

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 7 septembre 1982.

③0 Priorité

④3 Date de la mise à disposition du public de la
demande : BOPI « Brevets » n° 10 du 9 mars 1984.

⑥0 Références à d'autres documents nationaux appa-
rentés :

⑦1 Demandeur(s) : *VU Duy-Phach et HAOND Michel.* — FR.

⑦2 Inventeur(s) : *Duy-Phach Vu et Michel Haond.*

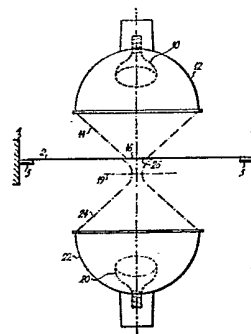
⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire(s) : *Brevatome.*

⑤4 Machine de traitement thermique pour semiconducteurs.

⑤7 Machine de traitement thermique pour semiconducteur.
La machine de l'invention comprend une première lampe 10
munie d'un réflecteur focalisant 12, et émettant un rayonne-
ment 14, focalisé sur la face à traiter d'une plaquette 2 et une
seconde lampe 20, opposée à la première et éclairant l'autre
face de la plaquette selon une tache 36 qui recouvre la
première 16 permettant d'obtenir une répartition de tempéra-
ture à faible gradient autour de la tache focale.

Application dans le recuit ou la recristallisation de semicon-
ducteur, notamment de silicium.



La présente invention a pour objet une machine de traitement thermique pour semiconducteurs. Elle trouve une application dans le recuit de plaquettes semiconductrices et également dans la recristallisation de silicium amorphe ou polycristallin sur isolant.

Une des opérations essentielles de la fabrication de circuits intégrés est le dopage d'un semiconducteur par des atomes donneurs ou accepteurs d'électrons. Cette opération peut s'effectuer par implantation ionique, notamment dans le cas des circuits à couches minces. Cependant, comme l'implantation ionique provoque une destruction de la structure cristalline du semiconducteur, sur une épaisseur de quelques milliers d'Angströms, une reconstruction du réseau cristallin est nécessaire, pour activer électriquement les atomes de l'impureté implantée. Cette reconstruction est obtenue par un recuit qui consiste à porter le semiconducteur à haute température, généralement entre 500°C et 1100°C.

Différents moyens de recuit sont connus, à savoir des fours à diffusion de chaleur ou des sources lumineuses cohérentes (lasers), ou encore des faisceaux d'électrons, ou enfin des feuilles de graphite chauffées par effet Joule.

Le recuit par four est utilisé depuis de nombreuses années dans l'industrie des semiconducteurs, mais il ne convient plus guère aux nouvelles conceptions de circuits intégrés où l'objectif essentiel est de porter très haut la densité d'intégration en réduisant les dimensions des composants. En effet, le recuit au four, qui demande 15 à 30 minutes à 500-1100°C, provoque, par un mécanisme de diffusion, un étalement des impuretés dans les trois dimensions du semiconducteur.

Pour conserver aux zones implantées le profil que leur donne l'implantation, il faut avoir recours à des techniques de recuit plus rapide. Celles qui utilisent des lasers ou des faisceaux d'électrons
5 semblent mieux adaptées à cet égard. Cependant les installations correspondantes sont complexes et coûteuses et elles consomment beaucoup d'énergie.

Le but de l'invention est de fournir une machine de traitement qui soit plus simple et moins
10 coûteuse que les machines antérieures, tout en permettant d'obtenir une élévation rapide de la température du semiconducteur traité, avec une consommation en énergie moindre.

Ces buts sont atteints, selon l'invention, par
15 l'utilisation de deux lampes disposées de part et d'autre de la plaquette de semiconducteur à traiter. L'une au moins de ces lampes émet un rayonnement focalisé sur la face à traiter, fournissant ainsi une haute densité d'énergie. L'autre lampe émet un rayonnement qui se tra-
duit, sur la face opposée de la plaquette, par une tache
20 concentrique à celle de la tache focale de la face à traiter, de dimensions supérieures et présentant une répartition d'énergie à faible gradient.

Le rôle de cette seconde lampe est de préchauffer la région traitée, à travers la plaquette semiconductrice afin de faciliter le recuit tout en réduisant le gradient thermique dans la plaquette. Ce gradient pourrait engendrer l'apparition de lignes de glissement et des dislocations dans le semiconducteur.

30 Le rôle de la première lampe est de fournir le complément d'énergie pour effectuer localement le traitement thermique souhaité.

La machine de l'invention peut servir au recuit mais également à la recristallisation de semiconducteurs. Dans ce dernier cas, la seconde lampe
35 est réglée pour émettre un rayonnement peu ou pas focalisé, afin que soit préchauffée la quasi-totalité

de la plaquette.

Les caractéristiques de l'invention apparaîtront mieux après la description qui suit, d'exemples de réalisation donnés à titre explicatif et nullement
5 limitatif. Cette description se réfère à des dessins sur lesquels :

- la figure 1 illustre les moyens de chauffage utilisés dans une machine conforme à l'invention,
- la figure 2 représente une vue générale
10 d'une machine conforme à l'invention, dans une variante où le support de plaquette est fixe,
- la figure 3 montre le repère utilisé pour définir un balayage en spirale à vitesse uniforme,
- la figure 4 montre, en coupe, un porte-
15 échantillon pour recuit sous atmosphère contrôlée,
- la figure 5 illustre une variante utilisable pour la recristallisation d'un semiconducteur sur isolant.

Comme toute machine de traitement thermique
20 de plaquettes de semiconducteurs, celle de l'invention comprend des premiers moyens pour chauffer localement une zone de cette plaquette et des seconds moyens pour déplacer cette zone et balayer la totalité de la plaquette. L'invention se caractérise par la structure
25 des premiers moyens et accessoirement par la nature des seconds.

Selon le mode de réalisation représenté sur les figures 1 et 2, une plaquette de semiconducteur 2 repose sur des pointes isolantes 3 (par exemple en
30 céramique), lesquelles sont solidaires d'un support en forme d'anneau 4. Les moyens de chauffage sont constitués par :

- une première lampe 10, placée au-dessus de la plaquette 2 et munie d'un premier réflecteur focalisant 12 ; cette première lampe émet un premier
35

rayonnement 14 dirigé vers la face supérieure de la plaquette 2 qui est la face à traiter ; ce rayonnement est focalisé par le réflecteur selon une tache focale 16 ayant un certain diamètre ;

5 - une seconde lampe 20, placée sous la plaquette 2 ; cette seconde lampe émet un second rayonnement 24 dirigé vers la face inférieure de la plaquette 2 où il forme une seconde tache 26 ayant un diamètre supérieur à celui de la tache focale 16.

10 De préférence dans l'application au recuit, la seconde lampe 20 est munie d'un réflecteur 22 identique au réflecteur 12 mais focalisant le second rayonnement 24 sur un plan 19 légèrement décalé par rapport à la face inférieure de la plaquette 2. De
15 cette manière, la seconde lampe remplit le rôle défini précédemment.

 Comme on le voit sur l'exemple de la figure 2, les moyens de déplacement de la zone chauffée pour balayer la totalité de la plaquette sont constitués
20 par des moyens de déplacement de l'ensemble des deux lampes, la plaquette restant fixe. Dans ce cas, les lampes sont solidaires d'une table de translation 30 du type x - y commandée par deux moteurs pas à pas non représentés, eux-mêmes actionnés par des signaux
25 provenant d'un circuit de commande approprié. Quant à la plaquette, elle est tenue par son support 4, lequel est solidaire d'un pied 32 fixe.

 Dans une variante avantageuse, les moyens de balayage présentent cependant une nature originale.
30 Ils sont aptes à provoquer un balayage en forme de spirale d'Archimède, pour laquelle les coordonnées polaires r et φ du centre de la première tache par rapport au centre de la plaquette, vérifient la relation $r = a\varphi$ où a est une constante ; de plus, l'évolution

temporelle de l'angle polaire ψ est de la forme $b\sqrt{t}$,
 où b est une constante et t le temps. L'intérêt de
 ce balayage particulier est que la vitesse linéaire
 ($v = \frac{ds}{dt}$) est pratiquement constante en tout point
 5 de la spirale. En effet, avec des notations précisées
 sur la figure 3, on a :

$$r = a\psi \quad \text{et} \quad \psi = b\sqrt{t}$$

donc $r = a.b\sqrt{t}$

Les composantes radiale (v_r) et tangentielle
 10 (v_t) de la vitesse s'écrivent :

$$v_r = \frac{dr}{dt} = \frac{a.b}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}}$$

$$v_t = r \frac{d\psi}{dt} = a.b \cdot \sqrt{t} \cdot b \cdot \frac{1}{2\sqrt{t}} = \frac{a.b^2}{2}$$

v_t est donc indépendante du temps.

15 Avec les vitesses linéaires habituellement
 utilisées pour le recuit (quelques mm/s), la composante
 v_r est rapidement négligeable devant v_t . Par suite :

$$v = (v_t^2 + v_r^2)^{1/2} \approx v_t$$

Un tel mouvement, en spirale d'Archimède à
 20 vitesse linéaire constante, peut être obtenu au
 moyen de deux moteurs pas à pas commandés par un
 calculateur et agissant sur une table de translation
 en x-y. Son intérêt est double : d'une part, il conduit
 à des bras équidistants, ce qui est nécessaire pour
 25 pouvoir balayer uniformément la totalité de la plaquet-
 te ; d'autre part, il évite d'avoir une vitesse qui
 augmente lorsqu'on atteint la périphérie de la plaquette,
 ce qui serait le cas avec une loi angulaire linéaire
 en fonction du temps.

30 En plus des dispositions originales qui vien-
 nent d'être décrites, des moyens peuvent être prévus
 pour que la température de la plaquette dans la zone
 focale soit maintenue constante . Ces
 moyens comprennent un pyromètre optique disposé dans
 35 une boucle d'asservissement agissant sur l'alimentation
 des lampes.

L'asservissement de la température peut être utile lorsque, au fur et à mesure que le spot se rapproche des bords de l'installation, un effet de réflexion de la chaleur se manifeste.

- 5 La machine qui vient d'être décrite a été mise en oeuvre dans des conditions qui vont maintenant être précisées. Des lampes à halogène à réflecteur incorporé de 150W chacune, commercialisées par la Société OSRAM (réf. 64635), ont été utilisées. Un
- 10 recuit dans l'air ambiant, sous flux laminaire, a été effectué avec les valeurs des paramètres a et b suivants :

$$a = 1,27 \text{ mm/radian}$$

$$b = 2,17 \text{ rad/s}^{-1/2}$$

- 15 Pour ces valeurs, la distance entre deux lignes recuites consécutives est de 8 mm et la vitesse linéaire de 3 mm/s. La température est maintenue à 1000°C. Le recuit d'une plaquette de 10 cm dure 5 mn. Des plaquettes de silicium de 10 cm de
- 20 diamètre ont été implantées dans les conditions suivantes :

arsenic : $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ à 50 keV

$5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ à 100 keV

phosphore : triple implantation :

25 $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ à 100 keV

+ $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ à 80 keV

+ $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ à 50 keV.

La caractérisation des plaquettes obtenues a été réalisée par différentes techniques :

- 30 - par mesure de la résistance de couche : cette mesure a permis de révéler une activation complète des atomes d'impureté et une excellente uniformité le long d'un diamètre (écart type de 3,5%) ;
- par mesure du profil de l'impureté en fonction de
- 35 la distance à la surface : cette mesure a permis de confirmer que le recuit réalisé ne modifiait

pas le profil des dopants résultant de l'implantation ;
- par des mesures de planéité à l'aide d'un interféromètre de type Fizeau : aucun voilage appréciable n'a pu être révélé.

5 De tels résultats constituent un avantage certain pour la machine de l'invention. En effet, pour obtenir une activation totale, il faut, dans un four à 1000°C, recuire la plaquette pendant au moins 30 mn. Mais, après une telle durée, on constate que
10 le profil des impuretés s'est modifié et que les dopants ont diffusé très loin (plusieurs centaines d'Angströms pour des couches implantées en arsenic à 5×10^{14} et à 100 keV). A propos de ce phénomène parasite de diffusion, on peut se reporter à l'article
15 de A. Gat publié dans la revue "IEEE Electron Device Letters", vol. EDL-2, n° 4, avril 1981, pages 85-87.

Il est possible d'étendre le principe de la machine décrite plus haut à une machine apte à traiter tout un lot de plaquettes. Il suffit pour cela
20 de multiplier le nombre de paires de lampes et de prévoir un support de plaquettes à plusieurs alvéoles recevant chacune une plaquette. Un tel support peut être encore animé d'un mouvement en spirale à vitesse uniforme. Le recuit d'une plaquette de 10 cm
25 de diamètre s'effectuant en 5 minutes, avec 10 alvéoles, on peut traiter 120 plaquettes à l'heure, ce qui est supérieur à ce que permettent les fours à diffusion qui ne dépassent pas 100 plaquettes à l'heure.

La machine de l'invention peut comprendre
30 un support de plaquette permettant un traitement sous atmosphère contrôlée. Un tel support est illustré sur la figure 4. Il comprend encore un anneau isolant 4 pourvu de pointes isolantes 3 (par exemple en céramique) supportant la plaquette 2 ; il comprend
35 en outre un premier conduit 40 d'amenée de gaz et

un second conduit 42 de sortie de ce gaz, ces deux conduits traversant l'anneau en des zones diamétralement opposées ; deux hublots transparents (44 et 46) sont appliqués sur l'anneau, de part et d'autre de la
5 plaquette, des joints 48-49 assurant l'étanchéité.

Une telle structure permet de travailler sous vide ou sous atmosphère contrôlée. Elle permet la fabrication de siliciures ; elle autorise des opérations d'oxydation (oxygène sec ou humide, pour oxydes minces
10 ou épais).

Par ailleurs, la machine de l'invention trouve une autre application dans la technologie silicium sur isolant en permettant la recristallisation de semiconducteurs, notamment de silicium amorphe ou
15 polycristallin déposé sur substrat isolant. Cette technologie fait l'objet, depuis quelques années, de nombreuses études, destinées à la réalisation d'empilements de couches alternativement monocristallines et isolantes. De telles structures permettent d'aug-
20 menter la densité d'intégration des circuits.

La difficulté essentielle que soulève cette technique concerne la réalisation d'un substrat monocristallin à partir d'une couche de silicium amorphe ou polycristallin déposée sur un isolant (typiquement
25 oxyde ou nitrure supporté par une plaquette de silicium monocristallin). Par ailleurs, compte tenu des possibilités actuelles de la technologie du silicium, il est essentiel que le cristal obtenu soit orienté <100>.

Des tentatives de recristallisation ont été effectuées avec les lasers émettant en continu, mais
30 compte tenu de la taille des spots disponibles avec ces sources et des problèmes de recouvrement des lignes fondues, cette solution paraît peu adaptée à des plaquettes de grande dimension (10 cm de diamètre).

35 Une autre solution connue consiste à utiliser une plaque de graphite chauffée par effet Joule et

une baguette de graphite également chauffée par effet Joule, cette baguette étant déplacée à la surface du semiconducteur où elle fond une ligne étroite de silicium. Une telle technique est décrite dans

- 5 l'article de J.C.C. FAN publié dans la revue "Applied Physics Letters" 40(2), 15 Janvier 1982, page 158.

La machine de l'invention offre encore, dans ce domaine, des possibilités intéressantes. Par rapport à l'application au recuit, une adaptation doit être
10 faite : la lampe défocalisée 20 doit porter le substrat à environ 1100°C et la lampe focalisée 10-12 doit pouvoir fondre localement la couche de silicium. Les puissances des lampes sont donc plus fortes dans cette application que dans la précédente. On peut
15 d'ailleurs utiliser comme seconde lampe disposée sous la plaquette à traiter, une lampe irradiant la quasi-totalité ou même la totalité de la surface. Ce résultat peut être obtenu en utilisant un réflecteur parabolique dont le foyer est occupé par la lampe. Dans cette
20 disposition, seule la première lampe est déplacée pour obtenir le balayage sur la plaquette.

Par ailleurs, il est connu, en cristallographie que, lors du tirage d'un cristal, la zone fondue doit présenter un front concave vis-à-vis de la zone
25 recristallisée, afin d'éviter la nucléation sur les bords. La resolidification doit donc s'effectuer en priorité au centre de la zone fondue, ce qui permet de tirer de longs grains monocristallins.

Cette forme particulière de la zone fondue
30 peut être aisément obtenue en déformant la tache focale circulaire, conformément à ce qui est illustré sur la figure 5. Une tige 50, terminée par une pointe en platine 52, est placée dans le faisceau 14 émis par la première lampe très près de la plaquette. La
35 pointe 52 constitue un masque qui porte ombre sur la

plaquette et permet d'obtenir la forme en "haricot" 16 souhaitée. On pourrait naturellement employer d'autres moyens comme des masques, des réflecteurs, etc..., mais la solution illustrée semble particulièrement simple
5 à mettre en oeuvre.

Des essais de recristallisation ont été effectués avec une machine équipée suivant le schéma de la figure 5, avec les mêmes lampes que pour le recuit. La zone fondue était déplacée avec une vitesse de 0,5
10 à 1 mm/s dans un type de balayage ligne par ligne. Des grains visibles à l'oeil nu ont été obtenus. Ces grains, monocristallins sont orientés $\langle 100 \rangle$ suivant la normale au plan de la plaquette et $\langle 100 \rangle$ dans la direction du balayage. Ces cristallites ont des dimensions typiques
15 de 3 mm par quelques centimètres. La largeur est limitée par la taille du spot obtenu. Ces cristallites comportent des zones jointives faiblement désorientées (par rapport à $\langle 100 \rangle$ dans le plan de la plaquette. La distribution angulaire des zones, séparées par des sous-joints est
20 inférieure à $0,7^\circ$ (typiquement $0,3^\circ$).

On remarquera que la largeur des grains obtenus (3 mm) est supérieure à celle qui est rapportée dans le dernier article cité, où elle n'est que de 2 mm. Par ailleurs, dans cet article, il est question d'une
25 texture (100) dans la zone recristallisée alors que, avec la machine de l'invention, on obtient bien un monocristal $\langle 100 \rangle$.

Les résultats mentionnés ont été obtenus avec des bandes découpées de 1 cm de large par quelques
30 centimètres de long. Mais rien n'empêche d'utiliser des plaquettes circulaires de type industriel, de 10 cm de diamètre. Le balayage ligne par ligne doit s'effectuer avec un recouvrement des lignes de l'ordre de 10%, sans refonte des grains obtenus à la ligne
35 précédente.

- Naturellement, il va de soi que toutes les opérations qui viennent d'être décrites peuvent être réalisées avec des plaquettes en position verticale ou autre, de sorte que les mots "dessus" ou "dessous"
- 5 n'ont pas de caractère limitatif, mais se rapportent simplement aux exemples illustrés où la plaquette est horizontale.

REVENDICATIONS

1. Machine de traitement thermique pour plaquettes de semiconducteur, comprenant des moyens pour chauffer localement une zone d'une des faces d'une telle plaquette et des moyens pour balayer
5 cette zone sur la totalité de la plaquette, caractérisée en ce que les moyens pour chauffer localement une zone de la plaquette sont constitués par :

- une première lampe (10) munie d'un premier réflecteur focalisant (12), cette première lampe
10 émettant un premier rayonnement (14) focalisé sur la face à traiter de la plaquette (2) selon une tache focale (16) ayant un certain diamètre,

- une seconde lampe (20) émettant un second rayonnement (24) dirigé vers l'autre face de la
15 plaquette (2) et formant sur cette autre face une seconde tache (18) ayant un diamètre supérieur à celui de la tache focale.

2. Machine selon la revendication 1, caractérisée en ce que la seconde lampe (20) est munie
20 d'un réflecteur (22) focalisant le second rayonnement (24) dans un plan (19) légèrement décalé par rapport à la seconde face de la plaquette (2).

3. Machine selon la revendication 1, caractérisée en ce que la seconde lampe (20) émet un
25 rayonnement dirigé sur la totalité ou la quasi-totalité de la seconde face de la plaquette (2).

4. Machine selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisée en ce que les moyens de balayage de la zone chauffée sont constitués par
30 des moyens de déplacement de l'ensemble des première et seconde lampes, la plaquette restant fixe.

5. Machine selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisée en ce que les moyens

de balayage sont aptes à provoquer un balayage en forme de spirale d'Archimède pour laquelle les coordonnées polaires r et φ du centre de la première tache par rapport au centre de la plaquette vérifient la relation

5 $r = a\varphi$ où a est une constante, et pour laquelle l'évolution temporelle de l'angle polaire φ est de la forme $b\sqrt{t}$ où b est une constante et t le temps, la vitesse linéaire de déplacement de la zone étant alors pratiquement constante.

10 6. Machine selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisée en ce qu'elle comprend un support de plaquette permettant un traitement en atmosphère contrôlée, ce support comprenant un anneau isolant (4) pourvu de pointes isolantes (3) dirigées

15 vers l'intérieur et aptes à supporter la plaquette sur sa périphérie, un premier conduit d'amenée de gaz (40) et un second conduit de sortie de ce gaz (42), ces deux conduits traversant l'anneau en des zones diamétralement opposées, deux hublots (44, 46) transparents étant appliqués sur l'anneau de part et

20 d'autre de la plaquette.

7. Machine selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisée en ce qu'elle comprend un moyen pour donner à la première tache focale une

25 forme présentant une zone concave.

8. Machine selon la revendication 7, caractérisée en ce que le moyen en question est constitué par une tige (50) terminée par une pointe (52), cette

30 pointe étant placée dans le rayonnement (14) émis par la première lampe (10) et portant ombre dans la tache focale, cette ombre dessinant la zone concave en question.

9. Machine selon la revendication 8, caractérisée en ce que la pointe (52) est en platine.

1/4

FIG.1

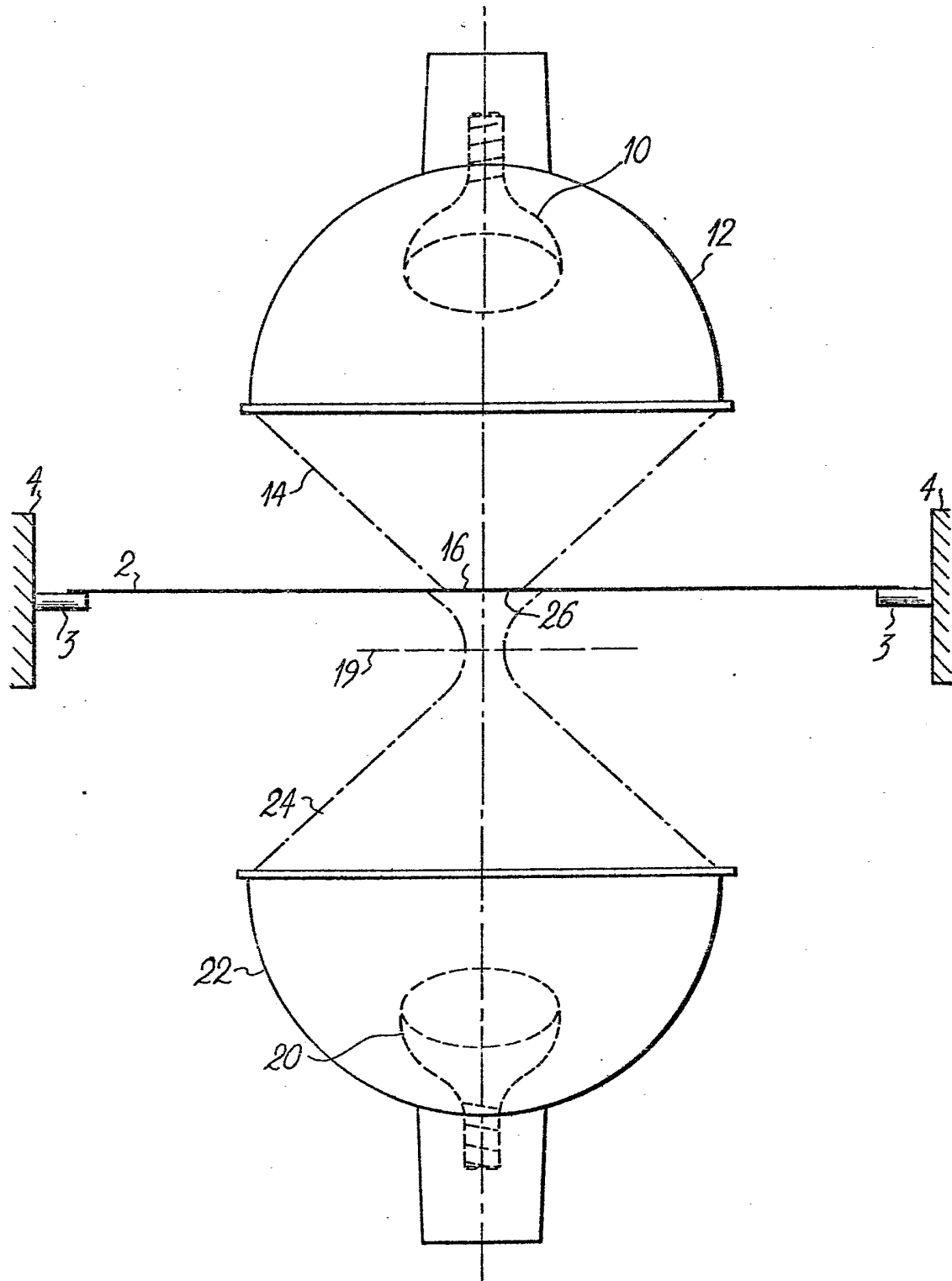
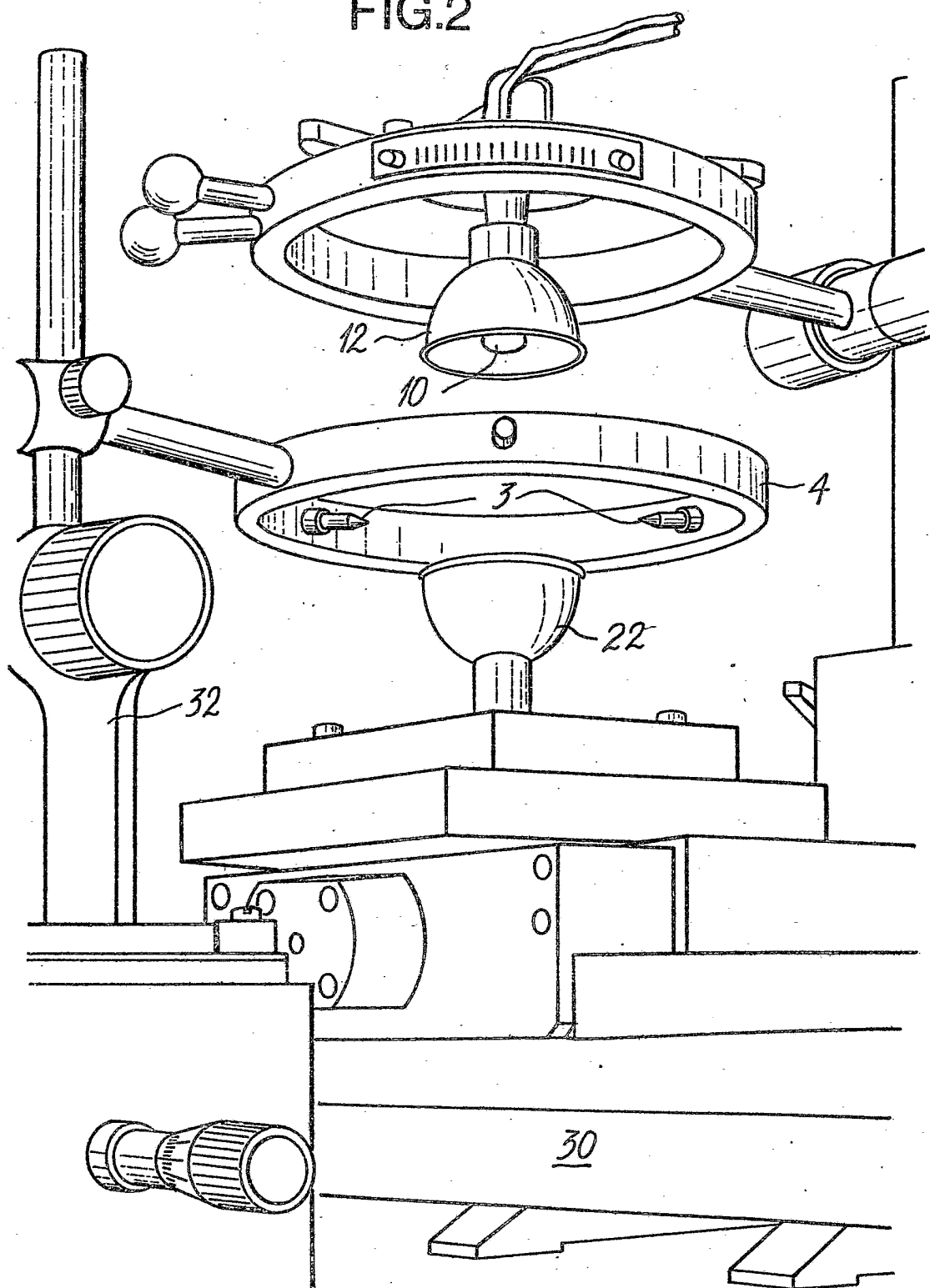


FIG.2



3/4

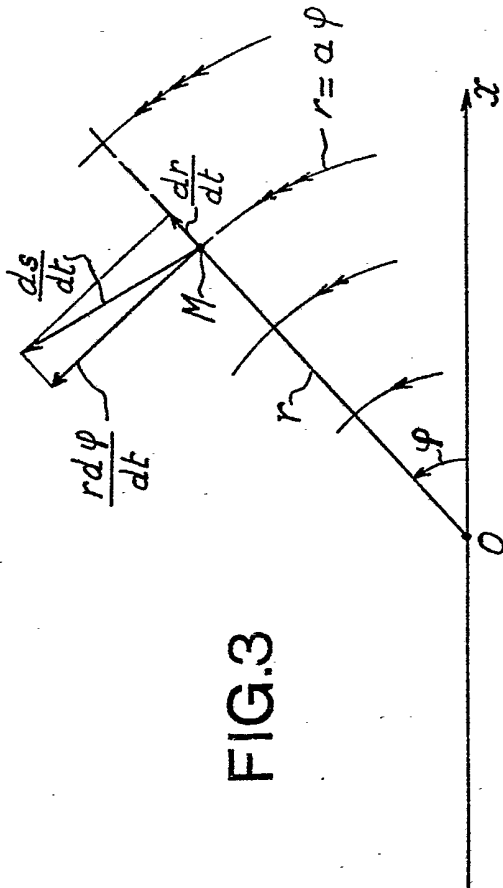
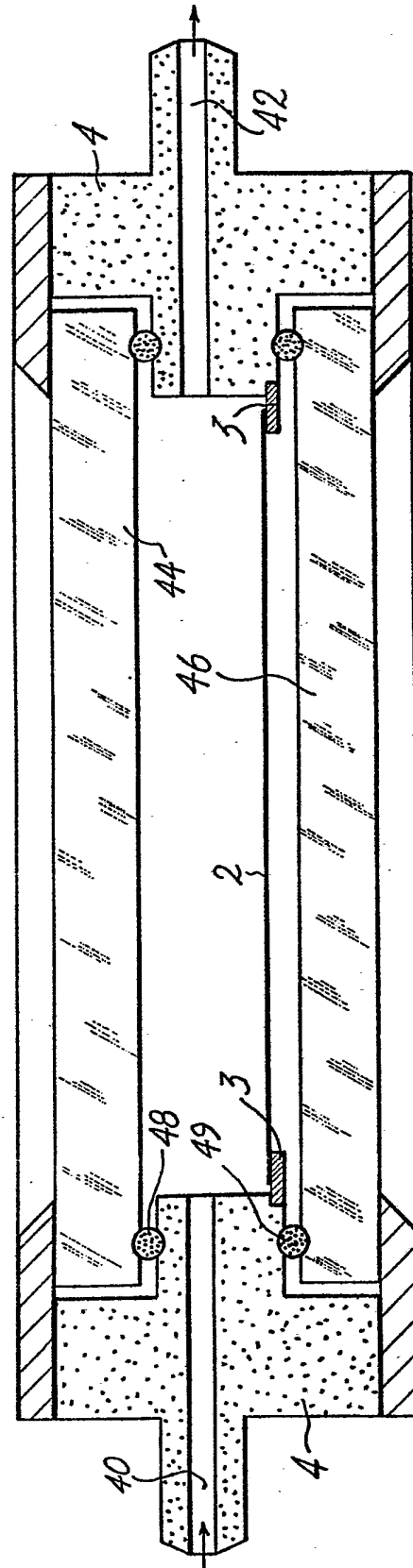


FIG. 4



4/4

