

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

## URKUNDE

über die Erteilung des

## Patents

Nr. 195 28 343

IPC: H01P 1/26

Bezeichnung:  
Vorrichtung zur reflexionsarmen Absorption von Mikrowellen

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

Erfinder:  
gleich Inhaber

Tag der Anmeldung: 02.08.1995

München, den 22.05.1997



Der Präsident des Deutschen Patentamts

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Norbert Haugg', is written over the printed name.

Dipl.-Ing. N. Haugg



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Patentschrift  
10 DE 195 28 343 C 2

51 Int. Cl. 6:  
H 01 P 1/26  
H 01 P 7/06  
G 01 R 21/02  
H 01 Q 17/00

21 Aktenzeichen: 195 28 343.0-35  
22 Anmeldetag: 2. 8. 95  
43 Offenlegungstag: 13. 2. 97  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 22. 5. 97

DE 195 28 343 C 2

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

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

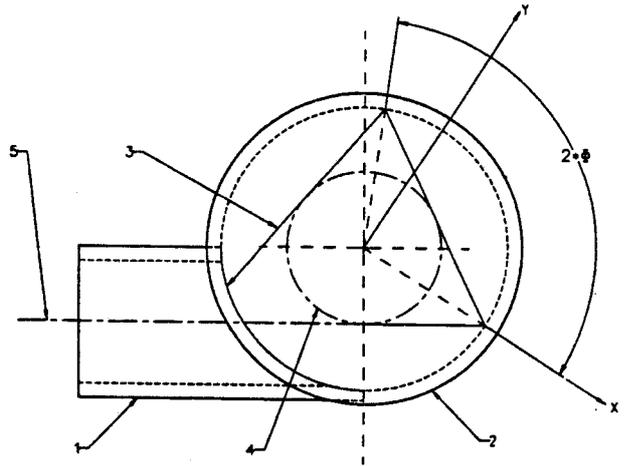
72 Erfinder:  
gleich Patentinhaber

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE	39 01 010 C1
DE	37 31 384 C2
DE	37 13 875 C1
DE	34 26 990 C2
DE	41 21 584 A1
DE-OS	22 49 735
DE-OS	21 64 322
DE-OS	21 54 657
AT	2 26 811
CH	2 61 005
GB	21 89 029 A
EP	03 30 933 A1

54 Vorrichtung zur reflexionsarmen Absorption von Mikrowellen

57 Vorrichtung zur Absorption von Mikrowellen, bestehend aus einem kreiszylindrischen Hohlraum, dessen Wandung oder dessen Volumen absorbierend ausgebildet sind und in dem über eine Öffnung eine Mikrowelle eingekoppelt wird, dadurch gekennzeichnet, daß die Einkopplung der Mikrowelle derart ausgebildet ist, daß die einzukoppelnde Welle in einer solchen Richtung auf die Öffnung trifft, daß der die Ausbreitungsrichtung in der Fenstermitte beschreibende Vektor nicht auf die Achse des kreiszylindrischen Hohlraums zeigt.



DE 195 28 343 C 2

## Beschreibung

Die Erfindung geht aus von einer Vorrichtung zur Umwandlung von Mikrowellen- in Wärmeenergie, gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1, wie sie aus der EP 03 30 933 oder aus der CH 26 1005 bekannt ist.

Die definierte Umwandlung von Mikrowellenenergie in Wärmeenergie wird zu drei Zwecken angewendet:

- der definierten Erhitzung eines Guts (Prozeßanlage)
- der Messung der Mikrowellenleistung (Kalorimeter)
- der Absorption nicht benötigter Leistung (Last)

Die Auslegung solcher Vorrichtungen erfolgt nach folgenden Kriterien:

- Geringe mechanische Abmessungen
- Vermeidung gefährlicher oder brennbarer Materialien
- Möglichst geringe Reflexion der Mikrowellenleistung zur Quelle
- Möglichst örtlich gleichmäßige Absorption in der Last oder im Gut

Während eine Vielzahl möglicher Lasten und Kalorimeter zur Absorption von Mikrowellen der Frequenz von 2,45 GHz und darunter bereits existieren, sind bei höheren Frequenzen und hohen Leistungen nur wenige Lasten bekannt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung zu finden, mit deren Hilfe insbesondere Mikrowellen höherer Frequenz bis etwa 500 GHz absorbiert werden, die allen diesen Anforderungen gerecht wird.

Diese Aufgabe wird mit dem Gegenstand des Anspruchs 1 gelöst. Die Unteransprüche geben Ausführungsarten der Erfindung an.

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

Fig. 1 zeigt die Draufsicht (x-y-Ebene) durch die Vorrichtung

Fig. 2 zeigt eine isometrische Darstellung der Vorrichtung mit stark überdimensioniertem Speisewellenleiter

Fig. 3 zeigt eine Vorderansicht der Vorrichtung mit einem nahe der Grenzfrequenz betriebenen Speisewellenleiter.

Zum Verständnis des Prinzips der Vorrichtung werden die Gleichungen von helixförmig propagierenden TE-Moden (helixförmig propagierende TM lassen sich nach gleichem Prinzip anschreiben) im kreiszylindrischen Wellenleiter, Radius R, angeschrieben:

$$E_{\rho} = \pm z J \frac{m}{k_{\perp} \rho} J_m(k_{\perp} \rho) e^{i(\pm m \phi \pm k_z z - \omega t)}$$

$$E_{\phi} = \mp \phi \pm z J' m(k_{\perp} \rho) e^{i(\pm m \phi \pm k_z z - \omega t)}$$

$$E_z = 0$$

$$H_{\rho} = \pm \phi \gamma_0 \frac{k_{\parallel}}{k} J'_m(k_{\perp} \rho) e^{i(\pm m \phi \pm k_z z - \omega t)}$$

[1]

$$H_{\phi} = i \gamma_0 \frac{m}{k_{\perp} \rho} \frac{k_{\parallel}}{k} J_m(k_{\perp} \rho) e^{i(\pm m \phi \pm k_z z - \omega t)}$$

$$H_z = -(\pm \phi)(\pm z) i \gamma_0 \frac{k_{\perp}}{k} J_m(k_{\perp} \rho) e^{i(\pm m \phi \pm k_z z - \omega t)}$$

wobei

$k = 2\pi/\lambda$  die Wellenzahl,  $\lambda$  die Wellenlänge,

$k_{\perp} = X_{mn}/R$  die transversale Wellenzahl,

$k_{\parallel} = \sqrt{k^2 - k_{\perp}^2}$  die axiale Wellenzahl,

$X_{mn}$  der Eigenwert des Modes m-ter azimuthaler und n-ter radialer Ordnung ist, die Nullstellen der Ableitung der jeweiligen Besselfunktion,

$\rho$  die radiale Koordinate,

$\phi$  die azimuthale Koordinate,

$z$  die axiale Koordinate,

$J, J'$  die Besselfunktion, bzw. deren Ableitung ist,

$\omega = 2\pi f$  die Kreisfrequenz des Modes ist

Moden mit hohem azimuthalem Index m und niedrigem radialem Index n (Whispering Gallery Moden, WGM) zeichnen sich durch hohe Dämpfung in einem kreiszylindrischen Wellenleiter aus. Diese helixförmig propagierenden Moden lassen sich in ebene Wellen zerlegen, die unter dem Brillouin-Winkel  $\beta$  zur Wellenleiterachse propagieren.

$$\sin \beta = X_{mn}/(kR)$$

Im Grenzfall der geometrischen Optik kann die Phasenfront jeder dieser ebenen Wellen durch einen geometrisch optischen (g.o.) Strahl repräsentiert werden, dessen transversale Lage dadurch festgelegt wird, daß an der Wellenleiterberandung die Richtung des Strahls mit der des Realteils des komplexen Poyntingvektors der Mode übereinstimmt. In guter Näherung ergibt das Strahlen, die beim Radius

$$R_c = R \cdot m/X_{mn}$$

eine Kaustik (4) bilden, siehe Fig. 1. In transversaler Richtung wird das Winkelsegment

$$2\Phi = 2 \arccos(m/X_{mn})$$

genau einmal von allen Strahlen getroffen. Die in G11 definierten Moden können somit durch geometrisch optische Strahlen repräsentiert werden, die eine polygonale Helix bilden. Ist in azimuthaler Richtung längs dieser Strahlen die Strecke  $2\pi$  zurückgelegt, so ist in axialer Richtung die Strecke

$$L = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{\sin \Phi}{\Phi} \cdot \cot \beta$$

zurückgelegt. Die Richtung des geometrisch optischen Strahls läßt sich anschreiben als:

$$\hat{n} = -\hat{x} \sin \beta \cos(\Phi + 2s\Phi) + \hat{y} \sin \beta \sin(\Phi + 2s\Phi) + \hat{z} \cos \beta$$

s hat einen ganzzahligen Wert. Aus diesem Grund kann ein Wellenleiter als eine quasioptische Übertragungsleitung zusammenhängender Spiegel (im folgenden Segmente genannt) der Form eines Parallelogramms (Länge: L, Breite:  $R \cdot 2 \cdot \Phi$ ), betrachtet werden (siehe auch Denisov, G. G., et al, Int J. Electronics, 1992, 72, 1079–1091). Da diese Segmente von der gesamten Leistung genau einmal getroffen werden, läßt sich durch Errechnung der Verlustleistung auf diesen Segmenten die Absorption des Wellenleiters ermitteln (siehe hierzu Balanis, C. A., Advanced Engineering Electromagnetics, New York, John Wiley & Sons, 1989, 213 und Möbius et al 1994, IRMM Digest, Sendai, JSAP Catalog Number: AP 941228, Seite 339).

Die vom Generator oder von einem Mikrowellenhohlleiternetzwerk kommende Leistung propagiert bei den für eine Anwendung üblichen Fällen in Form von Wellenleitermoden in einem Speisewellenleiter (SWL) (1) oder in Form von Freiraummoden einer quasioptischen Übertragungsstrecke (q.o.Ü.) in die Vorrichtung. Die Auslegungskriterien der Vorrichtung sind in beiden Fällen gleich, wenn die Achse des SWL mit der optischen Achse der q.o.Ü. gleichgesetzt wird. Die Moden des SWL lassen sich ebenfalls in ebene Wellen zerlegen, die unter dem Brillouinwinkel zur Achse propagieren. Ist der SWL stark überdimensioniert (bei der q.o.Ü. entspricht das einer Strahlentaille groß gegenüber der Wellenlänge) so ist der Brillouinwinkel im SWL klein (die Divergenz des Strahls der q.o.Ü. gering).

Der überdimensionierte SWL (bzw die q.o.Ü.) wird so am kreiszylindrischen Hohlraum (2) angebracht, daß seine Achse (5) mit der Richtung  $\hat{n}$  des geometrisch optischen Strahles (3) übereinstimmt (siehe Fig. 1 und Fig. 2). Diese Figur zeigt den Fall eines rechteckigen SWL, die Anwendung ist jedoch nicht auf diese Geometrie beschränkt, beispielsweise ist auch ein kreiszylindrischer SWL denkbar. Die vom SWL kommende Mikrowellenleistung regt im kreiszylindrischen Wellenleiter den durch diesen g. o. Strahl repräsentierten helixförmig propagierenden Mode (bevorzugt WGM) an. Mit jeder Reflexion an der Wellenleiterberandung verringert sich die Mikrowellenleistung, und damit auch die in Wärme umgesetzte Leistung, falls das Kreiszylindermaterial konstant bleibt. Dieses wird nun so variiert, daß gilt

$$P_{in}/\sqrt{\sigma} = \text{const}$$

wobei  $P_{in}$  die auf ein Segment auftreffende Leistung darstellt,  $\sqrt{\sigma}$  die Leitfähigkeit des Materials bzw. einer Oberflächenbeschichtung ist. Ein Ausführungsbeispiel ist z. B. die Wahl von Kupfer, dann Messing, dann Edelstahl und schließlich absorbierende Keramik oder eine durch ein nichtleitendes Medium eingeschlossene Flüssigkeit. Wird der kreiszylindrische Wellenleiter mit absorbierenden Deckeln (6) abgeschlossen (aus Kostengründen werden an diesen Stellen die absorbierenden Keramiken bevorzugt angebracht), so wird nur noch ein geringer Teil der Millimeterwellenleistung in axialer Richtung reflektiert (aus dem kreiszylindrischen Rohr wird ein kreiszylindrischer Resonator schlechter Güte). In transversaler Richtung behält der Mode jedoch seine Rotationsrichtung bei, so daß er in Richtung

$$\hat{n} = -\hat{x} \sin \beta \cos(\Phi + 2s\Phi) + \hat{y} \sin \beta \sin(\Phi + 2s\Phi) - \hat{z} \cos \beta$$

propagiert. Hat die durch den g.o. Strahl repräsentierte Leistung den Ort des SWL oder der q.o.Ü. erreicht, so stimmt dessen Richtung nicht mit deren Wellenleiterachse überein. Dies reduziert dramatisch die in das Netzwerk reflektierte Leistung.

Der Zylinder wird von außen mit einem Kühlmedium umströmt, bevorzugt wird Wasser gewählt. Werden die Eingangs- und Ausgangstemperatur des Kühlmediums gemessen, so kann die an den Wänden des zylindrischen

Resonators absorbierte Mikrowellenleistung kalorimetrisch gemessen werden.

Die Einkopplung des SWL oder der q.o.Ü. kann mit Hilfe der obigen Gleichungen auch so ausgelegt werden, daß ein rotierender TE11 Mode oder auch ein HE11 Mode angeregt wird (letzteres wird durch die Korrugationen des kreiszylindrischen Hohlraums erreicht). Diese Moden haben nur ein geringes Feld an der Wellenleiterberandung und dadurch eine relativ geringe Dämpfung, jedoch ein starkes relativ homogenes Feld im Bereich der Achse. In diesem Bereich kann ein absorbierendes Material eingebracht werden. Diese Auslegungsform ist eher als Prozeßanlage denn als Last oder als Kalorimeter zu verwenden. Das absorbierende Material dient als Gut.

Wird der SWL nahe der Grenzfrequenz betrieben oder hat die q.o.Ü. eine starke Divergenz so ist der kreiszylindrische Wellenleiter durch eine geeignete Wahl des Radius und des Moden mit Hilfe der obigen Gleichungen so auszulegen, daß die durch den Brillouinwinkel des SWL bzw. den Spreizungswinkel der q.o.Ü. beschriebene Ausbreitungsrichtung ihrer propagierenden einzelnen ebenen Teilwellen gleich der Richtung der geometrisch optischen Strahlen des gewählten Moden im kreiszylindrischen Hohlraum ist. Eine Seitenansicht ist in Fig. 3 zu sehen. Der SWL wird in der x-z- Ebene bevorzugt senkrecht zum kreiszylindrischen Rohr angebracht in der x-y-Ebene wird er wie im obigen Fall um  $R_c$  zur Achse versetzt angebracht. Die einzelnen g.o. Strahlen propagieren wie im in der Fig. 2 dargestellten Fall auf einer polygonalen Helix. Handelt es sich bei dem SWL um einen Rechteckhohlleiter, so wird der darin propagierende Mode durch nur zwei ebene Teilwellen dargestellt, falls einer seiner Indizes gleich null ist. Für diesen Fall ist das gezeigte Prinzip am besten anwendbar. In anderen Fällen müssen aus der Vielzahl möglicher Teilwellen zwei herausgegriffen werden, was die Effizienz der Einkopplung verschlechtert.

Um die für das Prinzip gefährlichen Reflexionen in einen gegensinnig rotierenden Mode stärker zu vermeiden, kann für den Fall von dem Betrieb mit WGM der kreiszylindrische Hohlraum mit einem Innenleiter versehen werden, d. h. eine koaxiale Anordnung gewählt werden. Die Gleichung (1) ist dann so zu erweitern, daß sie für koaxiale Moden gilt. Dies ist für den Fachmann ohne weiteres durchführbar.

#### 25 Bezugszeichenliste

- 1 Speisewellenleiter (SWL)
- 2 kreiszylindrischer Hohlraum
- 30 3 geometrisch-optischer Strahl im kreiszylindrischen Hohlraum
- 4 Kaustik
- 5 Mittelachse des Speisewellenleiters (SWL)
- 6 Deckel des kreiszylindrischen Hohlraums

#### 35 Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Absorption von Mikrowellen, bestehend aus einem kreiszylindrischen Hohlraum, dessen Wandung oder dessen Volumen absorbierend ausgebildet sind und in dem über eine Öffnung eine Mikrowelle eingekoppelt wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Einkopplung der Mikrowelle derart ausgebildet ist, daß die einzukoppelnde Welle in einer solchen Richtung auf die Öffnung trifft, daß der die Ausbreitungsrichtung in der Fenstermitte beschreibende Vektor nicht auf die Achse des kreiszylindrischen Hohlraums zeigt.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein Speisewellenhohlleiter vorhanden ist, in dem der Brillouinwinkel des im Speisewellenhohlleiter propagierenden in den Hohlraum einzukoppelnden Moden klein ist und daß die Achse des Wellenleiters eine Verlängerung des einen rotierenden, Moden des kreiszylindrischen Hohlraums repräsentierenden geometrisch-optischen Strahls darstellt.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß eine quasioptische Übertragungsstrecke vorhanden ist, deren Strahlspreizungswinkel klein ist und daß die Achse der quasioptischen Übertragungsstrecke eine Verlängerung des einen rotierenden Moden des kreiszylindrischen Hohlraums repräsentierenden geometrisch-optischen Strahls darstellt.

4. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein Speisewellenhohlleiter vorhanden ist, in dem der Brillouinwinkel des im Speisewellenhohlleiter propagierenden in den Hohlraum einzukoppelnden Moden groß ist und daß die Ausbreitungsrichtungen seiner propagierenden einzelnen ebenen Teilwellen gleich der Richtung der geometrisch-optischen Strahlen des gewählten Moden im kreiszylindrischen Hohlraum sind.

5. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß eine quasioptische Übertragungsstrecke vorhanden ist, deren Strahlspreizungswinkel groß ist und daß die Ausbreitungsrichtungen seiner propagierenden einzelnen ebenen Teilwellen gleich der Richtung der geometrisch-optischen Strahlen des gewählten Moden im kreiszylindrischen Hohlraum sind.

6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß sich im Zentrum des kreiszylindrischen Hohlraums ein absorbierendes Medium befindet und ein Mode mit einer hohen Feldstärke in der Hohlraummitte bevorzugt TE11 oder HE11, angeregt wird.

7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Material des Hohlraums oder die Oberflächenbeschichtung so variiert wird, daß das Verhältnis von lokal auftreffender Leistung zur Quadratwurzel der Leitfähigkeit konstant ist, so daß die absorbierte Leistung pro Fläche konstant bleibt.

8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß der kreiszylindrische Resonator von einem Kühlmedium umströmt wird, dessen Eingangs- und Ausgangstemperatur gemessen werden kann, so daß die Mikrowellenleistung gemessen werden kann.

9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß durch Einbringen eines Innenleiters aus dem kreiszylindrischen Hohlraum eine koaxiale Anordnung wird.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

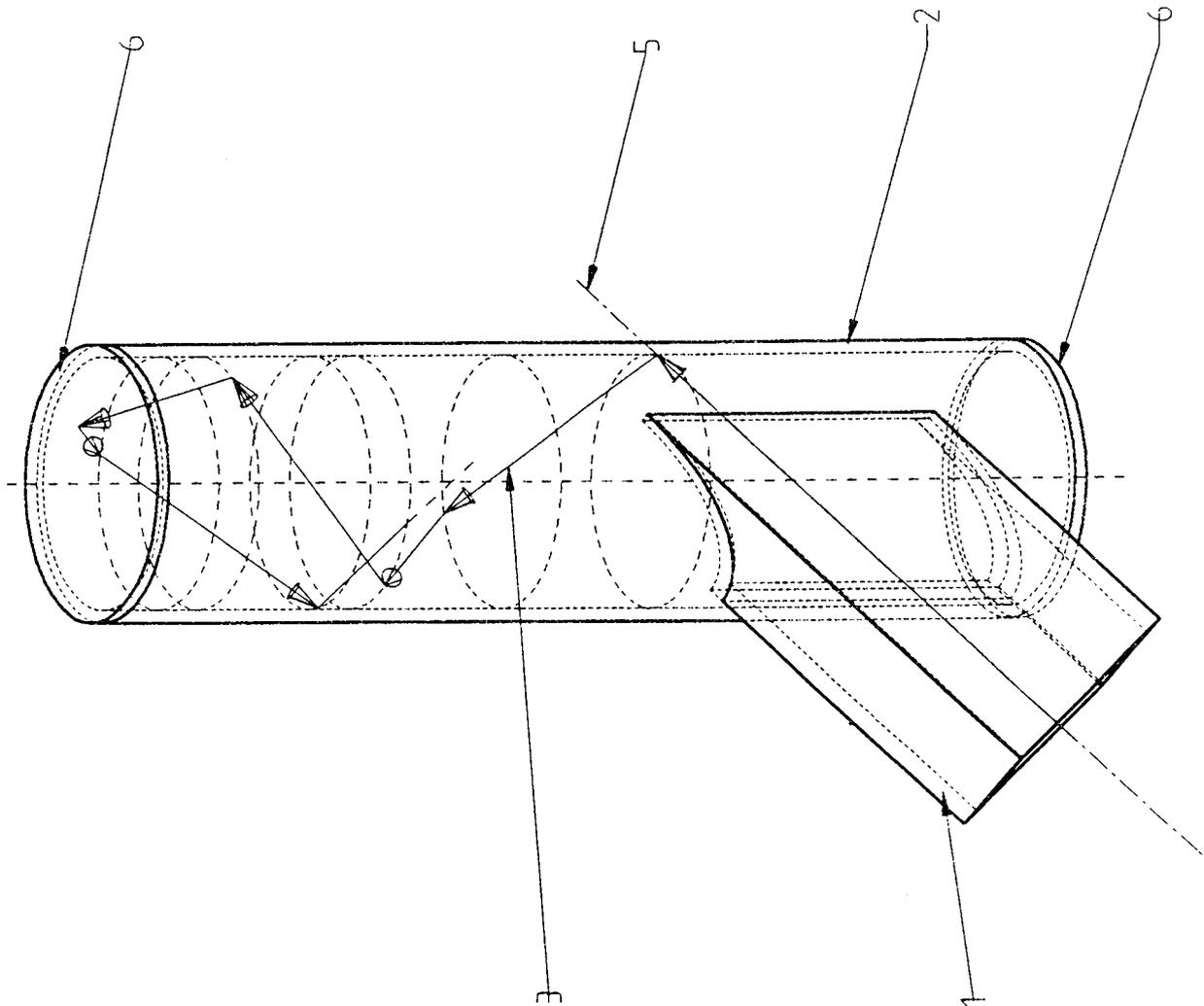


Fig. 2

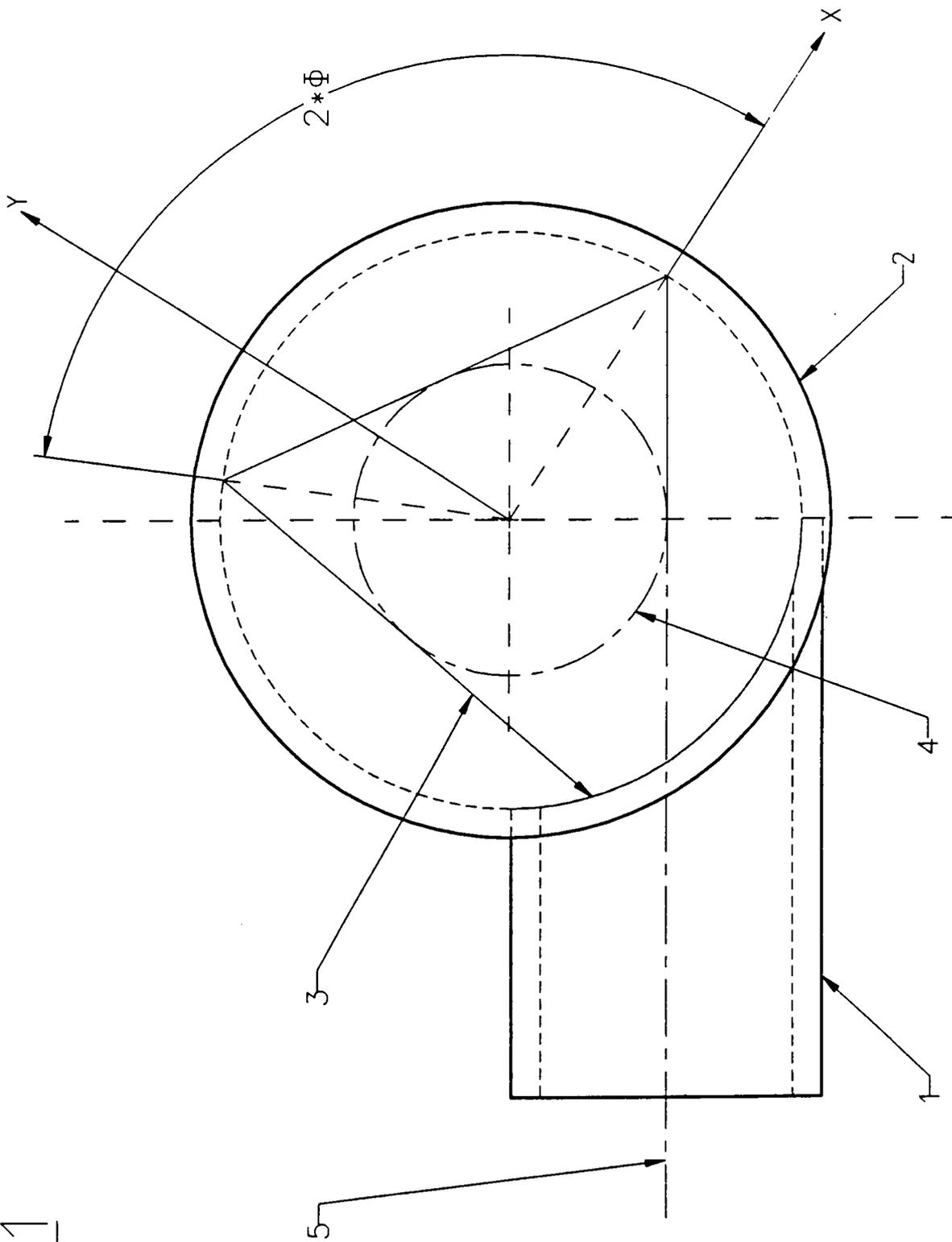


Fig. 1

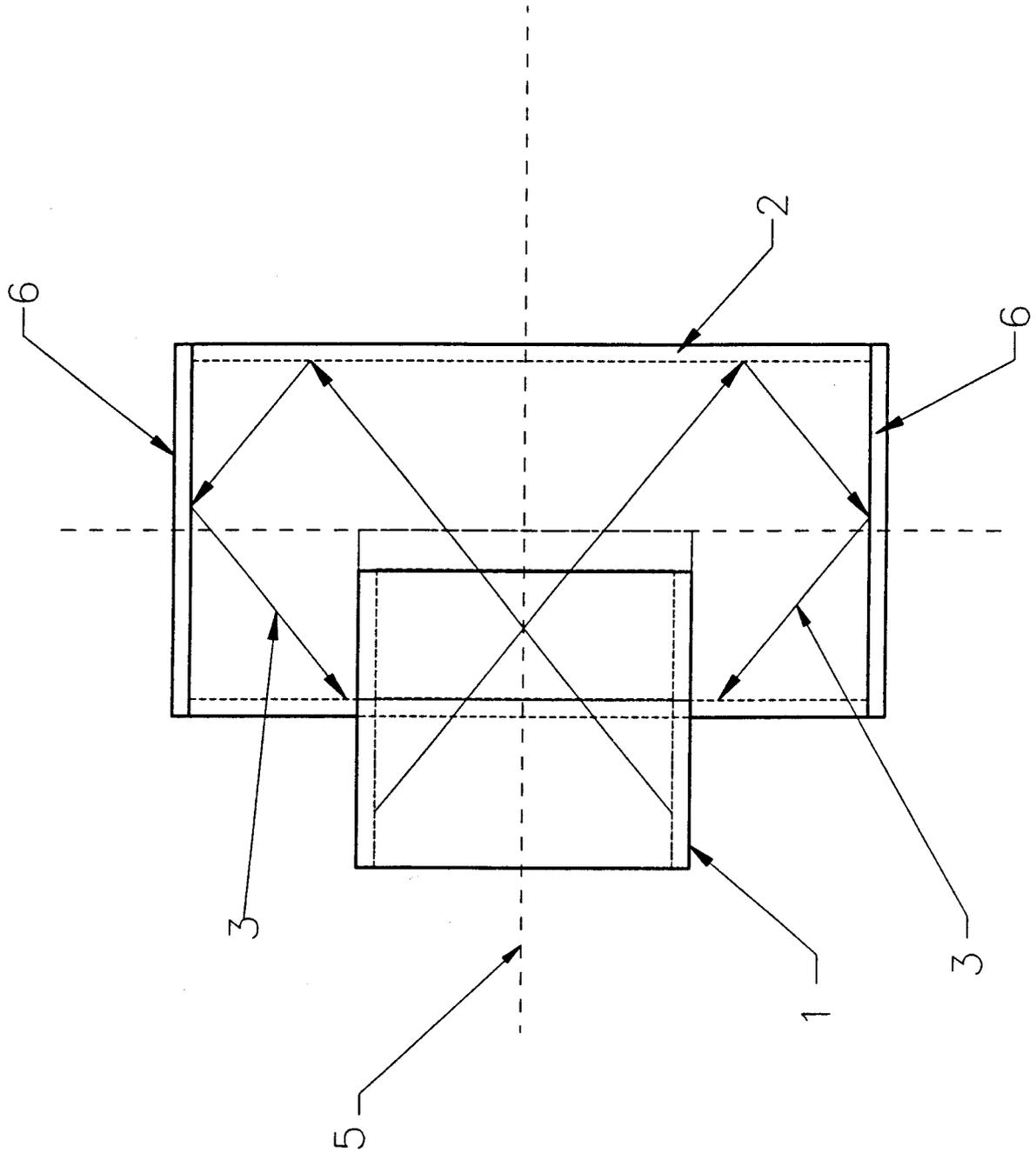


Fig. 3