

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

## URKUNDE

über die Erteilung des  
**Patents**

Nr. 195 32 785

**Bezeichnung:** Ein in der Frequenz einstellbares  
Gyrotron

**Patentinhaber:** Möbius, Arnold, 76344 Eggenstein-  
Leopoldshafen, DE;  
Mühleisen, Markus, 70839 Gerlingen, DE;

**Erfinder:** Dumbrajs, Olgierd, Espoo, FI; Möbius, Arnold,  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen, DE;  
Mühleisen, Markus, 70839 Gerlingen, DE;

**Tag der Anmeldung:** 06.09.1995

München, den 17.4.1997



Der Präsident des Deutschen Patentamts

Dipl.-Ing. N. Haugg



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Patentschrift  
10 DE 195 32 785 C 1

51 Int. Cl. 6:  
H 01 J 23/20  
H 01 J 25/78  
H 01 P 1/202

21 Aktenzeichen: 195 32 785.3-35  
22 Anmeldetag: 6. 9. 95  
43 Offenlegungstag: —  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 17. 4. 97

DE 195 32 785 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:  
Möbius, Arnold, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen,  
DE; Mühleisen, Markus, 70839 Gerlingen, DE

72 Erfinder:  
gleich Patentinhaber

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:  
DE 26 20 769 A1  
US 52 81 894  
US 49 26 093  
SPIRA-HAKKARAINEN, S., et al.: Slotted-Resonator  
Gyrotron Experiments. In: IEEE Transactions On  
Electron Devices, Vol.38, No.6, June 1991,  
S.1544-1552;

54 Ein in der Frequenz kontinuierlich einstellbares Gyrotron

57 Die Erfindung betrifft ein Gyrotron mit einem koaxialen Resonator, dessen Innenleiter mit dem längs der Achse variablen Querschnitts axial verschoben werden kann, wodurch die Resonanzfrequenz kontinuierlich oder einstellbar diskret variiert werden und zudem die Modenselektion beeinflusst werden kann.

DE 195 32 785 C 1

Die Erfindung betrifft ein Gyrotron, das in der Frequenz kontinuierlich durchstimmbaar gemacht werden soll, und umfaßt auch ein Verfahren zur Modenselektion bei einem Gyrotron sowie einen Gyrotronresonator zum Simulieren des Wechselwirkungsraums eines Gyrotrons.

Gyrotrons dienen zur Erzeugung Millimeterwellenleistung, wie sie zur Heizung von Fusionsplasmen oder auch für technologische Prozesse erforderlich sind. Der grundsätzliche Aufbau und die Beschreibung eines Gyrotrons sind z. B. in Meinke Gundlach, Taschenbuch der Hochfrequenztechnik (Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1986) zu finden. Ein speziell den Gyrotrons gewidmetes Buch ist: C. Edgcombe, "Gyrotron Oscillators, Their Principles and Practice", Taylor and Francis 1993, ISBN 0-7484-0019-2, in dem das Prinzip und Kriterien zur Auslegung einzelner Komponenten beschrieben sind.

Während die von einem Gyrotron erzeugte Leistung durch die äußere Beschaltung über einen Bereich von etwa 6 dB kontinuierlich einstellbar ist, ist die Frequenz bei Gyrotrons mit Leistungen größer als 1 kW nur stufenweise durchstimmbaar.

Die US 5 281 894 und die Zeitschrift IEEE Transactions on Electron Devices, Band 38, Nr. 6 (Juni 1981), S. 1544 bis 1552, zeigen solche stufenweise durchstimmbaren Gyrotrons.

Für Anwendungen im Bereich der Diagnostik, des Radars oder der Materialbearbeitung ist jedoch eine kontinuierliche oder diskrete Durchstimbarkeit mit wählbaren Abständen erwünscht.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Gyrotron mit koaxialem Resonator über einen gewünschten Bereich kontinuierlich oder in wählbaren Abständen in der Frequenz durchstimmbaar zu machen und hier durch die Modenselektion zu beeinflussen oder dies zu simulieren.

Diese Aufgabe wird mit dem Gegenstand des Anspruchs 1 bzw. 3 bzw. 4 gelöst. Der Unteranspruch 2 gibt eine vorteilhafte Bauform wieder.

Im folgenden soll ein Ausführungsbeispiel der Erfindung näher erläutert werden. Dazu werden in der Zeichnung drei Figuren aufgenommen.

Fig. 1 zeigt den Längsschnitt durch ein Gyrotron;

Fig. 2 zeigt den Längsschnitt durch eine koaxiale Kavität;

Fig. 3 zeigt einen aus Hohlzylindern aufgebauten Teleskopinnenleiter.

Im Gyrotron propagieren die Elektronen im Hochvakuum auf helixförmigen Bahnen, von einem statischen Magnetfeld (erzeugende Spule 9) geführt, von der Kanone (Bereich A) zur Kavität (1), in welcher sie ihre kinetische Energie an die Hochfrequenzfelder abgeben, und verlassen ihn als verbrauchten Elektronenstrahl in Richtung Kollektor (11).

Der Kollektor (11) ist durch die Isolierungen (12, 10) vom restlichen Aufbau des Gyrotrons galvanisch getrennt.

Das statische Magnetfeld B dient nicht nur zur Führung der Elektronen, sondern legt nach der Gleichung

$$w_c = \frac{e B}{m \gamma} \quad (1)$$

die Zyklotronkreisfrequenz der Elektronen in der Kavi-

tät fest. Dabei ist  $m \gamma$  die relativistische Masse der Elektronen mit der Elementarladung e. Eine Wechselwirkung zwischen Elektronenstrahl und Hochfrequenzfeld findet statt, falls gilt

$$w \approx s w_c \quad (2)$$

wobei s eine ganze Zahl (die Ordnung der Zyklotronharmonischen) ist und w die Resonanzkreisfrequenz des Gyrotronresonators ist. Durch eine schwache, gezielt gewählte Verstimmung von w zu  $s w_c$  läßt sich die Wechselwirkung optimieren.

Bei konventionellen Gyrotrons besteht der Resonator aus einer konisch geformten metallischen Kavität. Dieser Hohlraumresonator wird nahe der Grenzfrequenz betrieben. Die Resonanzkreisfrequenz berechnet sich dann zu

$$w = \frac{c X_{mn}}{R_{eff}} \quad (3)$$

wobei  $X_{mn}$  der Eigenwert des in Gyrotrons üblicherweise schwingenden, transversal elektrischen  $TE_{mn}$  Modes, c die Lichtgeschwindigkeit und  $R_{eff}$  der effektive Radius des Resonators ist. Bei konventionellen Gyrotrons ist der Eigenwert gleich der n-ten Nullstelle der Ableitung der Besselfunktion m-ter Ordnung. Der effektive Resonatorradius entspricht etwa dem mittleren Radius der Kavität und wird durch den Fachmann durch numerische Eigenwertlösung ermittelt.

Hat der konische Hohlraumresonator einen Innenleiter (8), so entsteht ein koaxialer Resonator (Fig. 2). Gyrotrons mit solchen koaxialen Resonatoren werden koaxiale Gyrotrons genannt. Der Eigenwert berechnet sich durch die Lösung der Gleichung:

$$J_m' (X_{mn}) N_m' \left( \frac{X_{mn}}{C} \right) - N_m' (X_{mn}) \cdot J_m' \left( \frac{X_{mn}}{C} \right) = 0 \quad (4)$$

$J_m'$  und  $N_m'$  sind die Ableitungen der Besselfunktionen bzw. Neumannfunktionen m-ter Ordnung und C ist das Verhältnis aus dem Radius des Innenleiters (8) zum Radius der Kavität (1). Das Errechnen der effektiven Radien und der Resonanzfrequenz eines koaxialen Resonators ist für den Fachmann ohne weiteres möglich. Liegt die Geometrie des Resonators fest, so gibt es zu jedem Eigenwert eine bestimmte Resonanzfrequenz. Da die Eigenwerte nicht kontinuierlich sind, haben auch die Resonanzfrequenzen ein diskretes Spektrum. Das stufenweise Durchstimmen wird durch ein stufenweises Einstellen des magnetischen Führungsfeldes im Resonator erreicht (Gleichung 1 und 2). Für jeden Schwingbereich wird die optimale Anpassung der Zyklotronfrequenz zur Resonanzfrequenz durch Nachregeln des Magnetfeldes erreicht. Die Abstände zwischen den Stufen sind proportional zu den Abständen zwischen den Eigenwerten (nach Gleichung 4).

Soll nun das Gyrotron kontinuierlich in der Frequenz durchstimmbaar sein, so muß die Geometrie des Resonators kontinuierlich variiert werden. Beispielsweise kann bei Diagnostikgyrotrons die Kavität längs der Achse in zwei symmetrische Hälften aufgetrennt werden, deren Abstände zueinander einstellbar sind. Durch den Schlitz geht jedoch Leistung verloren, so daß die Ausgangsleistung des Gyrotrons auf unter 1 kW begrenzt wird. Zu-

dem wird die azimutale Symmetrie gebrochen, wodurch Wirkungsgrad und Modenreinheit verringert werden. Ähnlich funktionieren auch quasioptische Gyrotrons, bei denen ein Gaußscher Strahl in einem optischen Resonator schwingt. Die Arbeiten an diesen zunächst erfolgversprechenden Gyrotrons wurden wegen des schlechten Wirkungsgrades seit geraumer Zeit fast vollständig abgebrochen. Der als Quelle des Hochfrequenzfeldes dienende Elektronenstrahl hat ebenfalls einen Einfluß auf die Resonanzfrequenz. Er ist jedoch sehr schwach und von der Energie des Strahles abhängig. Ein Verstimmen der Resonanzfrequenz ohne ein gleichzeitiges Ändern der erzeugten Leistung ist praktisch nicht möglich.

Durch das oben beschriebene stufenweise Durchstimmen wird die Frequenz in großen Schritten variiert. Bei Hochleistungs-gyrotrons liegen die Eigenwerte der einzelnen Moden und damit die Resonanzfrequenzen jedoch dicht beieinander. Das gezielte Anschwingenlassen eines bestimmten Moden wird dadurch erschwert. Durch Einbringen eines Innenleiters (8) können einzelne unerwünschte Moden gezielt unterdrückt und damit der gewünschte Mode bevorzugt werden. Das Errechnen der erforderlichen Innenleiterradien ist für den Fachmann ohne weiteres durchführbar. Unterschiedliche Verhältnisse von Innenleiterradius zum Kavitätsradius führen zu einer unterschiedlichen Bevorzugung bestimmter Moden (Modenselektion).

Gemäß den Patentansprüchen wird die sowohl zur kontinuierlichen Verstimmung wie auch zur Beeinflussung der Modenselektion erforderlicher Veränderung der Resonatorgeometrie nun dadurch erreicht, daß bei einer koaxialen Anordnung der Innenleiter (8) keine zylindrische Form hat, sondern in seiner Gestalt und seiner transversalen Ausdehnung längs seiner Achse variiert. Im einfachen Fall ist die Variation des Innenleiterradius konisch. Durch axiales Verschieben des z. B. konischen Innenleiters (8) kann sowohl die Resonanzfrequenz kontinuierlich, durch Einbringen eines gestuften Innenleiters kann die Resonanzfrequenz in wählbaren Stufen eingestellt werden. Durch das gleiche Verfahren kann auch die Modenselektion verändert werden.

Dazu ist es erforderlich, daß der sich im Hochvakuum des Gyrotrons befindliche Innenleiter (8) ohne Gefährdung des Vakuums axial verschoben werden kann. Dabei gewährleistet eine genaue Führung (7) die axiale Beweglichkeit relativ zum Grundkörper (4) bei Gewährleistung der Konzentrität vom Innenleiter (8) zum Grundkörper (4). Der Grundkörper (4), die Isolierung (3), die Beschleunigungselektrode (5), die Isolierung (2) und die Kavität (1) bilden somit einen konzentrischen Aufbau um den axial verschieblichen Innenleiter (8). Die Integrität des Vakuums im Gyrotron wird durch eine längenveränderliche Vakuumdichtung (6) gewährleistet. Die Potentialunterschiede werden durch die Isolierungen (2, 3, 10, 12) aufrechterhalten.

Die Fig. 1 stellt den Längsschnitt durch ein Ausführungsbeispiel für ein koaxiales Gyrotron mit einem einfachen, axial verschieblichen, konischen Innenleiter (8) dar.

Ein weiteres Ausführungsbeispiel für die Ausgestaltung des Innenleiters zeigt Fig. 3. Dabei besteht der Innenleiter in Form von ineinandergesteckten Elementen (8a bis 8e) und bildet somit einen teleskopartigen Aufbau. Die einzelnen Elemente (8a bis 8e) können nun vorteilhaft unabhängig voneinander bewegt werden. Dadurch kann ein Innenleiter mit einer beliebigen Innenkontur simuliert werden. Die Form der einzelnen

Elemente des teleskopartigen Innenleiters ist nicht auf Zylinder wie in Fig. 3 gezeigt beschränkt. Auch hier sorgen Balgdichtungen (6) an den einzelnen Innenleiter-elementen (8a bis 8e) für die Integrität des Gyrotronvakuums. Die koaxiale Axialführung wird vorteilhaft durch eine Führung (7) gewährleistet.

Wird zur Erzeugung des Gleichmagnetfeldes ein Permanentmagnet (als Ersatz der Spule 9) gewählt, so kann die Zyklotronkreisfrequenz  $\omega_c$  nicht durch eine Veränderung des Magnetfeldes nachgeregelt werden. Um die optimale Verstimmung nach Gleichung 2 zu erreichen, ist ein Nachregeln der Resonanzfrequenz des Resonators erforderlich. Dies wird durch eine axiale Verschiebung des Innenleiters (8) erreicht.

Die Resonanzfrequenz koaxialer Kavitäten (Fig. 1 und 3) und die Modenselektion bei einem Gyrotron lassen sich durch ein axiales Verschieben des Innenleiters (8) relativ zur Kavität (1) auch simulieren, ohne daß dazu das Gyrotron selbst erforderlich wäre.

#### Bezugszeichenliste

- 1 Kavität
- 2 elektrische Isolierung
- 3 elektrische Isolierung
- 4 Grundkörper
- 5 Beschleunigungselektrode
- 6 längenveränderliche Vakuumdichtung (Balg)
- 7 Axialführung des Innenleiters
- 8 Innenleiter, eventuell bestehend aus Elementen (Fig. 3, Pos. 8a bis 8e)
- 9 Magnet
- 10 elektrische Isolierung
- 11 Kollektor
- 12 elektrische Isolierung
- A Bereich der Elektronenkanone

#### Patentansprüche

1. Koaxiales Gyrotron mit einem als Wechselwirkungsraum dienenden Resonator, bestehend aus einem Innenleiter (8) und einem Außenleiter, dadurch gekennzeichnet, daß
  - der Innenleiter (8) in seiner Geometrie sowohl in seinem Querschnitt als auch in seiner Ausdehnung längs der Achse variiert und
  - dieser Innenleiter (8) längs der Gyrotronachse verschiebbar ist,
 wodurch die Resonanzfrequenz des Resonators kontinuierlich oder vorgebar diskret eingestellt und die Modenselektion beeinflußt werden kann.
2. Gyrotron nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß
  - der Innenleiter (8) teleskopartig aufgebaut ist, wobei die einzelnen Elemente (8a bis 8e) individuell verschiebbar sind.
3. Verfahren zur Beeinflussung der Modenselektion eines Gyrotrons, dadurch gekennzeichnet, daß
  - der längs der Achse in seiner Form und Geometrie variable Innenleiter (8) in axialer Richtung verschoben wird.
4. Gyrotronresonator zum Simulieren des Wechselwirkungsraumes eines Gyrotrons, bestehend aus einem Innenleiter (8) und einem Außenleiter, dadurch gekennzeichnet, daß
  - der Innenleiter (8) in seiner Geometrie sowohl in seinem Querschnitt als auch in seiner Ausdehnung längs der Achse variiert und

— dieser Innenleiter (8) längs der Resonatorachse verschiebbar ist, wodurch die Resonanzfrequenz des Resonators kontinuierlich oder vorgebar diskret eingestellt und die Modenselektion beeinflußt werden kann. 5

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

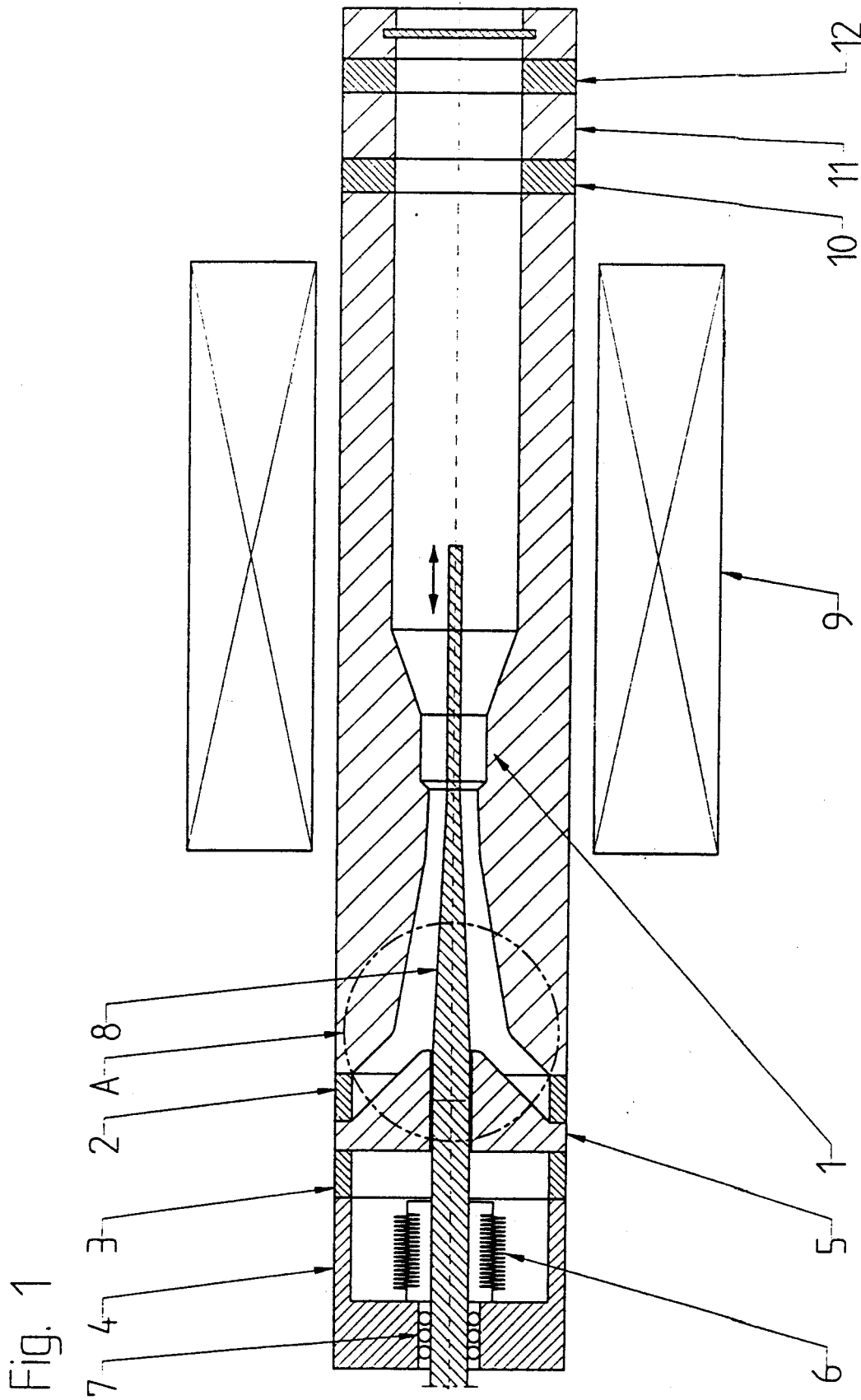


Fig. 1

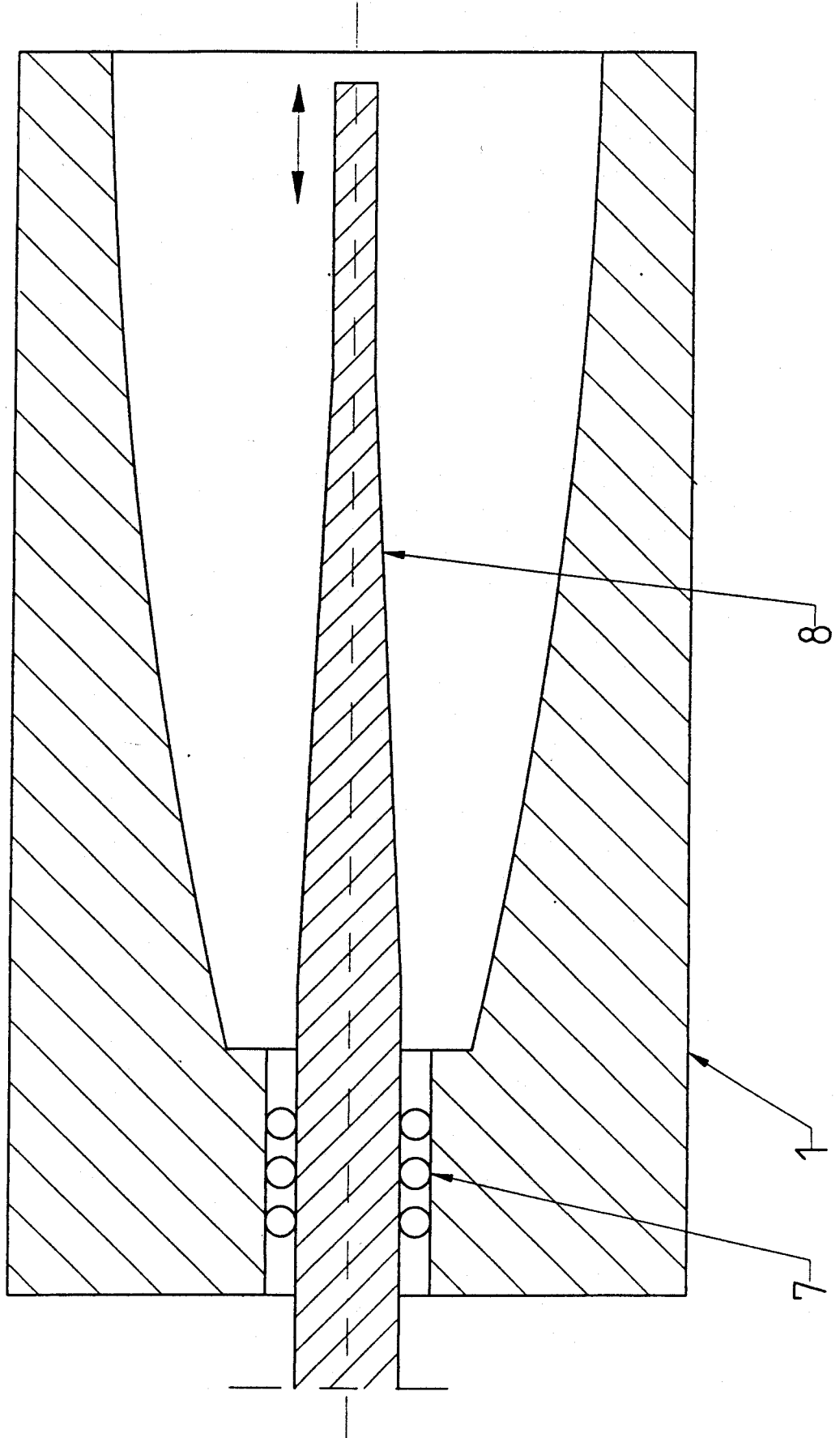


Fig. 2

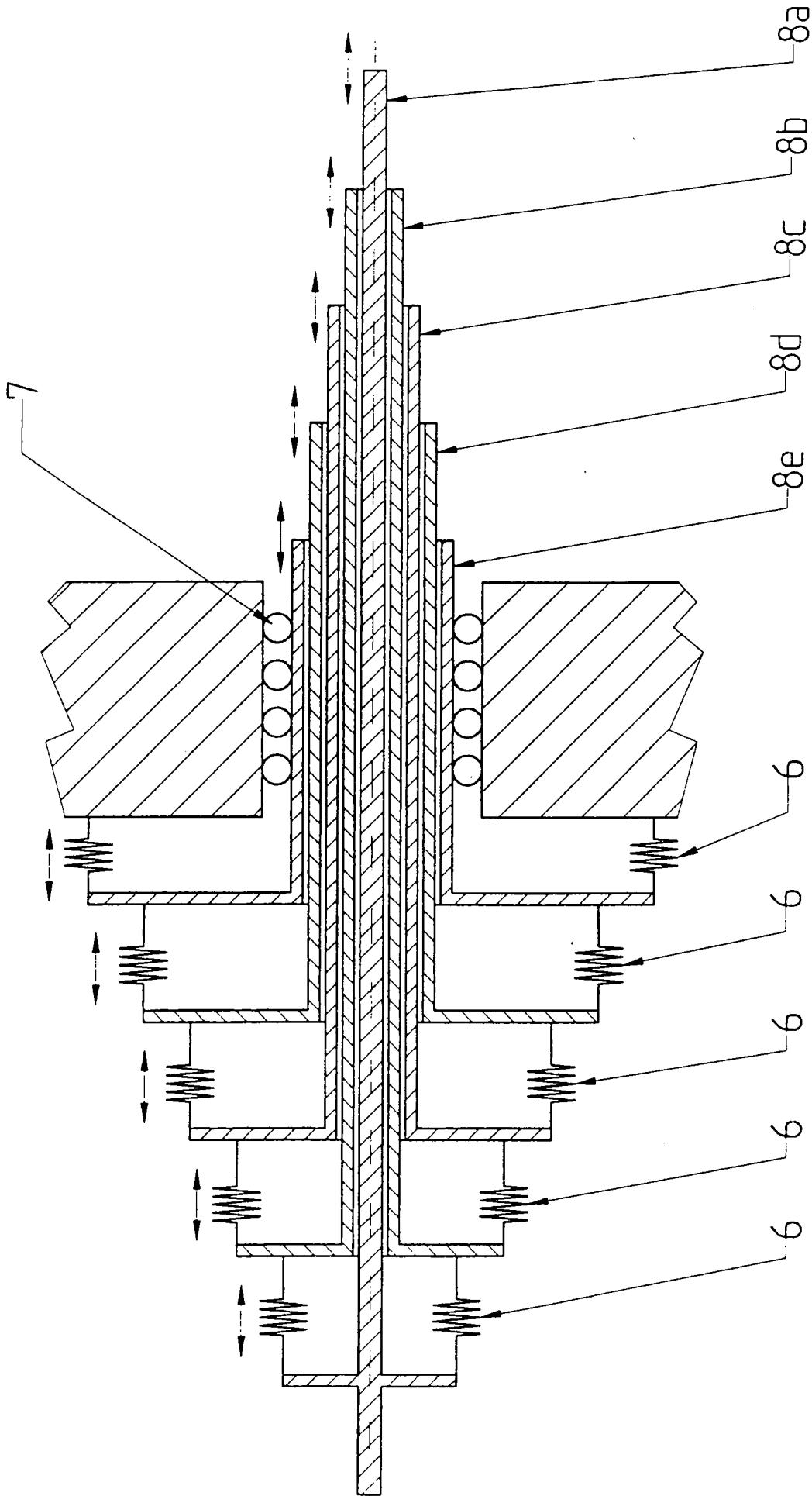


Fig. 3