

⑫ **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

⑰ Anmeldenummer: 88102786.6

⑸ Int. Cl. 4: **H01J 25/02**

⑱ Anmeldetag: 25.02.88

⑳ Priorität: 03.03.87 CH 799/87

㉑ Veröffentlichungstag der Anmeldung: 14.09.88 Patentblatt 88/37

㉒ Benannte Vertragsstaaten: **BE CH DE ES FR GB IT LI NL SE**

⑦① Anmelder: **Centre de Recherches en Physique des Plasmas**
21, Avenue des Bains
CH-1007 Lausanne(CH)

⑦② Erfinder: **Bondeson, Anders, Prof.**
Björcksgatan 44
S-412 96 Göteborg(SE)
 Erfinder: **Isaak, Bernhard, Dr.**
CH. de Montelly 43B
CH-1007 Lausanne(CH)
 Erfinder: **Perrenoud, André**
Rue St. Jean
CH-1260 Nyon(CH)
 Erfinder: **Tran, Minh Quang, Dr.**
Ch. du Boisy 49
CH-1004 Lausanne(CH)

⑦④ Vertreter: **Lück, Gert, Dr. rer. nat.**
c/o ASEA BROWN BOVERI AG
Patentabteilung
CH-5401 Baden(CH)

⑤④ **Hochleistungs-Gyrotron zur Erzeugung elektromagnetischer Millimeter- oder Submillimeterwellen.**

⑤⑦ Die vorliegende Erfindung betrifft ein Hochleistungs-Gyrotron zur Erzeugung elektromagnetischer Millimeter- oder Submillimeterwellen mit einem quasi-optischen Resonator. Dieser wird durch zwei auf einer optischen Achse einander gegenüberliegend angeordnete Hohlspiegel (1, 2) gebildet. Zur Erhöhung der Auskopplungs-Effizienz sowie zur Verminderung der Abstrahlung an die Umgebung wird der quasi-optische Resonator in einem Gehäuse (4) angeordnet, welches wenigstens abschnittsweise elektrisch leitfähig ist.

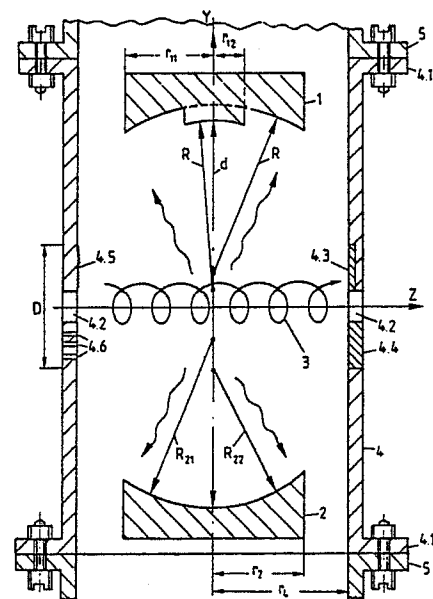


FIG. 1

EP 0 281 858 A1

HOCHLEISTUNGS-GYROTRON ZUR ERZEUGUNG ELEKTROMAGNETISCHER MILLIMETER-ODER SUBMILLIMETERWELLEN

TECHNISCHES GEBIET

Die Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung zur Erzeugung elektromagnetischer Millimeter-oder Submillimeterwellen hoher Intensität. Sie betrifft insbesondere ein Hochleistungs-Gyrotron zur Erzeugung solcher Wellen mit einem quasi-optischen Resonator, welcher durch zwei auf einer optischen Achse einander gegenüberliegend angeordnete Hohlspiegel gebildet wird. Das Hochleistungs-Gyrotron ist vorgesehen zur Verwendung bei der Kernfusion zur Heizung des Fusionsplasmas.

STAND DER TECHNIK

Ein Gyrotron der genannten Art ist beispielsweise bekannt aus einem Artikel von T.A. Hargeaves et al., Int. J. Electronics 57, 977 (1984) oder auch aus einem Artikel von A. Perrenoud et al., Int. J. Electronics 57, 985 (1984).

Der durch die beiden Hohlspiegel gebildete Resonator des bekannten Gyrotrons ist ein sogenannter offener Resonator. Die beiden Hohlspiegel sind, zumindest in ihrer näheren Umgebung, nicht von einem Gehäuse oder dergleichen umgeben.

In dem Gyrotron durchsetzt ein Hochenergie-Elektronenstrahl den Resonator entlang eines magnetischen Feldes. Dabei bewegen sich die Elektronen des Elektronenstrahls entlang des Magnetfeldes auf spiralförmigen Bahnen mit einer der Zyklotronfrequenz entsprechenden Umlauffrequenz, die zur Stärke des Magnetfeldes proportional ist. Sie wechselwirken mit einem im Resonator aufgebauten elektromagnetischen Wechselfeld.

Die im Resonator angeregten Moden sind vom Typ TEM_{mnp} , wobei die Indizes m und n Transversalmoden und der Index p Longitudinalmoden bezeichnen (vgl. auch H. Kogelnik, 1966, Modes in Optical Resonators; Lasers, Vol. 1, herausgegeben von A.K Levine, New York: Marcel Dekker, S. 295). In dem bekannten Gyrotron werden nur die longitudinalen TEM_{oop} -Moden selektiert, da sie die geringsten Diffraktionsverluste aufweisen.

Damit die thermische Belastung der Hohlspiegel bei der in Aussicht genommenen Anwendung bei der Kernfusion nicht zu gross wird (die Feldleistung im Resonator kann einige Megawatt betragen) müssen diese eine gewisse Mindestgrösse aufweisen, die wesentlich (um bis zu zwei Grössenordnungen) grösser als die Wellenlänge der zu erzeugenden elektromagnetischen Strahlung ist. Das p der im Resonator angeregten Moden

liegt dadurch im Bereich zwischen 40 und 400. Dies hat zur Folge, dass der Frequenzabstand zwischen zwei benachbarten Moden TEM_{oop} und $TEM_{oo(p+1)}$ wesentlich kleiner ist als das Instabilitäts-Frequenzband des Gyrotrons, was das Problem einer Moden-Konkurrenz aufwirft (vgl. z.B. Bondeson et al., Infrared and Millimeter Waves 9, 309 (1984)).

Bei dem bekannten Gyrotron ist es jedoch gelungen, den offenen, quasi-optischen Resonator derart auszubilden, dass er moden selektiv ist, d.h. dass in ihm eine TEM_{oop} -Mode allein oder zumindest bevorzugt gegenüber anderen, benachbarten Moden $TEM_{oop\pm 1}$ angeregt wird (vgl. A. Perrenoud et al., Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves 7, 427 (1986) and A. Perrenoud et al., Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves 7, 1813 (1986)).

Dem Vorteil der erzielbaren Moden-Selektivität der offenen Resonatorstruktur stehen jedoch vor allem zwei Nachteile entgegen:

- Die Auskopplungs-Effizienz des Resonators ist durch hohe Abstrahlverluste an die Umgebung relativ schlecht;
- die hohe Abstrahlung des Resonators beeinflusst störend andere in seiner Umgebung installierte Vorrichtung;
- die in der Umgebung des Resonators installierte Vorrichtung kann sich störend auf die Wirkungsweise des Resonators auswirken.

DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Hochleistungs-Gyrotron der eingangs genannten Art anzugeben, das hinsichtlich seiner Auskopplungs-Effizienz verbessert ist, in geringerem Masse seine Umgebung störend beeinflusst und dessen Moden-Selektivität dennoch nicht wesentlich beeinträchtigt oder sogar besser ist.

Diese sowie weitere Aufgaben werden gemäss der vorliegenden Erfindung gelöst durch die Angabe eines neuen Hochleistungs-Gyrotrons mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1.

Die Vorteile der Erfindung sind im wesentlichen darin zu sehen, dass es gelungen ist, eine geschlossene Resonatorstruktur anzugeben, welche hinsichtlich ihren Moden-Selektivität mit der bekannten offenen Resonatorstruktur vergleichbar ist.

Die durch das erfindungsgemäss vorgesehene Gehäuse zusätzlich angeregten, sogenannten nichtgaus'schen Moden sind bezüglich ihrer Intensität gegenüber der oder den gewünschten gaus'schen TEM_{oop} -Moden verhältnismässig schwach

und tolerierbar.

Durch die Erfindung wird die Auskopplungseffizienz auf 100 % erhöht.

Die Abstrahlung an die Umgebung wird durch das erfindungsgemäss vorgesehene Gehäuse praktisch vollständig verhindert. Andere Geräte, wie z.B. Ablenkspulen für den Elektronenstrahl oder ein Prebuncher können in unmittelbarer Nähe des Resonators aufgestellt werden.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den abhängigen Patentansprüchen gekennzeichnet.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Weitere Merkmale und Vorteile der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der nachstehenden ausführlichen Beschreibung insbesondere unter Berücksichtigung der beigegeführten Zeichnungen. Es zeigen:

Fig. 1 in geschnittener Darstellung den Resonatorteil eines Hochleistungs-Gyrotrons nach der Erfindung in einem Gehäuse angeordnet und

Fig. 2 in schematisch-perspektivischer Darstellung eine vorteilhafte Geometrie der Hohlspiegel.

BESTER WEG ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

Es wird nunmehr auf die Zeichnung Bezug genommen. In Fig. 1 sind mit 1 und 2 zwei Hohlspiegel bezeichnet, welche einander gegenüberliegend in einem Abstand d auf einer optischen Achse angeordnet sind. Die optische Achse fällt in Fig. 1 mit einer Koordinatenachse oder Richtung Y zusammen. Die beiden Hohlspiegel 1 und 2 bilden gemeinsam einen quasi-optischen Resonator.

Den quasi-optischen Resonator durchsetzt in der Mitte zwischen den beiden Hohlspiegeln 1, 2 ein Hochenergie-Elektronenstrahl 3 in Richtung einer Koordinatenachse Z senkrecht zur Richtung Y . Derart ausgerichtet ist auch ein in Fig. 1 nicht dargestelltes, weitgehend homogenes Magnetfeld zwischen den beiden Hohlspiegeln 1 und 2. Die Elektronen des Elektronenstrahls 3 bewegen sich auf spiralförmigen Bahnen um die Magnetfeldlinien. Dies ist durch die spiralförmige Linie in Fig. 1 angedeutet.

Der quasi-optische Resonator von Fig. 1 ist in einem Gehäuse 4 angeordnet. Das Gehäuse 4 ist ein Zylinder, dessen Achse mit der optischen Achse der Hohlspiegel 1, 2 zusammenfällt. Es ist, wenigstens überwiegend, elektrisch leitfähig. Die Länge des Gehäuses erstreckt sich über etwas

mehr als den Abstandsbereich d zwischen den Hohlspiegeln 1, 2. Das Verhältnis vom Durchmesser des Gehäuses 4 zum Durchmesser der Spiegel 1, 2 ist ein von der jeweiligen Anwendung abhängiger Parameter. Bei einem Resonator mit 2 % Diffraktionsverlusten gemäss einem Wert von ca. 1,4 für dieses Verhältnis, um die unerwünschten, nicht gaus'schen Moden zu unterdrücken. Gleiches gilt, falls die elektromagnetische Feldleistung nur an einem Ende ausgekoppelt wird. An seinen Enden weist das zylindrische Gehäuse 4 Anschlussflansche 4.1 auf. An die Anschlussflansche sind nur abschnittsweise dargestellte Mikrowellenleiter 5 angeflanscht. Ueber den Mikrowellenleiter 5 werden die im quasi-optischen Resonator erzeugten elektromagnetischen Wellen dem Ausgang des Gyrotrons zugeführt. Das Gehäuse 4 weist schliesslich noch Durchtrittsöffnungen 4.2 für den Elektronenstrahl 3 auf.

Durch das Gehäuse 4 wird die Abstrahlung von elektromagnetischer Strahlung in die Umgebung des quasi-optischen Resonators bzw. des Hochenergie-Gyrotrons praktisch vollständig verhindert und eine optimale Auskopplungs-Effizienz erreicht.

Durch den gewählten Radius des zylindrischen Gehäuses 4 und den dadurch sich ergebenden Abstand der Gehäusewand von den Hohlspiegeln 1 und 2 sind die durch das Vorhandensein des Gehäuses 4 zusätzlich angeregten nicht gaus'schen Moden gegenüber den gewünschten gaus'schen TEM_{oop} -Moden tolerierbar klein.

Die erstrebte Modenreinheit lässt sich insbesondere dadurch verbessern, dass Hohlspiegel 1, 2 mit hohen negativen g -Faktoren bis zu -0.8 verwendet werden. Der g -Faktor ist definiert durch $g := 1 - d/R$, wobei d den gegenseitigen Abstand der Hohlspiegel 1 und 2 und R ihren Krümmungsradius bedeuten.

Weiter verbessern lässt sich die Modenreinheit durch selektive Dämpfung der unerwünschten, nichtgaus'schen Moden. Rechnungen zeigen, dass die stärksten dieser Moden vornehmlich in einem Abschnitt im Bereich der Mitte zwischen den beiden Hohlspiegeln 1, 2 an der inneren Wand des Gehäuses 4 einmal reflektiert werden. Durch Ausbildung zumindest der inneren Oberfläche des Gehäuses 4 in diesem Abschnitt in der Mitte zwischen den beiden Hohlspiegeln 1, 2 in einer elektromagnetische Wellen dämpfenden Weise, können demnach in einfacher Weise die unerwünschten nichtgaus'schen Moden selektiv unterdrückt werden.

In Fig. 1 sind mehrere Möglichkeiten dargestellt, wie das Gehäuse 4 bzw. seine innere Oberfläche im genannten Abschnitt in der Mitte zwischen den beiden Hohlspiegeln 1, 2 ausgebildet werden kann. Es soll jedoch verstanden werden,

dass jeweils nur eine der vier dargestellten Möglichkeiten tatsächlich verwendet wird. Die Möglichkeiten sind:

- Zur Erzielung einer Absorption kann die innere Oberfläche des Gehäuses 4 im genannten Abschnitt mit einer elektromagnetische Wellen gut absorbierenden Schicht 4.3 versehen sein. Die Absorptionsfähigkeit dieser Schicht sollte jedenfalls wesentlich grösser als die Absorptionsfähigkeit der Gehäusewand ausserhalb dieser Schicht sein. Alternativ kann die ganze Gehäusewand im genannten Abschnitt aus einem solchen Material bestehen, vgl. 4.4.

- Zur Erzielung eines Streuungseffektes kann die innere Oberfläche des Gehäuses 4 im genannten Abschnitt mit einer grösseren Rauigkeit als ausserhalb dieses Abschnitts versehen sein, vgl. 4.5. Die Oberfläche könne auch gezahnt, profiliert oder in noch anderer Weise strukturiert sein.

- Die Gehäusewand kann im genannten Abschnitt auch mit Löchern oder Bohrungen 4.6 versehen sein.

Die Ausdehnung D des genannten, in besonderer Weise ausgebildeten Abschnitts des Gehäuses 4 in Richtung Y der optischen Achse der beiden Hohlspiegel 1, 2 sollte sich vorzugsweise über maximal etwa 1/5 des Abstandsbereiches (d) zwischen den Hohlspiegeln erstrecken.

Eine entscheidende Verbesserung der Modenreinheit kann schliesslich noch dadurch erzielt werden, dass Hohlspiegel 1, 2 verwendet werden, die eine stufige Struktur aufweisen, wie dies für den Hohlspiegel 1 in Fig. 1 beispielsweise dargestellt ist. Die Hohlspiegel sollten insbesondere zwei um ein oder mehrere ganz Vielfache der halben Wellenlänge der gewünschten Strahlung stufenförmig gegeneinander versetzte Spiegelflächen aufweisen. Die Radien der gegeneinander versetzten Spiegelflächen, in Fig. 1 mit r_{11} und r_{12} bezeichnet, sollten relativ zueinander so bemessen sein, dass auf alle Spiegelflächen der gleiche Energiefluss entfällt.

Zusätzlich zur Verbesserung der Modenreinheit könnten die vorgenannten Massnahmen auch zu einer Optimierung anderer Parameter, beispielsweise zu einer Verringerung des Radius r_4 des Gehäuses 4 dienen.

Durch Verwendung von Hohlspiegeln 1, 2 mit einer von der sphärischen Geometrie abweichenden Geometrie lässt sich der elektromagnetische Wirkungsgrad des Gyrotrons nach der Erfindung verbessern. Insbesondere sind Hohlspiegel von Vorteil, welche, wie in Fig. 2 beispielsweise dargestellt, in zwei zueinander senkrechten Richtungen X und Z unterschiedliche Krümmungsradien R_x , R_z aufweisen. Die Richtung Z von Fig. 2 soll mit der Z-Richtung von Fig. 1 übereinstimmen.

Andererseits können die Hohlspiegel 1, 2 wie anhand des Hohlspiegels 2 in Fig. 1 beispielsweise dargestellt, in zwei Hälften in Z-Richtung unterschiedliche Krümmungsradien R_{z1} , R_{z2} aufweisen.

Ansprüche

1. Hochleistungs-Gyrotron zur Erzeugung elektromagnetischer Millimeter-oder Submillimeterwellen mit einem quasi-optischen Resonator, welcher durch zwei auf einer optischen Achse einander gegenüberliegend angeordnete Hohlspiegel (1, 2) gebildet wird, dadurch gekennzeichnet, dass der quasi-optische Resonator von einem Gehäuse (4) umgeben ist, welches wenigstens abschnittsweise elektrisch leitfähig ist.

2. Hochleistungs-Gyrotron nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Wand des Gehäuses (4) von der optischen Achse der beiden Hohlspiegel (1, 2) einen Abstand aufweist, der etwa dem 1,4-fachen des Radius (r_{11} , r_{12}) des Hohlspiegels entspricht an dessen Ende die Feldleistung ausgekoppelt wird.

3. Hochleistungs-Gyrotron nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die g-Faktoren der Hohlspiegel (1, 2) negative Werte bis -8 aufweisen.

4. Hochleistungs-Gyrotron nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Gehäuse (4) ein Zylinder ist, dessen Achse mit der optischen Achse der beiden Hohlspiegel (1, 2) zusammenfällt.

5. Hochleistungs-Gyrotron nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass sich das Gehäuse (4) in Richtung der optischen Achse der beiden Hohlspiegel (1, 2) mindestens über den Abstandsbereich (d) zwischen den Hohlspiegeln erstreckt.

6. Hochleistungs-Gyrotron nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass an das Gehäuse (4) zumindest einseitig in Richtung der optischen Achse der beiden Hohlspiegel (1, 2) ein Mikrowellenleiter (5) anschliessbar ist.

7. Hochleistungs-Gyrotron nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass das Gehäuse (4) in einem sich in Richtung der optischen Achse der beiden Hohlspiegel (1, 2) erstreckenden, in der Mitte zwischen den Hohlspiegeln angeordneten Abschnitt in einer der nachfolgenden Weisen ausgebildet ist:

- Die innere Oberfläche des genannten Abschnittes ist mit einer Schicht (4.3) aus einem Material versehen, welches elektromagnetische Wellen stärker absorbiert als das Material des Gehäuses ausserhalb des genannten Abschnittes;
- die innere Oberfläche des genannten Abschnittes ist profiliert, z.B. in Form einer sphärischen Ein-

buchtung, deren Radius mehrere Wellenlängen beträgt, oder mit einer grösseren Rauigkeit versehen als die Oberfläche des Gehäuses (4) ausserhalb des genannten Abschnittes;

- im genannten Abschnitt sind Löcher (4.6) in der Gehäusewand vorgesehen. 5

8. Hochleistungs-Gyrotron nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Abschnitt sich maximal über etwa $1/5$ des Abstandsbereiches (d) zwischen den Hohlspiegeln (1, 2) erstreckt. 10

9. Hochleistungs-Gyrotron nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Hohlspiegel (1, 2) zur Begünstigung der Ausbildung einer einzelnen, gewünschten TEM_{oop} -Mode jeweils mindestens zwei um ein oder mehrere ganze Vielfache der halben Wellenlänge der gewünschten TEM_{oop} -Mode stufenförmig gegeneinander versetzte, zueinander konzentrisch angeordnete Spiegelflächen aufweisen, deren Flächen relativ zueinander so bemessen sind, dass auf sie etwa der gleiche Energiefluss entfällt. 15
20

10. Hochleistungs-Gyrotron nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Hohlspiegel (1, 2) eine von der sphärischen Geometrie abweichende Geometrie aufweisen, welche durch zwei unterschiedliche Krümmungsradien (R_x , R_z) in zwei zueinander senkrechten Richtungen charakterisiert ist und/oder bei welcher die Krümmungsradien in (R_{z1} , R_{z2}) in Richtung des magnetischen Feldes in zwei Hälften der Hohlspiegel unterschiedlich sind. 25
30

35

40

45

50

55

5



EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int. Cl.4)
D,Y	INTERNATIONAL JOURNAL OF INFRARED AND MILLIMETER WAVES, Band 7, Nr. 3, 1986, Seiten 427-446, Plenum Publishing Corp.; A. PERRENOUD et al.: "On the design of open resonators for quasi-optical gyrotrons" * Das ganze Dokument *	1,3,5-7,9	H 01 J 25/02
Y	EP-A-0 124 396 (THOMSON-CSF) * Seite 4, Zeilen 7-22; Seite 5, Zeilen 1-7; Abbildung 1a *	1,3-7,9	
D,Y	INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRONICS, Band 57, Nr. 6, Dezember 1984, Seiten 977-984, London, GB; T.A. HARGREAVES et al.: "Experimental study of a single-mode quasi optical gyrotron" * Das ganze Dokument *	1,4-7	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int. Cl.4)
			H 01 J H 01 P
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort DEN HAAG		Abschlußdatum der Recherche 15-06-1988	Prafer LAUGEL R.M.L.
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus andern Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	
X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur			