatible la profondeur de champ et la résolution désirées avec cette impédance électrique de 50 ohms.

La présente invention apporte une solution à ces problèmes, solution qui consiste essentiellement en un dispositif acoustique à plusieurs lentilles, formant sonde capable de grandissement et de focale variables.

5

Par le Brevet français publié sous le n° 2 241 228, on connaît une "lentille acoustique complexe" comprenant une monture qui loge coaxialement au moins deux lentilles acoustiques, et qui contient un milieu de couplage acoustique dans l'intervalle séparant ces deux lentilles.

10

La présente invention fait appel à un appareil possédant une certaine parenté avec cette lentille complexe antérieure, étant observé qu'elle s'en sert dans un contexte tout à fait différent.

15

Tout d'abord, le Brevet antérieur préconise l'usage de lentilles en polystyrène, et d'un milieu de remplissage choisi parmi les fréons, les huiles de silicone, et les hydrocarbures fluorés. Ces choix sont fondés sur la recherche d'une vitesse de propagation acoustique élevée, pour une fréquence de quelques mégahertz. A l'extérieur des lentilles au moins, le brevet antérieur utilise le milieu de couplage le plus classique, à savoir l'eau, mais des lentilles constituées des matériaux précités ne possèdent pas un indice relatif élevé par rapport à l'eau.

20

25

A côté de cela, le dispositif décrit dans le Brevet français antérieur n° 2 241 228 n'est pas utilisable à des fréquences de l'ordre de 50 MHz ou plus. De surcroît, il a pour but de traiter simultanément tous les points d'une image, ce qui est très défavorable en termes de rapport signal/bruit. Enfin, il ne peut travailler à grande ouverture, ce qui compromet sa résolution.

35

La présente invention fait appel à un dispositif acoustique à plusieurs lentilles possédant la structure générale définie ci-dessus, mais dans lequel la fréquence acoustique peut être rendue plus haute, et surtout les dioptries
5 présentent un indice relatif élevé, le milieu de couplage étant tel que l'eau. De plus, le dispositif est propre à des applications d'imagerie par balayage, à haute résolution, et en particulier il convient en microscopie acoustique.

10

Selon un premier aspect de la présente invention, une première lentille, constituée d'un dioptre concave, creusé à l'extrémité d'un barreau d'un matériau solide tel que le corindon, dont l'autre extrémité est munie d'un transduc-
15 teur acoustique constitué d'un matériau piézo-électrique, focalise le rayonnement du transducteur. Ce rayonnement est alors constitué d'une onde acoustique plane se propageant dans le matériau de la lentille. La seconde lentille est composée d'un dioptre concave interne (c'est-à-dire
20 faisant face à l'autre lentille) dont le foyer objet est voisin du foyer image du dioptre concave de la première lentille, et d'un dioptre concave externe propre à être couplé à l'échantillon. Enfin, la monture est agencée pour permettre un déplacement axial relatif des deux lentilles,
25 continûment réglable sur une plage prédéterminée. On obtient ainsi une sonde acoustique à focale et grandissement variables.

Les lentilles sont faites en un matériau, de préférence
30 monocristallin, qui possède un fort indice relatif. Le matériau actuellement préféré est le corindon.

D'autres types de matériaux peuvent également convenir,
35 comme la silice, et les céramiques frittées telles que l'alumine ou le carbure de silicium.

Très avantageusement, ladite plage prédéterminée de réglage comprend la position confocale des deux dioptries internes.

5 Les dioptries concaves peuvent être des dioptries sphériques ou cylindriques.

Selon un autre aspect de l'invention, le milieu de couplage prévu entre les deux lentilles est, de préférence, le mercure ou le gallium liquide.

10

Il est alors avantageux de prévoir, entre les deux parties en mouvement relatif de la monture, une fuite contrôlée vers un réservoir du milieu de couplage.

15

Il est également avantageux, du moins lorsque le milieu de couplage est le mercure, que les dioptries internes, et de préférence les faces internes de la monture, soient revêtus d'une couche d'or avec une sous-couche d'accrochage (Chrome ou Titane par exemple).

20

De son côté, le dioptrie externe de la seconde lentille est avantageusement muni d'une couche quart d'onde, de préférence en verre, pour former adaptation avec le milieu de couplage externe (à l'égard de l'échantillon) si ce milieu
25 de couplage est l'eau.

Selon un autre aspect de l'invention, le transducteur, qui est en particulier un transducteur en niobate de lithium, a une surface active telle qu'il possède une résistance
30 de radiation d'environ 50 ohms, et les caractéristiques des lentilles sont choisies pour obtenir l'ouverture de faisceau désirée en respectant cette résistance de radiation. Bien que la présente invention considère essentiellement l'usage de deux lentilles, il va de soi que l'on pourra
35 prévoir un nombre de lentilles plus élevé, au moins pour certaines applications.

Dans une première famille d'applications, la combinaison des deux lentilles (ou plus) procure un agrandissement du faisceau acoustique.

5 Dans une autre famille d'applications, la combinaison des deux lentilles (ou plus) procure une réduction du faisceau acoustique.

10 Selon un autre aspect de l'invention, le transducteur, qui est excité en impulsions, est choisi d'un type propre à délivrer une onde acoustique de fréquence comprise entre quelques dizaines de mégahertz et un gigahertz.

15 Plus particulièrement encore, le dispositif est agencé pour délivrer dans le milieu de couplage externe un faisceau acoustique dont l'ouverture peut être rendue optimale par rapport à l'angle de réflexion totale sur l'échantillon.

20 Le dispositif de l'invention s'applique en particulier à l'examen, en volume, d'échantillons céramiques ou métalliques.

25 D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à l'examen de la description détaillée ci-après, et des dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 illustre schématiquement une sonde acoustique classique,
- 30 - la figure 2 illustre schématiquement le couplage de la sonde de la figure 1 à un échantillon,
- la figure 3 est le schéma de principe d'un dispositif selon l'invention, dans une première position relative
35 des deux lentilles qu'il contient,
- la figure 4 est le schéma du même dispositif dans une deuxième position relative des deux lentilles,

- la figure 5 est un schéma du montage de la seconde lentille sur un tube,
 - les figures 6 et 7 sont deux variantes de réalisation
5 d'un dispositif à deux lentilles selon l'invention,
 - la figure 8 est le schéma détaillé, en coupe, d'un mode de réalisation particulier de l'invention, tandis que les figures 8A et 8B sont des vues en demi-coupe de parties
10 de la figure 8, et
 - les figures 9 à 11 sont des diagrammes servant à expliquer le fonctionnement du dispositif de l'invention.
- 15 Il a déjà été fait référence au Brevet français n° 73 30024, publié sous le n° 2 241 228. Tout en visant spécifiquement l'examen d'organismes vivants, et l'imagerie ultrasonore associée, ce brevet antérieur paraît concerner plus généralement de nombreuses autres applications de la formation
20 d'images et de la concentration d'ondes acoustiques. Il est à noter encore que ce brevet antérieur permet la formation d'images relatives à des objets macroscopiques.

25 Les premières propositions de microscopie acoustique ont été formulées dans les brevets Etats-Unis n° 4 012 950 et 4 028 933.

30 Ces brevets font usage d'une source d'ultrasons correspondant au schéma de la figure 1. Un transducteur ultrasonore T est collé sur la face arrière plane L11 d'un barreau cylindrique L1 dont la face avant est usinée pour former un dioptre L12, sphérique ou cylindrique, et centré en C1.

35 Il en résulte une focalisation de l'onde acoustique plane émise par le transducteur à l'intérieur du barreau L1, en un foyer F1. La distance focale image, comptée à partir du sommet du dioptre, est donnée par la relation :

$$f = n.R/(n-1)$$

où R est le rayon de courbure du dioptre L12, tandis que n est l'indice relatif du dioptre que porte la lentille L1, cette formule, et celles qui suivent, correspondent à une approximation du même type que l'approximation d'optique géométrique paraxiale.

Dans les brevets Etats-Unis cités, une coupe mince de l'échantillon à examiner est placée transversalement au niveau du foyer F1, dans un milieu de couplage acoustique avec la lentille L1. Un dispositif récepteur, symétrique du précédent par rapport au point F1, est placé de l'autre côté, afin de détecter les ondes acoustiques transmises à travers l'échantillon.

Et l'excitation du transducteur T se fait en principe en ondes continues.

Ces Brevets décrivent également des variantes où l'on opère en réflexion.

La présente Demande de Brevet peut s'appliquer aussi à l'examen de coupes minces d'échantillons, mais elle vise préférentiellement le contrôle non destructif d'échantillons plus épais, plus exactement le contrôle non destructif à haute résolution de matériaux dans leur volume. Cette application intéresse notamment les métaux et les céramiques. La suite de la description s'attachera essentiellement à l'examen de matériaux céramiques, qui mettent mieux en lumière les avantages de l'invention, car la faible ténacité des matériaux céramiques donne, dans des conditions de sollicitation identiques, des tailles de défaut critiques environ cent fois plus faibles que dans les métaux (typiquement environ 0,1mm).

Dans la suite de la description, on admet aussi que les lentilles sont en corindon, sauf mention contraire. Le milieu de couplage entre les lentilles est le mercure,

tandis que le milieu de couplage avec l'échantillon est le mercure ou l'eau, étant observé que ces deux matériaux possèdent des vitesses de propagation acoustiques voisines.

Il est encore rappelé que le milieu de couplage, tel que
5 le mercure ou l'eau, possède un indice élevé, à savoir environ 7,3, par rapport au corindon.

Si l'on revient maintenant à la figure 1, il a été observé que le dispositif illustré donne une tache focale pratiquement exempte d'aberrations de sphéricité, et dont le diamètre à -6dB est donné par la relation suivante :

$$d = k \frac{\lambda \cdot f}{a}$$

15 où k est une constante voisine de 1, et liée à la forme de la pupille et à son éclairement,

λ est la longueur d'onde dans le milieu de focalisation.

20 f est la distance focale image du dioptre déjà défini;

et a est le diamètre de la pupille avec $a = 2.R.\sin \theta_m$
où θ_m est l'ouverture angulaire du dioptre.

25 On sait qu'en optique lumineuse, la profondeur de champ est définie comme la distance sur laquelle la tache focale reste de même largeur, c'est-à-dire véritablement la zone où le faisceau lumineux reste parallèle.

30 Le Demandeur a observé qu'en acoustique, la profondeur de champ doit être définie différemment, car, en contrôlant la structure d'un matériau, on s'intéresse essentiellement au fait que l'on va savoir ou non détecter l'écho. Même si l'écho est dû à un élément de structure sur lequel

il n'est pas focalisé, l'important est d'avoir pu détecter
correctement cet élément. Il apparaît donc préférable de se
référer à une profondeur d'efficacité acoustique, définie
d'après la diminution de l'amplitude du champ créé par la
5 lentille.

A partir de là, le Demandeur a pu observer que la profon-
deur d'efficacité $2p$ est donnée, pour une diminution de
l'amplitude du champ acoustique de 6 dB par la formule :

$$10 \quad 2p = k' \frac{8 \cdot \lambda \cdot f^2}{a^2}$$

où k' est une constante de forme voisine de 1.

15 Comparativement, en optique, la profondeur de champ eût
été donnée par la formule $2\lambda f^2/a^2$.

Il convient encore de souligner que cette évaluation de
la profondeur d'efficacité de la lentille correspond
20 à une zone de milieu de propagation pouvant donner des échos
acoustiques pour une géométrie de lentille fixée. En dehors
de cette zone, les conditions de mise en phase des échos,
au niveau de la lentille, n'étant plus suffisamment respec-
25 tées, la détection de défaut dans le milieu analysé sera
difficile (on n'observe des échos que dans certains cas),
voire même impossible.

La profondeur d'efficacité ainsi obtenue est bien entendu
30 limitée. Pour réaliser une image ou une détection dans tout
le volume d'un échantillon, il apparaît donc nécessaire d'u-
tiliser plusieurs lentilles dont les profondeurs d'effica-
cité respectives permettent de couvrir la totalité de l'é-
paisseur de l'échantillon. On peut ainsi établir qu'il fau-
35 drait plus de dix lentilles pour contrôler un échantillon
de céramique sur une épaisseur de dix millimètres en conser-
vant la même résolution quelle que soit la profondeur d'in-
vestigation.

En effet, l'angle de réflexion totale sur la céramique est d'environ 7° , dans les conditions fixées. Pour avoir un diamètre de tache focale mesurant environ une longueur d'onde à mi-hauteur, il est nécessaire de prendre une ouverture de lentille d'environ 5° . Cette ouverture donne, dans les céramiques, une profondeur d'efficacité à mi-hauteur qui est d'environ neuf à dix longueurs d'onde.

Il est maintenant fait référence à la figure 2, où l'on note a_i l'ouverture du faisceau à l'entrée dans le matériau constitutif de l'échantillon EC. d est la profondeur équivalente que parcourrait l'onde à partir de l'interface entre le milieu de couplage MC1 et l'échantillon EC, en l'absence de l'échantillon, tandis que θ_m est l'angle d'ouverture qui reste alors le même que précédemment. d' est la distance que va parcourir effectivement l'onde compte tenu de la présence de l'échantillon EC, tandis que θ_i est l'angle d'ouverture modifié du fait de la réfraction. Enfin n_m est l'indice relatif de l'eau par rapport au matériau de l'échantillon EC.

On peut écrire en première approximation :

$$\text{tg } \theta_i \approx a_i \cdot n_m / 2d$$

$$\text{tg } \theta_m \approx a_i / 2d$$

$$\text{tg } \theta_i \approx n_m \cdot \text{tg } \theta_m$$

Il en résulte qu'à l'angle d'ouverture initial $\theta_m = 5^\circ$ correspond l'angle d'ouverture modifié $\theta_i = 32^\circ$ dans le matériau, ce qui amène $2p = 9,7 \lambda_m$, où λ_m est la longueur d'onde acoustique dans la céramique à la fréquence de 100 mégahertz, soit environ 0,1 millimètre. Ceci donne bien une profondeur de champ d'environ 1 mm pour chaque lentille, d'où la nécessité d'avoir une dizaine de lentilles pour couvrir la totalité de l'épaisseur d'un échantillon de 10mm.

Au foyer, la résolution est alors donnée à 6dB par

$$r = k \lambda . d' / a$$

- 5 où d' est la distance de focalisation dans le matériau.
Dans le milieu de couplage, qui est par exemple de l'eau, on observe que la résolution est de l'ordre de 6 à 7 longueurs d'onde (longueurs d'onde acoustiques dans l'eau).
- 10 Dans le matériau de l'échantillon, on observe, pour un faisceau dont l'ouverture est de 5° à l'intérieur du milieu de couplage, une résolution dans le matériau même de l'échantillon qui est de l'ordre de la longueur d'onde de propagation dans le matériau.

15

Il va de soi que cette nécessité d'utiliser un grand nombre de lentilles pose un problème majeur à l'homme de l'art.

- La Demande de Brevet français n° 84 01597, non encore publiée,
20 a proposé une première solution consistant à usiner plusieurs dioptries à la sortie d'un barreau tel que celui de la figure 1. Bien que cette solution permette certains progrès, elle n'est pas sans poser aussi des problèmes, notamment de réalisation et de mise en oeuvre, lorsque les dioptries doivent
25 avoir des rayons de courbure voisins.

La présente invention offre une autre solution, dont le schéma de principe est illustré sur la figure 3.

- 30 Un générateur d'impulsions haute fréquence G10 est relié par un coupleur directif CD aux deux électrodes d'un transducteur ultrasonore T. Les échos reçus par ce transducteur sont transmis par le coupleur CD à un circuit de réception et d'analyse des échos noté R10.

35

Pour le reste, ce dispositif possède en commun avec celui de la figure 1 le fait qu'une lentille L1 est formée d'un

barreau cylindrique dont la face antérieure L11, plane, reçoit le transducteur d'ultrasons T. Sa face postérieure L12 est usinée comme un dioptre sphérique ou cylindrique centré en C1. Le point de focalisation image associé à ce dioptre L12 est en F sur la figure 3.

Mais au lieu d'être appliqué directement à l'échantillon, le rayonnement acoustique issu de cette première lentille L1 est appliqué à une seconde lentille L2, qui est ici une lentille biconcave, formée de deux dioptres sphériques ou cylindriques, L21 du côté intérieur, et L22 du côté extérieur, tourné vers l'échantillon EC.

Le dioptre interne L21, centré en C2, est positionné ici de façon que son point focal objet soit le point focal image F du dioptre interne L12. La lentille acoustique L2 est alors traversée par un faisceau acoustique parallèle, en d'autres termes une ondeplane, qui transite dans le matériau constitutif de la lentille L2, à savoir du corindon.

La combinaison des lentilles L1 et L2 permet d'obtenir une focalisation à distance variable.

On observera tout d'abord que le dioptre interne L12 de la première lentille L1, associé au dioptre interne L21 de la seconde lentille L2, constitue un système élargisseur de faisceau dans l'application présentée, qui est l'inspection acoustique d'un échantillon de matériau céramique. Il peut être également utilisé en réducteur de faisceau en d'autres applications comme la mesure d'épaisseur de revêtements (peintures).

Par ce moyen consistant à élargir ou diminuer la taille du faisceau acoustique sur la lentille L2, il devient possible de rendre compatibles les deux exigences suivantes :

- obtenir l'ouverture de faisceau désirée sur le dioptre de sortie L22 de la seconde lentille. En l'espèce, cette ouverture est $\theta_m = 5^\circ$ environ, ce qui, pour un rayon de courbure R3 donné du dioptre L22, impose :

5

$$D \cong 2.R_3.\sin\theta_m$$

- conserver une résistance de rayonnement du transducteur T qui soit proche de 50 ohms (impédance interne du générateur d'émission G10 de la figure 3), afin d'en faciliter l'adaptation d'impédance électrique.

10

On s'intéressera maintenant à la variation de focalisation que permet le dispositif de l'invention.

15

Lorsque les deux lentilles sont dans la position relative afocale, comme montré sur la figure 3, le faisceau acoustique est sensiblement parallèle à l'axe du système à l'intérieur de la lentille L2, et la profondeur de focalisation est donnée par :

20

$$d = \left(\frac{n R_3}{n-1} - e \right) \frac{1}{n_m}$$

où e est l'épaisseur du milieu de couplage, que l'on peut négliger en pratique. Par ailleurs, n désigne ici l'indice relatif de la lentille L2, n_m désigne l'indice du milieu de couplage relativement au matériau de l'échantillon examiné.

25

30

Avec l'approximation consistant à négliger l'épaisseur e du milieu de couplage, on obtient :

$$d \cong \frac{1}{n_m} \frac{n.R_3}{n-1}$$

35

Dans le cas où la lentille L2 est en corindon, et où l'échantillon est en céramique, on a $n_m \cong n \cong 7$, ce qui

donne une distance de focalisation à peu près égale à un sixième du rayon de courbure R_3 . En conséquence, pour une distance d'observation moyenne de 5 millimètres, il vient un rayon de courbure du dioptre de sortie L22 de
5 valeur $R_3 = 30$ millimètres.

Pour les raisons précédemment indiquées, il convient que l'ouverture du faisceau θ_m soit égale à 5° environ, afin d'obtenir dans le matériau une résolution voisine
10 de $\lambda_m = 0,1$ millimètre à 100 mégagertz dans la céramique.

Le diamètre du dioptre de sortie L22 est alors donné par la relation :

$$15 \quad D = 2.R_3 \sin\theta_m = 5,23 \text{ mm}$$

Un transducteur en niobate de lithium qui présenterait la forme de la figure 1, et qui devrait éclairer une pupille aussi grande, présenterait une résistance de rayonnement
20 d'environ 2 ohms. Par l'obtention d'un facteur d'expansion $\alpha = 5$, l'invention permet de réaliser ladite pupille, tout en conservant l'adaptation d'impédance électrique requise pour le transducteur, à la valeur habituelle de 50 ohms.

25 Il vient maintenant :

$$\alpha = D/a = R_2/R_1 = 5$$

où D et a sont les largeurs de faisceau dans les lentilles
30 L_1 et L_2 (figure 3).

Le rapport entre les rayons de courbure des dioptres L21 et L12 est donc égal à 5.

35 Mais l'optimisation de la géométrie du dispositif demande encore que l'on minimise la distance entre les lentilles

L1 et L2, afin de réduire dans toute la mesure du possible le temps de parcours des ondes acoustiques à l'intérieur du dispositif. En effet, en microscopie acoustique, comme en toute autre application d'imagerie, il faut conserver un nombre suffisant de points sur chaque ligne de l'image.

La création d'images à l'aide du dispositif selon l'invention peut se faire de la manière décrite dans la Demande de Brevet français n° 84 01597 déjà citée. Son contenu descriptif est à cet égard intégré à la présente demande de brevet. En bref, le balayage ligne est obtenu en faisant vibrer l'objet ou échantillon à examiner, à l'aide d'un montage du genre diapason. Le balayage d'image s'effectue à l'aide d'un déplacement micrométrique contrôlé (table motorisée) de l'échantillon.

Ainsi, il a été possible de faire fonctionner un dispositif selon l'invention avec une fréquence de balayage ligne de 80 hertz. Le nombre de points sur une ligne était fixé à 512. Cela implique une fréquence de répétition des impulsions ultrasonores au moins égale à 40 kHz, ce qui correspond à une période maximale de 25 microsecondes environ. Le temps de transit dans l'ensemble de la sonde de l'invention doit donc être bien inférieur à cette valeur. Ce temps de transit T_p s'écrit :

$$T_p = 2 \left[\frac{e_1 + e_2}{v_c} + \frac{1}{v_H} \left(\frac{n}{n-1} (R_1 + R_2) + \Delta \right) \right]$$

où e_1 et e_2 sont respectivement les épaisseurs des lentilles L1 et L2, v_c est la vitesse de propagation des ultrasons dans le corindon, les deux lentilles étant supposées réalisées en corindon dans cet exemple, Δ est l'écart que présentent les deux lentilles par rapport à la position focale, et v_H est la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans le milieu de couplage entre les lentilles L1 et L2.

Cette formule introduit une relation supplémentaire entre R_1 et R_2 . Ces valeurs se trouvent alors fixées, car, comme on le verra plus loin, l'épaisseur de la lentille de sortie est imposée par la variation de la distance de focalisation
5 qui est souhaitée en fonction de l'écartement Δ . Pour sa part, l'épaisseur de la lentille L1 est choisie de telle manière que les échos multiples donnent une périodicité égale ou supérieure à celle des échos multiples dans la lentille L2, d'où il résulte e_1 supérieur ou égal à e_2 .

10

Le corindon présente différents avantages dont celui d'offrir une atténuation acoustique excessivement faible. Il n'en résulte donc pas de contrainte sur les dimensions maximales à donner aux lentilles L1 et L2.
15 Et l'on peut même faire fonctionner celles-ci à des fréquences beaucoup plus élevées que 100 mégahertz. Par contre, de telles contraintes sur les dimensions pourront intervenir si l'on réalise la lentille de sortie L2 en silice ou en alumine frittée.

20

Le corindon présente encore la particularité d'être un matériau anisotrope, contrairement à la silice ou à l'alumine frittée, et il appartient au système cristallographique trigonal. On choisit de faire propager l'on-
25 de acoustique suivant l'axe Z du système trigonal, qui est un axe de mode pur. Pour la lentille émettrice L1, l'onde acoustique est pratiquement une onde plane.

Il a également été observé que, suivant son axe Z, le
30 corindon présente une coupe légèrement focalisante pour l'énergie, c'est-à-dire que la diffraction est moins importante que prévu, et que les performances sont un peu meilleures que ce qui est donné par les relations exposées plus haut.

35

La situation est un peu différente dans la lentille de sortie L2. En particulier, si celle-ci est égale-

ment réalisée en corindon, lorsque l'on fait varier la distance Δ entre les foyers des lentilles L1 et L2, le faisceau acoustique prend des inclinaisons importantes dans la lentille de sortie L2 par rapport à l'axe Z.

5 L'homme de l'art comprendra que l'angle entre le vecteur d'onde \vec{k} et la direction de l'énergie devient alors également important. Il en résulte que la longueur focale image globale F du dispositif, exprimée dans le milieu de couplage diffère un peu de celle que l'on peut prévoir
10 d'après la relation suivante :

$$f = \frac{n \cdot R_3}{n-1} \left[1 - \frac{R_3}{R_2 + R_3 - \frac{d(n-1) - n \cdot R_2}{(n-1) \cdot \Delta}} \right]$$

15 Dans cette relation, Δ est comme précédemment la distance entre le foyer du dioptré L12 de la lentille L1, et celui du dioptré L21 de la lentille L2; d est l'épaisseur de la lentille de sortie, R_2 est le rayon de courbure du dioptré L21, R_3 est le rayon de courbure du dioptré L22, et n est
20 l'indice de réfraction (supposé le même) associé aux dioptrés L12, L21 et L22.

La figure 4 illustre les mêmes lentilles L1 et L2 dans une position relative différente, où le foyer F1 du dioptré L12 est écarté du foyer F2 du dioptré L21. Il en
25 résulte la courbure précitée de la propagation des ondes dans le matériau de la lentille L2, et le fait que la focalisation dans l'échantillon EC s'effectue plus près de l'interface entre cet échantillon EC et le milieu de
30 couplage MC2 qui le relie à la lentille L2. Le trait tireté épais M schématise provisoirement la monture qui va relier les lentilles L1 et L2 pour permettre leur déplacement relatif, comme on le verra ci-après.

35 La figure 9 illustre la relation entre la distance de focalisation f , comptée à partir du sommet du dioptré L22 de la lentille L2 et l'écartement Δ entre les

foyers F1 et F2, cet écartement étant positif lorsque F2 est à la droite de F1. La figure 10 fait de même pour une lentille L2 en silice, étant observé que l'on a fixé dans les deux cas les rayons de courbure de L21 et L22 respectivement à $R_2 = 10$ mm et $R_3 = 30$ mm. Il apparaît que, dans les deux cas, on dispose d'une zone assez large dans laquelle la variation de la distance focale f en fonction de Δ est sensiblement linéaire. Si l'on examine plus particulièrement la figure 9, il apparaît qu'une lentille L2 d'épaisseur 5 mm permet d'obtenir la variation de focale voulue. En particulier, pour une variation de Δ qui va de +3 à -6 mm, la distance focale équivalente de la lentille dans l'eau varie de 0 (focalisation sur le dioptré de sortie L22) à 7 cm. Il correspond à cela une variation de la distance de focalisation dans un échantillon céramique qui va pratiquement de la surface de l'échantillon jusqu'à 10 mm en profondeur, ce qui résoud le problème posé.

20

Pour une utilisation satisfaisante du dispositif, il est nécessaire de minimiser les pertes à l'intérieur de la sonde, tout en conservant l'indice de la lentille équivalent, afin de conserver aussi une tache focale dont les dimensions sont proches de la longueur d'onde dans le matériau, pour minimiser les aberrations. Il a été observé que cette condition peut être remplie en utilisant comme milieu de couplage MC1 du mercure ou encore du gallium. Le mercure est particulièrement intéressant, en ce qu'il constitue un liquide dont la vitesse de propagation est pratiquement égale à celle de l'eau, alors que son impédance acoustique est élevée. Il en résulte une diminution considérable des pertes à la transmission dans chaque interface entre le milieu de couplage et la lentille.

35

Par exemple, si on utilise des lentilles en corindon couplées avec de l'eau, les pertes à chaque franchissement de dioptre sont de 9 dB environ. Avec du mercure, elles se réduisent à moins de 1 dB. (Si l'on passe à des
5 lentilles en silice, ces pertes seraient respectivement de 4,5 dB et 0,2 dB). La meilleure transmission qui résulte de ce choix du milieu de couplage s'accompagne également d'une diminution importante de l'amplitude des échos multiples dans la sonde.

10

Enfin, le mercure présente également l'avantage d'atténuer très peu les ondes acoustiques, ce qui autorise de grandes variations du paramètre Δ sans qu'il s'ensuive une modification notable des pertes dans la sonde.
15 de. En particulier, pour la variation précitée de +3 à -6 mm, les pertes dans la sonde ne varieraient que de 4,5 dB environ.

Il est donc important d'utiliser comme milieu de
20 couplage MC1 entre la lentille L1 et la lentille L2 un milieu liquide, de faible vitesse de propagation, de grande impédance acoustique, et présentant une faible atténuation aux ondes acoustiques. Il a été observé
25 que le mercure et éventuellement le gallium satisfont ces conditions.

EXEMPLE DE REALISATION PARTICULIER

30 Les dioptres L21 et L22 sont sphériques ou cylindriques, et de centre situé sur l'axe de la sonde Z. Alors que le centrage du dioptre L22 n'est pas excessivement critique, il est apparu que toute imprécision sur la position du centre de courbure du dioptre L21 entraîne
35 des pertes très importantes. En effet, travaillant à 100 mégahertz, la lentille concentre dans le mercure

l'énergie acoustique sur une tache focale de moins de 50 micromètres, qu'il faut recueillir à une distance $n R_2/(n-1)$ à l'aide de la lentille L2 (avec typiquement $R_2 = 5$ à 10 mm). On prend par exemple $R_1 = 1$ mm.

5

Comme le montre la figure 5, la lentille L2 possédant un dioptré L21 de rayon $R_2 = 10$ mm et un dioptré L22 de rayon $R_3 = 30$ mm est placée dans une partie de monture M22 qui est un tube cylindrique d'acier inoxydable par exemple, de telle manière que les axes des dioptrés L22 et surtout L21 soient confondus avec l'axe Z de la monture.

15 A l'aide d'une couche quart d'onde en verre déposée par évaporation, la lentille L22 est adaptée mécaniquement au milieu de couplage avec l'échantillon, qui est de l'eau. Cette couche quart d'onde réalise une fonction anti-reflet. Elle n'est pas nécessaire avec du mercure.

20 Le dioptré L21 est recouvert d'une couche de quelques centaines de nanomètres d'un alliage chrome-or, qui facilite le mouillage du mercure sur sa surface par formation d'un amalgame. On fait de même pour la face intérieure de la monture M22, ainsi que de la monture M21
25 (figure 6) qui coopère avec elle, et le dioptré intérieur L12 de la lentille L1.

La lentille L1, pour sa part, peut être du type des lentilles classiques utilisées en microscopie acoustique. Un barreau de corindon est muni à l'une de ses extrémités d'un transducteur piézo-électrique, par exemple en niobate de lithium, muni d'armatures convenables, et propre à engendrer une onde plane longitudinale à l'intérieur du barreau. A l'autre extrémité, on
35 usine un dioptré L12 qui est poli, et rigoureusement

centré sur l'axe du barreau de corindon. Le dioptre 12 est également bien centré sur sa monture M21, qui se déplace autour de la monture M22 dans le mode de réalisation de la figure 6.

5

On peut bien entendu concevoir un mode de réalisation inverse, comme illustré sur la figure 7, dans lequel la monture M32 associée à la lentille L2 est extérieure et sert à guider la monture M31 associée à la lentille L1.

10

En pratique, on usine d'abord le dioptre L12, de façon qu'il soit centré sur l'axe du cylindre de corindon L1. On évapore l'électrode sur la face L11 du barreau de corindon. On place le transducteur sur cette électrode. On évapore alors une contre-électrode sur le transducteur T, en prenant soin que cette contre-électrode soit bien centrée sur l'axe du cylindre de corindon. Le barreau de corindon est ensuite placé dans la monture M21 ou M31 de façon que l'axe de celle-ci soit confondu avec celui de la monture coopérante M22 ou M32 suivant le cas.

15

20

Une variante de réalisation consiste à usiner la lentille L1 une fois montée dans sa monture M31, et à faire de même pour l'évaporation de la contre-électrode.

25

Les expérimentations menées ont montré qu'il n'est pas souhaitable d'utiliser une lentille L1 de grande ouverture, car son faible rayon de courbure rend alors difficile et dans certains cas aléatoire l'établissement du contact acoustique avec l'autre lentille L2. De plus, compte tenu du grandissement du faisceau acoustique, il n'est pas nécessaire en fait de tra-

30

35

0193457

vailler à grande ouverture : avec les valeurs numériques précitées, une ouverture de 20° sur le dioptre L21 (ou la lentille L1) donne une ouverture utile θ_m du faisceau de sortie (dans le milieu de couplage) qui varie de $3,5^\circ$ à 9° pour une distance de focalisation allant de 12 à 70mm.

Les figures 8, 8A et 8B illustrent un mode de réalisation détaillé du dispositif de l'invention, dans lequel on prévoit une fuite contrôlée du milieu de couplage, celui-ci étant typiquement le mercure. Le montage est semblable à celui de la figure 7. Le barreau L1 de corindon est monté sur la monture M41, dont un filetage externe 410 coopère avec un filetage interne 420 d'une partie élargie 425 de la monture M42 de la lentille biconcave L2. Une fuite existe entre les montures M41 et M42, par un ou plusieurs méplats 415 de la monture M41. Cette fente aboutit dans le réservoir 400 ménagée entre 425 et M41. On évite ainsi la quasi-totalité des problèmes rencontrés avec le mercure, compte tenu du volume variable qui va exister entre les lentilles L1 et L2. En particulier, la présence de bulles d'air, ou l'introduction de vibrations serait très dommageable, notamment pour les applications d'imagerie.

L'alésage 417 reçoit un corps d'adaptation du transducteur T, maintenu par une vis transverse 418 (figure 8B). L'alésage terminal 419, plus important, sert à loger l'électronique d'adaptation du transducteur.

Des mesures ont été réalisées pour déterminer les variations de la distance focale. Pour un échantillon d'épaisseur connue e , on a relevé l'amplitude de l'écho réfléchi sur sa face arrière (qui serait situé à droite sur les figures 3 et 4) en fonction de l'écart Δ par rapport à la position afocale des deux lentilles, tout en maintenant constante la distance entre la sonde et l'échantillon. La position du

maximum d'amplitude de l'écho sur la partie arrière de l'échantillon permet de déduire la distance focale équivalente F de la lentille. Les résultats illustrés sur la figure 11 pour le corindon montrent la possibilité de focaliser un faisceau acoustique dans des échantillons céramiques d'épaisseur comprise entre 10 et 1 mm, avec le type de lentille décrit. Cette figure 11 correspond aux conditions suivantes :

10 - Rayons de courbure : $R_1 = 1\text{ mm}$, $R_2 = 10\text{ mm}$, $R_3 = 30\text{ mm}$.

- Ouvertures (dans le milieu de couplage, qui est du mercure) $\theta_1 = 20^\circ$, $\theta_2 = 20^\circ$, $\theta_3 = 7^\circ$.

15 - Lentilles L_1 et L_2 en corindon, l'épaisseur de L_2 étant 4,5 mm.

Les amplitudes A (en millivolts) sont illustrées en fonction de Δ , pour des épaisseurs d'échantillon $e = 10,5\text{ mm}$, $5,2\text{ mm}$, $3,1\text{ mm}$ et $0,7\text{ mm}$.

Revendications.

1. Dispositif à lentilles acoustiques, du type dans lequel deux lentilles acoustiques (L1, L2) sont logées
5 coaxialement dans une monture (M), laquelle contient également un milieu de couplage acoustique (MC1) entre les faces internes (L12, L21) des lentilles, tandis que la face externe (L11) de la première lentille est destinée à être couplée acoustiquement à un transduc-
10 teur (T), et que la face externe (L22) de la seconde lentille est destinée à être couplée acoustiquement (MC2) à un échantillon (EC) que l'on souhaite examiner,
- caractérisé en ce que la première lentille (L1) consti-
15 tuée d'un dioptre concave (L11) creusé à l'extrémité d'un barreau (L1) dont l'autre extrémité est munie du transducteur acoustique (T), focalise le rayonnement de ce transducteur.
- 20 en ce que la seconde lentille (L2) est composée d'un dioptre concave interne (L21) dont le foyer objet (F2) est voisin du foyer image du dioptre concave (L12) de la première lentille, et d'un dioptre concave externe (L22) propre à être couplé acoustiquement à l'objet, et
25
- en ce que la monture (M) est agencée (M21, M22; M31, M32; M41, M42) pour permettre un déplacement axial relatif des deux lentilles (L1, L2), continûment réglable sur une plage prédéterminée,
30
- ce qui définit une sonde acoustique à focale et grandissement variables.
2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé
35 en ce que les lentilles (L1, L2) sont faites en un

matériau, de préférence monocristallin, avec lequel le milieu de couplage définit un fort indice relatif.

3. Dispositif selon la revendication 2, caractérisé en ce
5 que l'une au moins des lentilles (L1, L2) est en corindon.

4. Dispositif selon l'une des revendications 2 et 3, caractérisé en ce que l'une au moins des lentilles (L1, L2) est en silice.

10

5. Dispositif selon l'une des revendications 2 à 4, caractérisé en ce que l'une au moins des lentilles (L1, L2) est en céramique frittée.

15 6. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le transducteur (T) est excité en impulsions pour délivrer une onde acoustique de fréquence comprise entre quelques dizaines de Mégahertz et un Gigahertz environ.

20

7. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que ladite plage prédéterminée de réglage comprend la position confocale des deux dioptries internes (L12, L21).

25

8. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que les dioptries concaves (L12, L21, L22) sont des dioptries sphériques ou cylindriques.

30 9. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que le transducteur (T), qui est en particulier un transducteur au Niobate de Lithium, a une surface active telle qu'il possède une résistance de radiation d'environ 50 ohms, et en ce que les caractéristiques des lentilles (L1, L2) sont choisies pour obtenir l'ouverture de
35 faisceau désirée en respectant cette résistance de radiation.

10. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que le milieu de couplage (MC1) prévu entre les deux lentilles est le Mercure ou le Gallium liquide.
- 5
11. Dispositif selon la revendication 10, caractérisé en ce qu'il est prévu, entre les deux parties (M41, M42) en mouvement relatif de la monture, une fuite contrôlée vers un réservoir (M40) du milieu de couplage.
- 10
12. Dispositif selon l'une des revendications 10 et 11, dans lequel le milieu de couplage est le mercure, caractérisé en ce que les dioptries internes (L12, L21) ainsi que de préférence les faces internes de la monture (M), sont
- 15 revêtues d'une couche d'or avec sous-couche d'accrochage.
13. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 12, caractérisé en ce que la combinaison des deux lentilles (L1, L2) procure un agrandissement du faisceau acoustique.
- 20
14. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 12, caractérisé en ce que la combinaison des deux lentilles (L1, L2) procure une réduction du faisceau acoustique.
- 25
15. Application du dispositif selon l'une des revendications précédentes pour l'examen, en volume, d'échantillons céramiques ou métalliques.

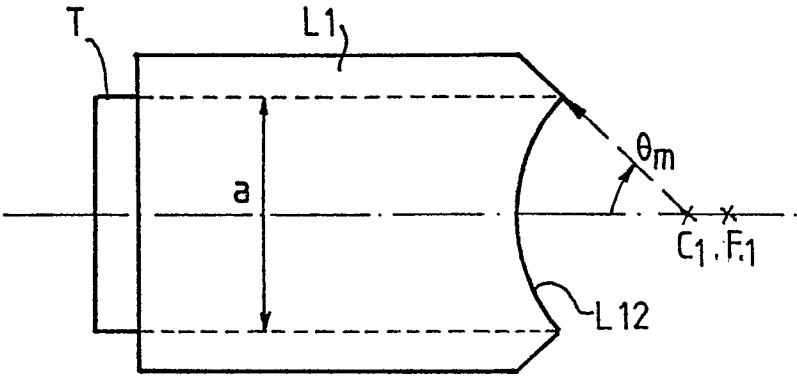


FIG. 1

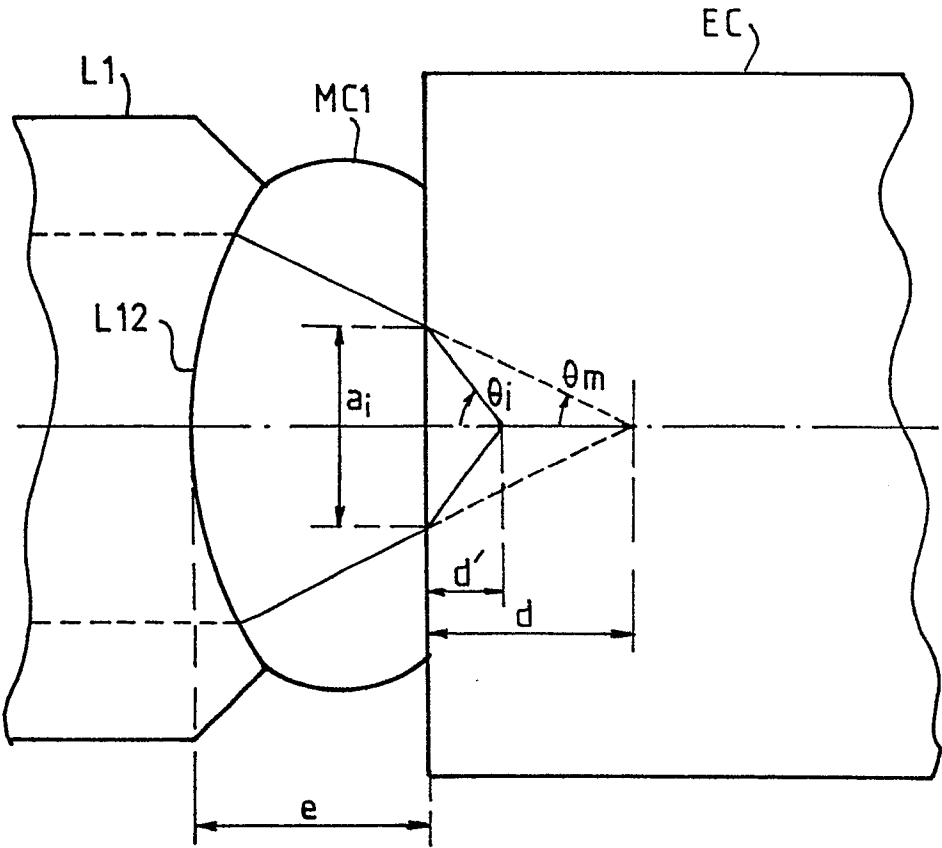


FIG. 2

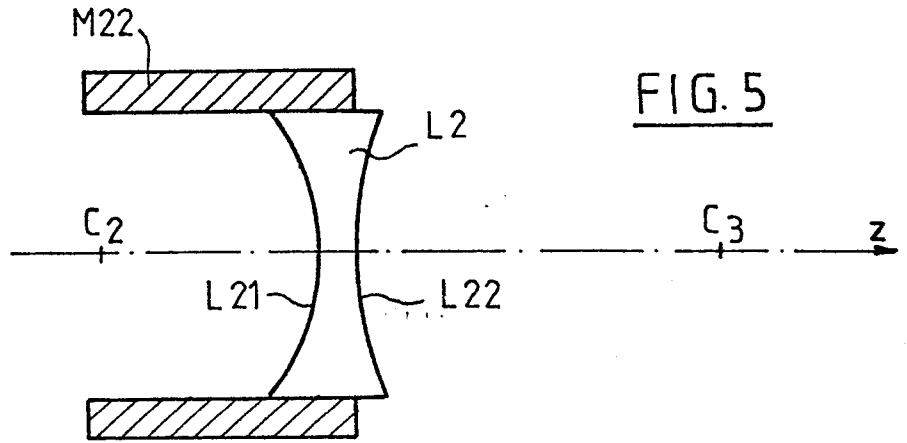


FIG. 5

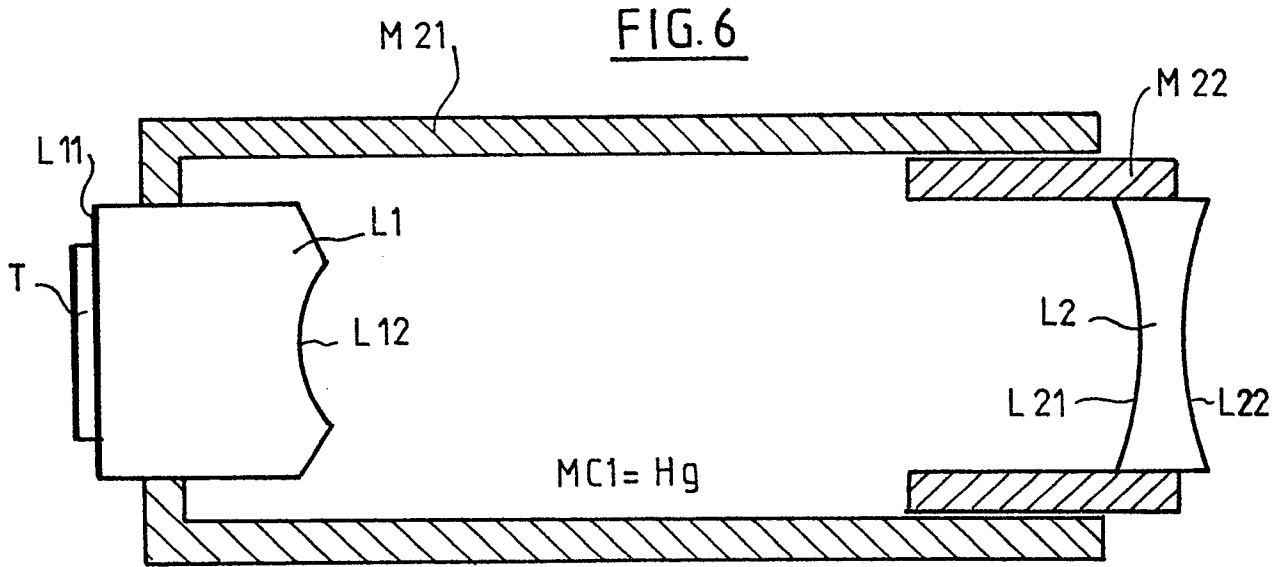


FIG. 6

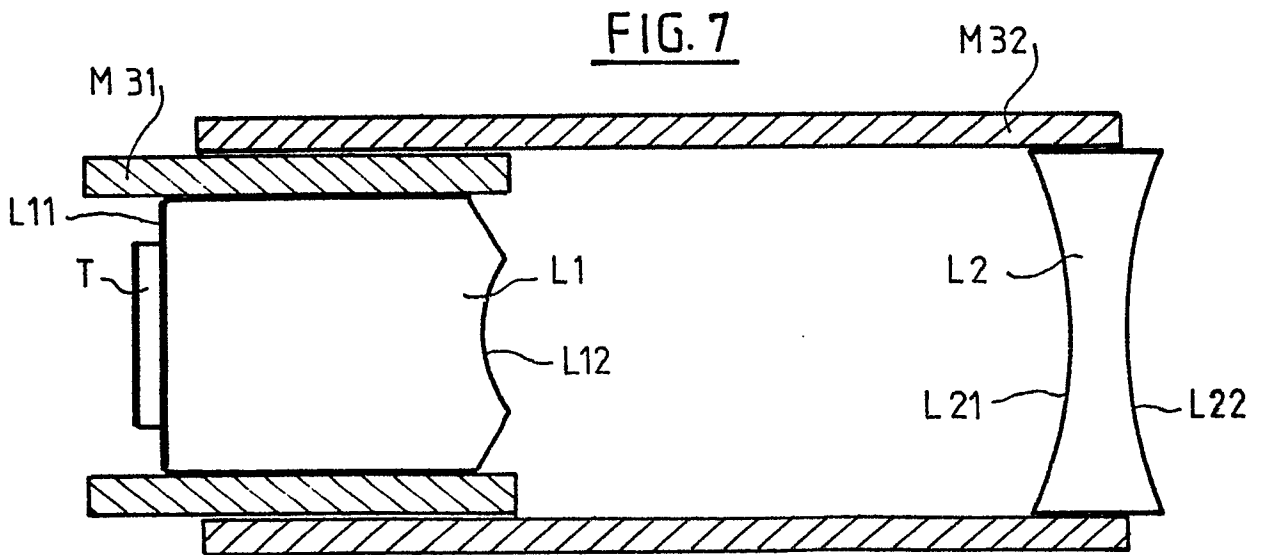


FIG. 7

FIG. 8

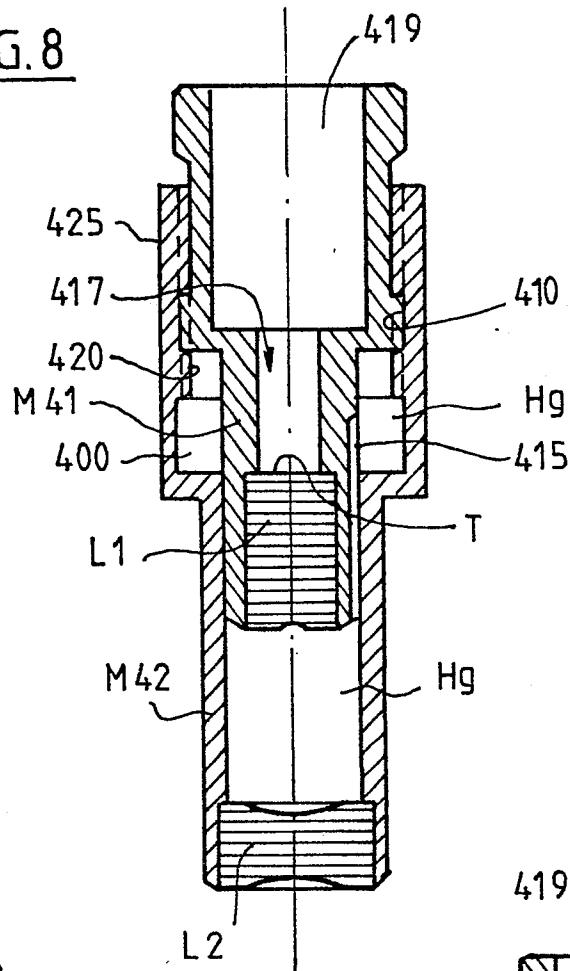


FIG. 8A

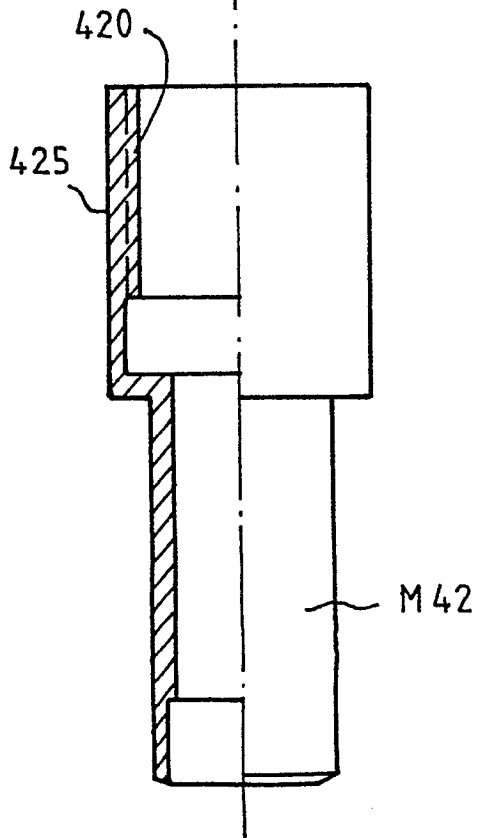


FIG. 8B

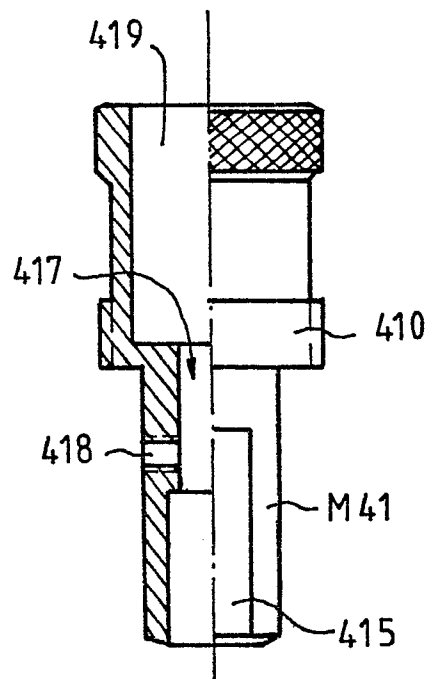


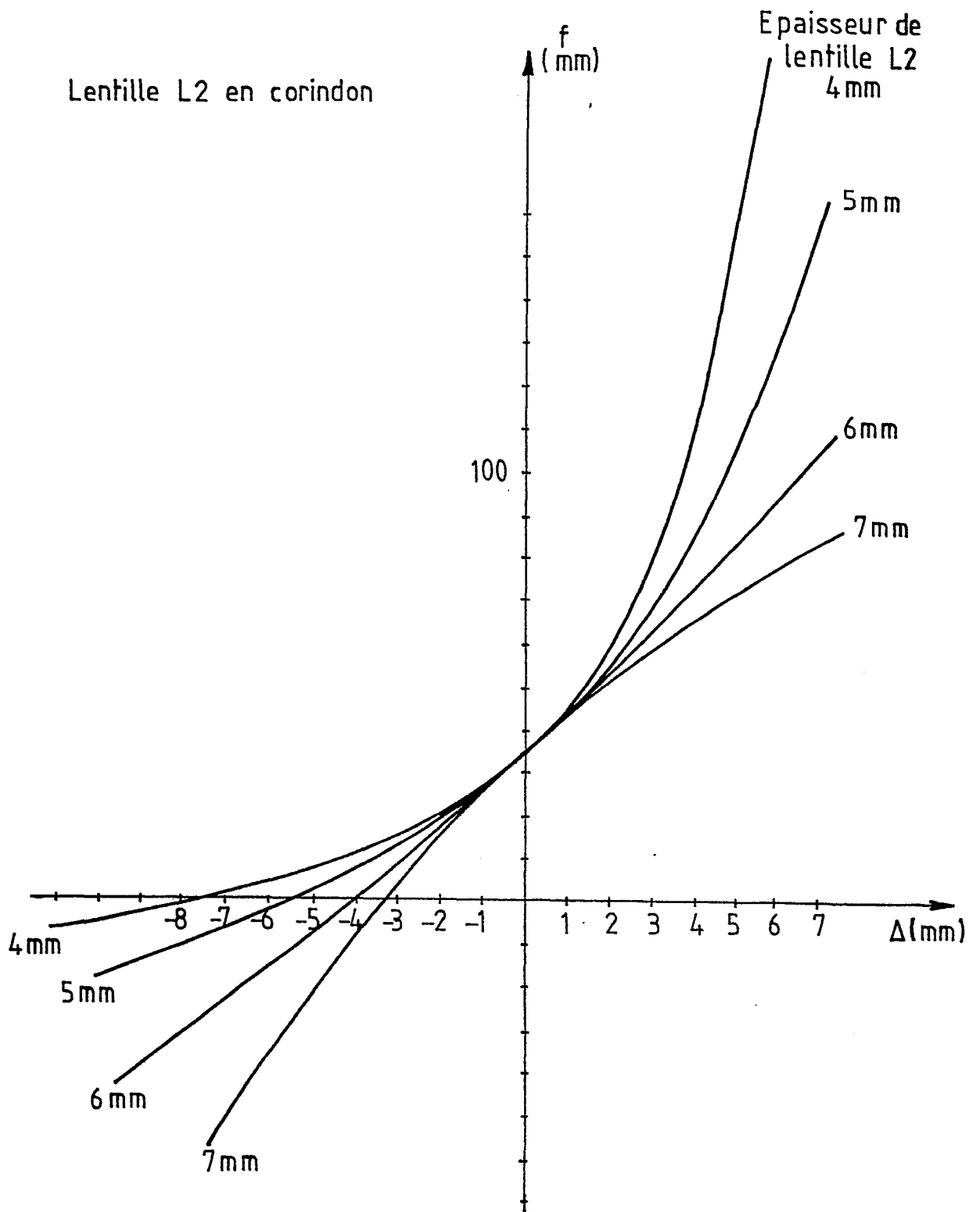
FIG.9

FIG. 10

Lentille L2 en silice

7 / 8

0193457

Epaisseur lentille
L2

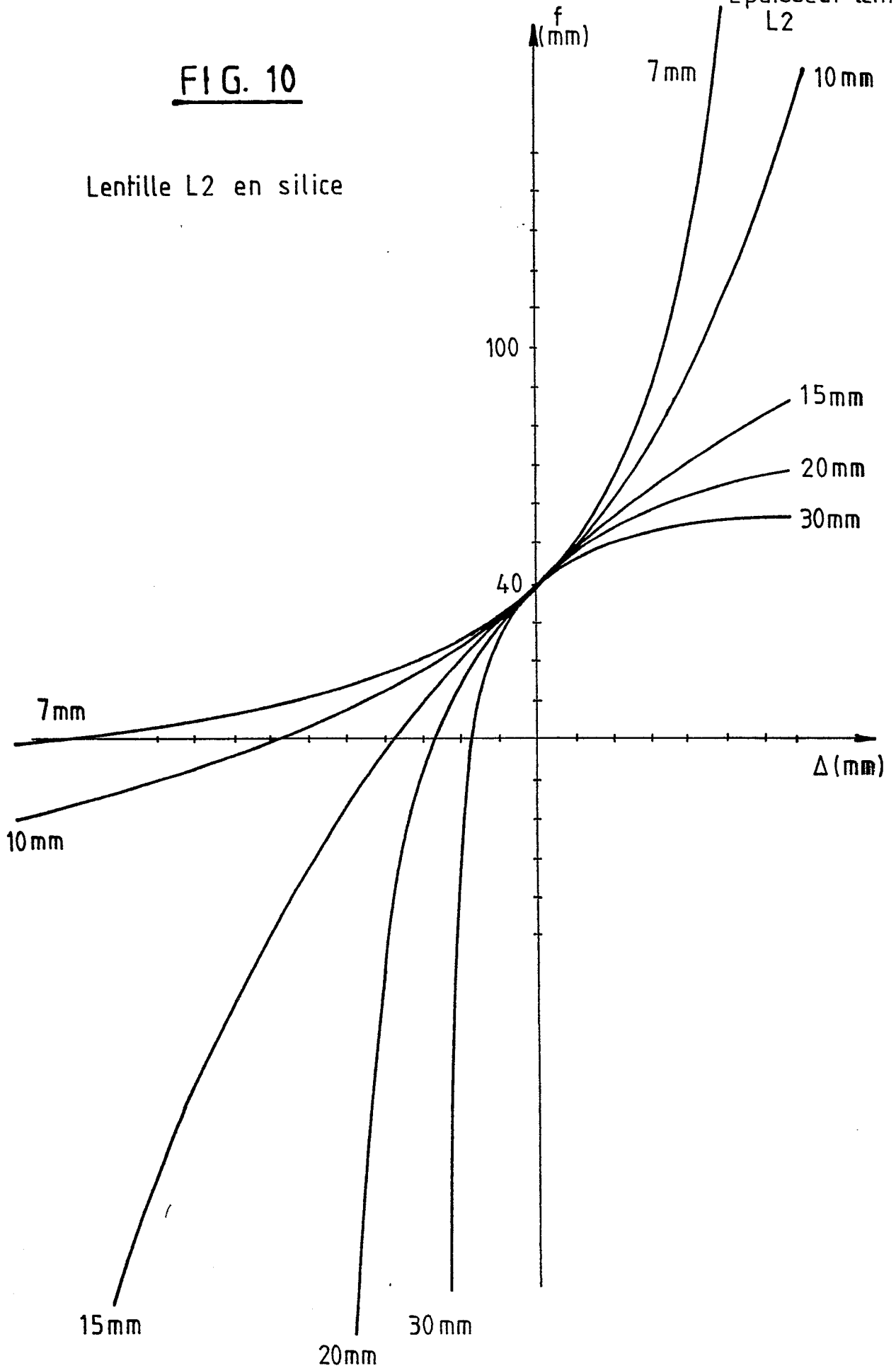
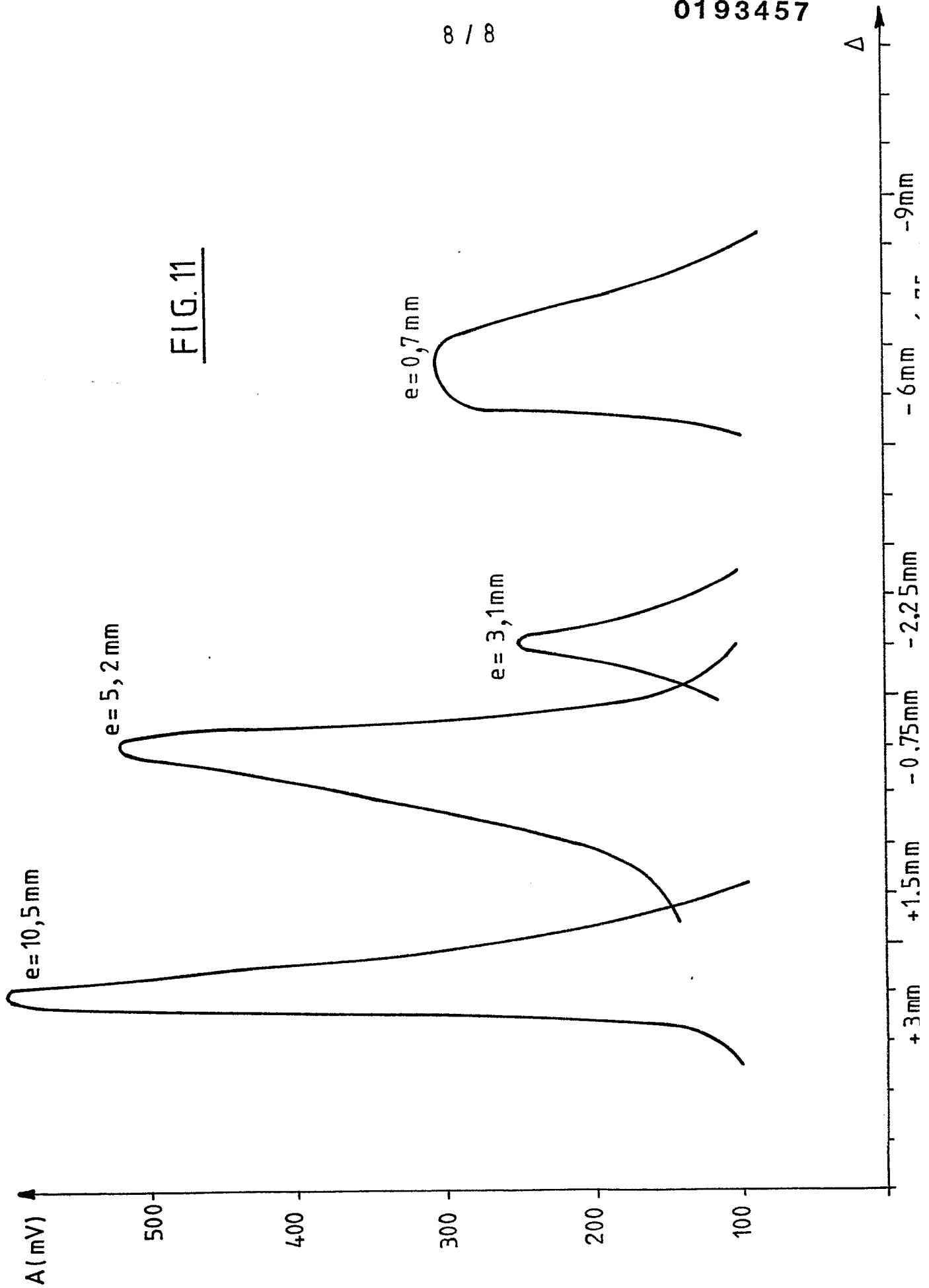


FIG. 11





| DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS | | | |
|--|---|--|--|
| Catégorie | Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes | Revendication concernée | CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int Cl 4) |
| A | DE-A-3 328 051 (SIEMENS) * Abrégé; figure 1 * | 1 | G 10 K 11/30 |
| A | FR-A-2 274 930 (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP.) * Page 14, ligne 32 - page 15, ligne 9; figures 19,20 * | 1 | |
| A | EP-A-0 131 653 (N.V. OPTISCHE INDUSTRIE "DE OUDE DELFT") * Page 4, ligne 25 - page 6, ligne 2; figures 3,4 * | 1 | |
| A | US-A-3 934 460 (GENERAL ELECTRIC COMPANY) * Figure 5 * | 1 | |
| | | | DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int Cl 4) |
| | | | G 10 K G 01 H G 01 N G 01 S |
| Le présent rapport de recherche a été établi pour toutes les revendications | | | |
| Lieu de la recherche LA HAYE | | Date d'achèvement de la recherche 22-05-1986 | Examineur ANDERSON A.TH. |
| CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES | | | |
| X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire | | T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant | |