(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication : **2 551 614**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) N° d'enregistrement national : **83 14085**

(51) Int Cl⁴ : H 05 G 1/00; H 05 H 1/24.

# (12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) Date de dépôt : 2 septembre 1983.

(30) Priorité :

(43) Date de la mise à disposition du public de la demande : BOPI « Brevets » n° 10 du 8 mars 1985.

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

(71) Demandeur(s) : *CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE et COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE.* — FR.

(72) Inventeur(s) : Henri Jean Doucet, Michel Gazaix, Henri Lamain, Claude Rouille et Jean-Pierre Furtlehner.

(73) Titulaire(s) :

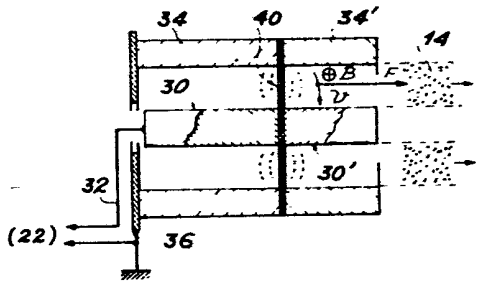
(74) Mandataire(s) : Brevatome.

## (54) Source intense de rayons X mous, à compression cylindrique de plasma, ce plasma étant obtenu à partir d'une feuille explosée.

(57) Source intense de rayons X mous à compression cylindrique de plasma.

Pour produire le jet de plasma, on dispose une feuille mince 40 entre deux électrodes coaxiales 30, 34. La décharge de condensateurs à travers une ligne rapide 22 permet de faire exploser la feuille et de créer le plasma.

Application à la production de rayons X mous.




FR 2 551 614 - A1



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

La présente invention a pour objet une source intense de rayons X mous, à compression cylindrique de plasma, ce plasma étant obtenu à partir d'une feuille explosée.

Les plasmas dont il est question dans l'invention sont des plasmas chauds et denses. Leur densité électronique est supérieure à environ $10^{18}$ $cm^{-3}$ et leur température électronique tombe dans la plage allant de quelques centaines d'électrons-volts à quelques kilo-électrons volts.

De tels plasmas peuvent constituer des sources intenses de rayonnement X mous. Ces sources présentent, par rapport aux autres sources de rayons X, de nombreux avantages :

- leur coût de réalisation est faible,
- leur encombrement est suffisamment réduit pour qu'elles puissent être placées sur le lieu même de l'utilisation du rayonnement X,
- elles offrent une grande facilité d'utilisation et leur maintenance est aisée,
- leur rendement énergétique est élevé.

Ces avantages rendent de telles sources particulièrement adaptées à la microlithographie. Elles peuvent constituer en outre des sources utilisables en microscopie X rapide.

Parmi ces sources certaines mettent en oeuvre une compression cylindrique de plasma. Elles sont désignées, parfois, dans la littérature anglo-saxonne, par le terme "LINER".

Cette technique connue est déjà appliquée dans des dispositifs produits industriellement pour des applications en microlithographie. C'est ainsi que l'article intitulé "X-ray lithography using a pulsed plasma source" publié dans la revue "Journal of Vacuum Science Technology" (19(4) Nov/Dec. 1981, pages 1190-1193, par J.S. PEARLMAN et J.C. RIORDAN décrit une

source de rayons X mous, qui comprend essentiellement un moyen pour produire un jet de plasma supersonique de forme cylindrique à travers une cathode creuse en direction d'une anode. Un circuit de décharge relie la cathode à l'anode, à travers une batterie de condensateurs préalablement chargés par une source de haute tension. Lors de la décharge de ces condensateurs à travers le jet de plasma, il s'opère une compression cylindrique de ce jet et une émission de rayons X mous en résulte.

Une telle source est également décrite dans l'article intitulé "Intense Plasma source for X-ray microscopy" publié dans la revue "SPIE" "Society of Photooptical Instrumentation Engineers" vol. 316, High Resolution Soft X-Ray Optics (1981), pages 196 à 202, par R.A. GUTCHECK et J.J. MURAY. Cet article décrit en outre une source utilisant une couronne de fils conducteurs dont on provoque l'explosion, la compression cylindrique de cette couronne intervenant ensuite.

La température et la densité des plasmas obtenus dans de telles sources sont limitées essentiellement par deux phénomènes physiques qui sont les suivants :

- une instabilité magnétohydrodynamique se développe dans le plasma comprimé, ce qui conduit à utiliser des générateurs haute tension très rapides, pour ne pas laisser à cette instabilité la faculté de se développer ; le paramètre essentiel qui définit les performances de la source est alors l'homogénéité initiale du plasma à comprimer ;
- la compression est limitée par la présence de gaz à l'intérieur du cylindre à comprimer, ce qui réduit la température et la densité finales obtenues.

Ces deux limitations sont importantes dans les dispositifs connus évoqués plus haut :

- les plasmas produits par jet supersonique de gaz

présentent une assez bonne homogénéité mais des interactions du jet supersonique avec les parois, les électrodes, etc... provoquent des ondes de chocs dans le jet, qui introduisent du gaz dans le cylindre à comprimer,

- les plasmas produits par explosion des fils présentent une homogénéité médiocre et en outre ils ne conviennent pas à des machines de puissance modeste.

La présente invention a justement pour but de remédier à ces inconvénients grâce à un moyen particulier de production du jet de plasma.

Selon l'invention le jet du plasma est produit par l'explosion d'une feuille de matériau solide, facilement condensable. L'explosion de la feuille est produite par la décharge rapide d'un banc de condensateurs à travers une ligne de transmission de très basse inductance. Le plasma créé par l'explosion se trouve accéléré par les forces électrodynamiques résultant du courant radial et du champ magnétique azimutal associé. Ce plasma traverse une zone qui lui donne une forme cylindrique, puis est introduit dans l'espace interélectrode d'une machine électrique pulsée classique.

Le plasma obtenu par le dispositif de l'invention est beaucoup mieux adapté à la production de rayons X mous que les jets de plasma supersonique obtenus par les moyens de l'art antérieur, pour les raisons suivantes. Dans un dispositif conforme à l'art antérieur, le moyen d'obtention du jet est une valve rapide, c'est-à-dire un moyen mécanique. Son ouverture n'est pas instantanée et le jet de plasma produit a des caractéristiques qui évoluent. En particulier, la densité du plasma croît en fonction du temps, d'une manière qui est sensiblement linéaire. Avant de commander la décharge qui provoquera l'implosion du jet

de plasma, il faut attendre que celui-ci ait atteint la densité optimale. En pratique, avec de telles machines, il est courant de retarder la décharge principale d'une durée de l'ordre de la milliseconde. Il est clair que tous les ions produits pendant ce temps sont perdus et que des perturbations considérables (ondes de choc, gaz dans le cylindre, etc...) auront largement le temps de se développer.

Ces inconvénients sont évités avec les moyens de l'invention. En effet, le jet de plasma résulte de forces électrodynamiques et non plus mécaniques, dont l'efficacité est bien supérieure de sorte qu'en moins d'une microseconde, le jet de plasma acquiert les propriétés requises pour que la compression puisse avoir lieu.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, d'exemples de réalisation donnés uniquement à titre explicatif et nullement limitatif. Cette description se réfère à des dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est un schéma général d'une source conforme à l'invention,
- la figure 2 montre une coupe schématique des moyens de formation de plasma par explosion d'une feuille,
- la figure 3 montre un exemple de réalisation de moyens permettant de donner au jet de plasma une forme cylindrique,
- la figure 4 illustre une forme possible pour les électrodes reliées à la feuille.

Le dispositif représenté sur la figure 1 est une source de rayons X mous comprenant une anode 10 et une cathode 12 entre lesquelles un jet cylindrique de plasma 14 est formé. Ce plasma est comprimé par l'effet d'une décharge provoquée par un générateur de

haute tension pulsé 20. Le moyen de production du jet de plasma 14 sera illustré de manière plus détaillée sur la figure 2. Ce moyen est relié à une ligne plate 22 à deux conducteurs, cette ligne étant munie d'un éclateur 24. La ligne est reliée à un banc de condensateurs 26 chargés par une source haute tension 28.

La figure 2 représente, de manière schématique, le moyen de formation du jet de plasma. Tel que représenté, ce moyen comprend une électrode cylindrique centrale 30 reliée à une plaque 32 appartenant à la ligne plate 22 et véhiculant la haute tension, une électrode en forme de tube creux 34 reliée à une autre plaque 36 mise par exemple à la masse. On a donc affaire à des électrodes coaxiales. Une feuille 40 est plaquée contre les électrodes 30 et 34 par des pièces 30' et 34' venant en bout d'électrodes. Le courant faisant exploser la feuille circule donc de la périphérie vers le centre.

Un plasma est créé de part et d'autre de cette feuille lors de l'explosion de celle-ci. Ce plasma est soumis à la force de Laplace $\vec{F} = \overrightarrow{B \wedge v}$ résultant de l'action de l'induction magnétique azimutale $\vec{B}$ créée par le courant et du déplacement des ions à la vitesse $\vec{v}$. Un plasma 14 est donc projeté en direction de la cathode 12 (non représentée sur la figure 2).

Le plasma ainsi produit est dense et froid. Il est accéléré, comme dans un canon de Marshall, et vient pénétrer dans l'espace interélectrode en subissant un épluchage par la couronne 34' qui limite le diamètre extérieur du cylindre de plasma à comprimer. Si le générateur 20 destiné à comprimer le plasma n'est pas connecté, le plasma vient frapper la cathode de la machine et se condense sous forme de couronne. Les dimensions de cette couronne sont très proches de

celles de l'ouverture circulaire qui a délimité le jet (anneau compris entre les pièces 30' et 34'). La quantité de matériau déposé dans la couronne est supérieure à 20% de la masse totale de la feuille, ce qui montre la qualité du cylindre de plasma produit. Celui-ci est en recombinaison rapide au cours de son expansion, mais sera réionisé en un temps inférieur à la nanoseconde quand arrivera l'impulsion de haute tension provenant du générateur pulsé.

Sur le schéma de la figure 2, ce sont la couronne 34' et la pièce 30' qui donnent au jet de plasma sa forme cylindrique. Mais naturellement bien d'autres moyens peuvent être utilisés à cette fin. La figure 3 en donne un autre exemple. On y voit, d'une part, un coin cylindrique 42 servant à fixer la feuille à sa périphérie sur l'électrode 34 et, d'autre part, un disque 44 percé d'une ouverture circulaire 46 qui définit, avec le cylindre 30', une fente circulaire qui donnera au jet de plasma sa forme cylindrique.

La figure 4 représente de manière plus détaillée un exemple de réalisation des deux électrodes 30 et 34. Ces électrodes sont séparées par un cylindre isolant 35. Elles sont, par ailleurs, usinées pour présenter un anneau vide de matière 37 sur le devant duquel sera plaquée la feuille à faire exploser.

Dans un mode particulier de réalisation, le banc de condensateurs 36 est constitué de deux condensateurs de 4nF montés en parallèle. L'énergie est transmise à l'aide d'une ligne plate utilisant une décharge rampante à la surface d'un diélectrique. L'ensemble est chargé à 20 kV et déchargé en quelques 800 ns dans une feuille d'aluminium d'environ 10 microns d'épaisseur. L'ensemble du banc de condensateurs, de la ligne, de l'éclateur et du support de feuille a une inductance limitée de quelques 20 nH pour permettre une décharge rapide.

Les expériences et mesures réalisées par les inventeurs montrent, d'après les impacts laissés sur la cathode, que le cylindre de plasma d'aluminium est bien vide.

Par mesure des dimensions de ces impacts, il a pu être déterminé que le diamètre intérieur est voisin de 20 mm et le diamètre extérieur à peine supérieur à 22 mm, qui est le diamètre du disque qui épluche le plasma à son entrée dans l'espace interélectrode.

En ce qui concerne les matériaux utilisables pour constituer la feuille, ils peuvent être très divers. Tout d'abord, il peut s'agir de corps simples permettant le passage du courant, c'est-à-dire en premier lieu les métaux, avec une préférence pour ceux dont la résistivité n'est pas trop faible, afin que le chauffage par effet Joule ne nécessite pas des énergies prohibitives. Si le cuivre ou l'argent peuvent convenir, on leur préfèrera ainsi l'aluminium, le tungstène, le fer, l'acier inoxydable, l'or, etc... Plus le métal a une faible résistivité plus la feuille devra être choisie mince.

Mais, comme pour la technique des fils explosés, des matériaux réfractaires peuvent également être utilisés.

Un critère essentiel guidant le choix du matériau, est son caractère condensable, c'est-à-dire sa faculté de se déposer sous forme solide sur les parois de l'enceinte où se développe le plasma. Il est en effet important que cette condensation soit bonne afin qu'il n'y ait pas ou peu d'onde de chocs susceptibles de venir perturber le plasma. A cet égard, les inventeurs ont montré que les matériaux très condensables comme le césium étaient particulièrement bien adaptés à cette technique.

On peut aussi utiliser des feuilles composites dans leur composition, en ce sens qu'elles comprennent plus d'un matériau. Par exemple, on peut utiliser une feuille de graphite mince contenant du césium en position intersticielle. On sait que, dans un tel corps, on trouve environ 15 atomes de césium pour un atome de graphite. De cette manière, on obtient l'équivalent d'une véritable feuille de césium.

La feuille peut également être composite dans sa structure, en ce sens qu'elle peut comprendre deux feuilles de matériaux différents. Par exemple, une feuille de tungstène peut être recouverte d'une feuille de matière plastique, comme le polyéthylène. Le tungstène permettra la décharge radiale et provoquera l'explosion de la feuille y compris en plastique ; le plasma en résultant sera à la fois un plasma contenant des ions lourds (en particulier de tungstène) et des ions légers (en particulier de l'hydrogène et du carbone). Comme les ions de tungstène sont beaucoup plus lourds que ceux d'hydrogène et de carbone, on trouvera très vite, à quelque distance de la feuille explosée, un plasma d'hydrogène et de carbone.

Avec de telles feuilles composites, on peut donc former des jets de plasma dont la composition évolue dans le temps. Ce changement de nature du plasma peut conduire à des rayons X mous balayant un certain spectre.

La feuille peut également être constituée de deux feuilles écartées l'une de l'autre et définissant entre elles un volume qui peut être rempli de gaz. Par exemple, deux feuilles d'aluminium de 2 µm d'épaisseur chacune peuvent être écartées de 1 mm, le volume compris entre les deux feuilles étant rempli de gaz, d'argon par exemple. On obtiendra ainsi un plasma d'argon.

On comprend ainsi qu'il existe un très large choix pour le matériau devant constituer la feuille. Pour ce qui est des électrodes coaxiales et des pièces limitant la forme du jet, elles peuvent être en graphite.

Dans la source de l'invention, comme d'ailleurs dans une source classique, les rayons X émis le sont à la fois radialement et axialement. C'est de préférence les seconds qui sont utilisés, ce qui nécessite que la cathode soit percée d'une ouverture en son centre.

## REVENDICATIONS

1. Source intense de rayons X mous, comprenant un moyen pour produire un jet de plasma de forme cylindrique (14) entre une cathode (12) et une anode (10) reliées à un générateur de haute tension pulsé (20), cette source étant caractérisée par le fait que le moyen pour produire le jet de plasma comprend :

- un banc de condensateurs (26) relié à une source de tension de charge (28) et à une ligne de transmission (22) munie d'un organe de déclenchement (24), l'ensemble ayant une très faible inductance pour permettre une décharge rapide,
- une feuille de matériau solide (40) reliée par sa périphérie à l'un des conducteurs de la ligne (36) et par sa partie centrale à l'autre conducteur (32), une décharge radiale pouvant ainsi se produire lorsque l'organe de déclenchement est conducteur, un jet de plasma résultant de l'explosion de la feuille,
- un moyen (30', 34') pour donner à ce jet de plasma une forme cylindrique.

2. Source selon la revendication 1, caractérisée par le fait que la feuille (40) est en métal.

3. Source selon la revendication 1, caractérisée par le fait que la feuille (40) est composite et comprend au moins deux matériaux différents.

4. Source selon la revendication 1, caractérisée par le fait que la feuille est constituée par deux feuilles écartées l'une de l'autre et définissant un volume rempli de gaz.

5. Source selon la revendication 1, caractérisée par le fait que la feuille comprend au moins deux feuilles de matériaux différents plaquées l'une contre l'autre.

6. Source selon la revendication 1, caractérisée par le fait que le moyen pour donner au jet de plasma une forme cylindrique comprend une couronne dont le diamètre intérieur défini le diamètre extérieur du jet.

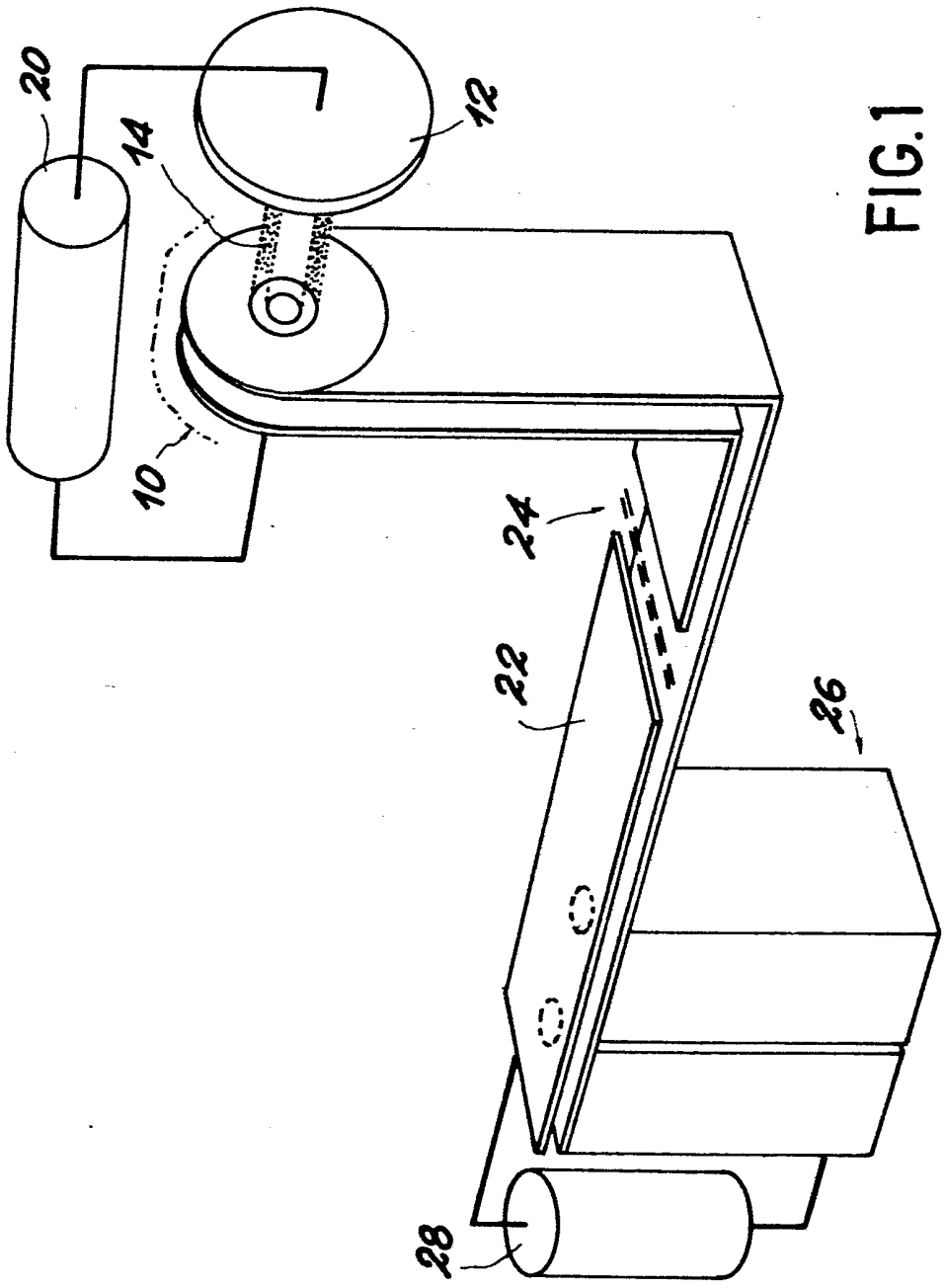



FIG.1

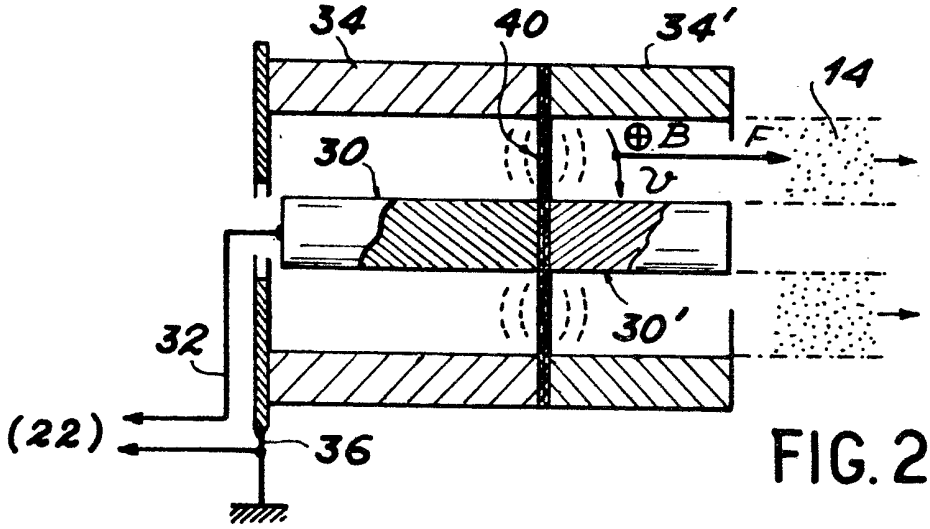



FIG. 2

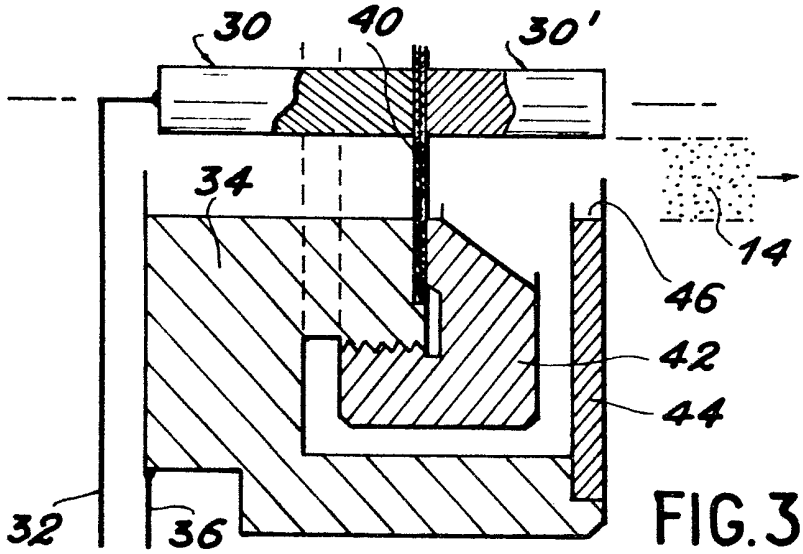



FIG. 3

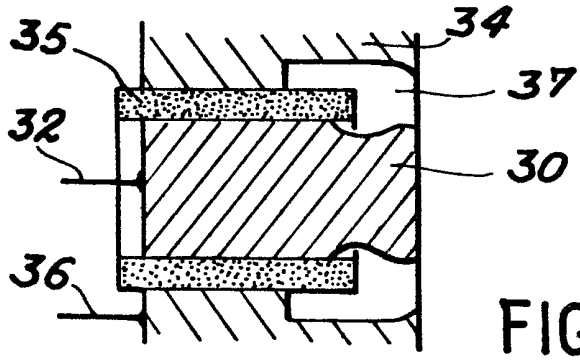



FIG. 4