



⑫ **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

⑲ Numéro de dépôt : **91401002.0**

⑤ Int. Cl.<sup>5</sup> : **H01P 1/163, H01J 23/36**

⑳ Date de dépôt : **16.04.91**

③ Priorité : **27.04.90 FR 9005402**

⑦ Inventeur : **Mourier, Georges**  
**THOMSON-CSF, SCPI, CEDEX 67**  
**F-92045 Paris la Défense (FR)**

④ Date de publication de la demande :  
**30.10.91 Bulletin 91/44**

⑧ Mandataire : **Guérin, Michel et al**  
**THOMSON-CSF SCPI**  
**F-92045 PARIS LA DEFENSE CEDEX 67 (FR)**

⑧ Etats contractants désignés :  
**CH DE FR GB IT LI**

⑦ Demandeur : **THOMSON TUBES**  
**ELECTRONIQUES**  
**38, rue Vauthier**  
**F-92100 Boulogne-Billancourt (FR)**

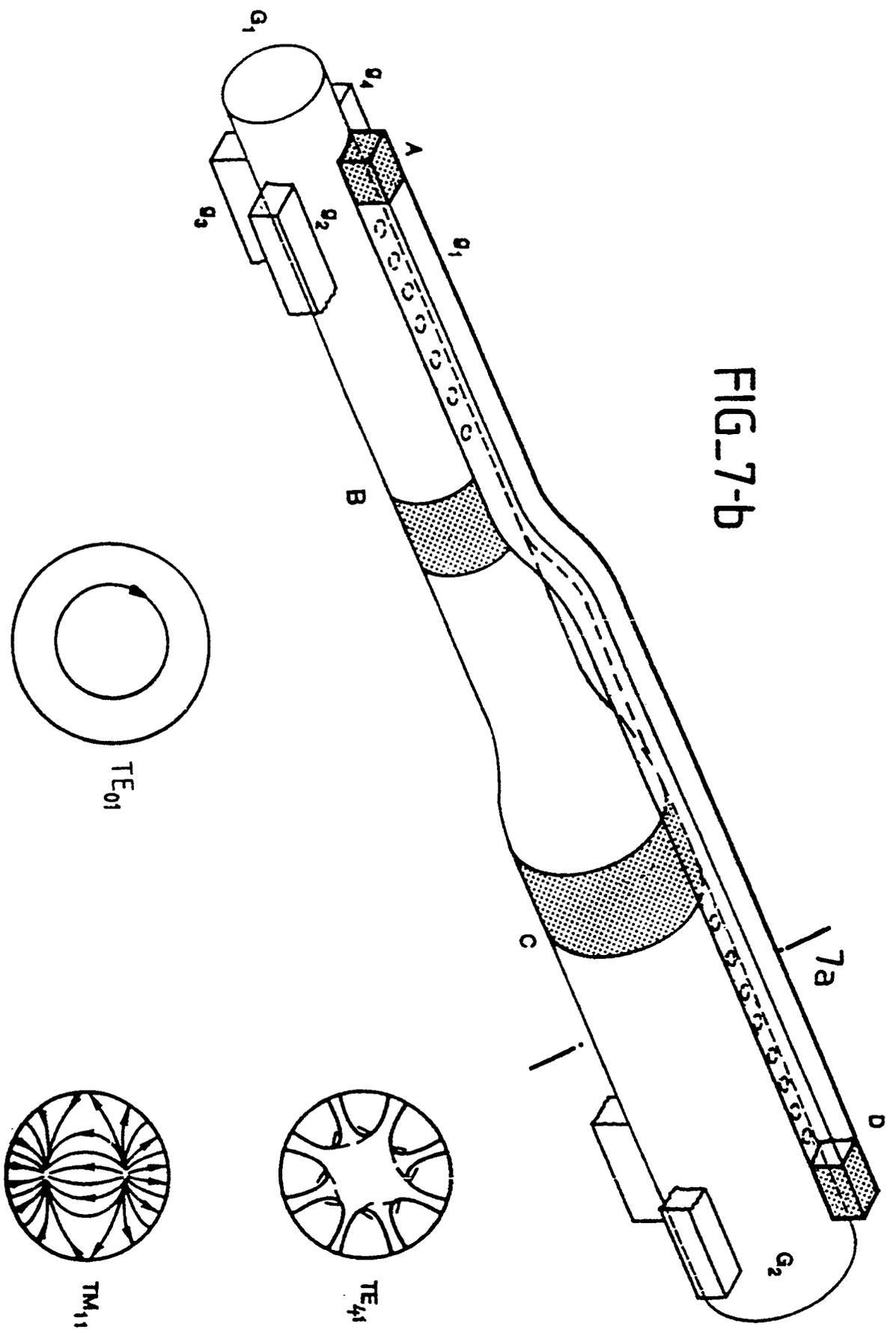
⑤ **Convertisseur de mode de propagation guidée des ondes électromagnétiques, et tube électronique comportant un tel convertisseur.**

⑤ La présente invention propose un convertisseur de mode de propagation guidée des ondes électromagnétiques, comprenant une structure de transition et des moyens de couplage entre cette structure et un guide d'onde apte à propager le mode résultant de la conversion de mode, et comprenant également des moyens de couplage entre la structure de transition et un guide d'ondes ou une source d'énergie électromagnétique hyperfréquence.

Selon une caractéristique importante de l'invention, ladite structure de transition comprend  $l$  guides d'ondes,  $(g_1, g_2, \dots, g_l)$ ,  $l$  étant un nombre entier supérieur à un, choisi en fonction du mode  $TE_{lm}$  à convertir ( $m$  étant également un nombre entier supérieur ou égal à 1); ces  $l$  guides étant couplés à leurs deux extrémités, par des trous de couplage, respectivement à une source d'énergie électromagnétique hyperfréquence ou à un guide  $(G1)$  dans lequel se propage une onde  $TE_{lm}$  de structure complexe, d'une part, et d'autre part à un guide d'ondes  $(G2)$  apte à propager le mode résultant de la conversion.

Selon une autre caractéristique importante de l'invention, la structure de transition comprenant  $l$  guides d'onde est couplée directement sur la cavité de sortie d'un tube hyperfréquence; et, selon une autre caractéristique, ledit tube hyperfréquence est un gyrotron.

FIG-7-b



La présente invention concerne un convertisseur de mode de propagation guidée d'ondes électromagnétiques. Elle trouve ses applications dans tout système de transport de l'énergie hyperfréquence par guide d'ondes, et plus particulièrement dans les systèmes où la source d'énergie hyperfréquence fournit son énergie dans un mode de structure complexe.

5 Le convertisseur de mode faisant objet de la présente invention peut être utilisé sur une ligne de transmission d'énergie hyperfréquence, mais il peut être aussi utilisé directement au niveau du circuit de sortie d'un tube électronique générateur de l'énergie hyperfréquence ; dans cette configuration, le convertisseur fait partie intégrante du tube. Ainsi l'invention a également pour objet un tube hyperfréquence comportant un convertisseur de mode selon l'invention.

10 En effet, il existe maintenant des générateurs de grande puissance en ondes millimétriques ou submillimétriques utilisées notamment pour le chauffage des plasmas en vue de réaliser la fusion thermonucléaire contrôlée. Les puissances fournies peuvent atteindre déjà les 200 kW à 100 GHz par exemple.

Pour ces applications, la source se trouve souvent assez éloignée de la machine à plasma (Tokamak, Stellarator...), ce qui nécessite des guides d'ondes longs de quelques dizaines de mètres. En conséquence, le circuit de propagation doit être conçu pour minimiser les pertes de puissance dans les parties métalliques miroirs ou parois du guide d'onde, ce qui oblige à choisir des modes de propagation de structure simple et avant tout, en guide d'ondes, le mode TE<sub>01</sub> (figure 1).

Pour véhiculer de si grandes puissances à très haute fréquence le guide d'onde doit être largement surdimensionné en diamètre par rapport à la longueur d'onde de l'énergie à transporter. Pour la source 200 kW, 100 GHz citée plus haut, un guide de 6 cm de diamètre, par exemple, est capable de véhiculer cette puissance élevée ; néanmoins ce diamètre représente 20 longueurs d'onde, ce qui veut dire que le guide est capable de véhiculer de très nombreux modes de structure plus ou moins complexe. De plus, la moindre anomalie dans la structure de guidage provoque facilement une transition entre des modes de structure complexe et de nombres propres élevés identiques ou voisins.

25 Rappelons que dans un guide d'onde de section donnée, il peut se propager un nombre infini de modes propres caractérisés par une répartition bien déterminée des champs, et une vitesse de phase V<sub>p</sub> qui dépend de la fréquence f suivant une loi bien déterminée:

$$V_p/C = 1/(1 - (f/f_c)^2)^{1/2},$$

30 C étant la vitesse de la lumière, et f<sub>c</sub> étant la fréquence de coupure du mode considéré, au-dessus de laquelle les ondes peuvent se propager dans ce mode.

Le mode de propagation est en outre caractérisé par une quantité que l'on appelle le nombre propre n. Dans le cas d'un guide circulaire de rayon a,

$$n = 2\pi.a.f/c/C$$

35 Finalement, les utilisations hyperfréquences (dans le cas précité, les machines à plasma) préfèrent l'alimentation en énergie hyperfréquence dans un mode de structure simple (tel le mode TE<sub>01</sub>, par exemple) (voir fig. 1). D'autre part la propagation en guide d'onde engendre les pertes les moins importantes pour le mode TE<sub>01</sub>.

40 Or, comme expliqué précédemment, les sources haute puissance et haute fréquence fournissent en général leur énergie dans un mode de structure complexe (Fig. 2, Fig. 3, Fig. 12) d'où le besoin d'un convertisseur de mode de propagation guidée de très haut rendement.

Dans l'art antérieur, l'on connaît des transformateurs de mode en guide circulaire surdimensionné. La transformation de mode est obtenue par des déformations périodiques des parois du guide d'onde sur 1 ou 2 mètres de longueur (voir figure 4).

45 La réalisation d'un convertisseur selon cette méthode de l'art antérieur est difficile, coûteuse, et délicate. Les ondulations des parois sont d'abord calculées sur ordinateur. Ensuite deux blocs de la matière des guides (du cuivre, par exemple) doivent être usinés dans la masse pour dégager le conduit creux d'énergie, la moitié dans chaque bloc (dans le sens de la propagation). Enfin les deux moitiés sont montées ensemble de façon à former le conduit creux avec les parois déformées périodiquement suivant la longueur. Ensuite, la production industrielle peut être envisagée en utilisant la technique de l'électroformage, par exemple, après réalisation d'un mandrin.

50 Du fait que le guide est largement surdimensionné en diamètre pour supporter la puissance à véhiculer, il existe un danger de conversion parasite vers de nombreux modes qui peuvent se propager. Le moindre défaut de surface ou de géométrie des ondulations des parois engendre inmanquablement une perte de rendement de conversion vers le mode de propagation recherché.

55 La présente invention a pour but de réaliser un convertisseur de modes pour des ondes électromagnétiques qui peuvent être de forte puissance ou de haute fréquence ou les deux, qui ne présente pas les inconvénients des convertisseurs connus de l'art antérieur, tels que décrits ci-dessus.

Notamment, un convertisseur selon l'invention présente une fabrication moins compliquée à réaliser indus-

triellement : d'une part, par ses formes plus accessibles aux méthodes d'usinage traditionnel, et d'autre part, du fait que les tolérances de fabrication sont moins critiques de par la conception du convertisseur.

Par ailleurs, la construction d'un convertisseur selon l'invention permet d'obtenir d'autres avantages dans une utilisation à la sortie d'un tube hyperfréquence de très grande puissance d'énergie électromagnétique, qui s'ajoutent aux avantages de convertisseur seul quand l'énergie est produite à la source avec une structure de mode complexe.

En effet, l'un des problèmes dans la conception d'un gyrotron, par exemple, est que la sortie de l'énergie hyperfréquence se fait généralement par une fenêtre hyperfréquence positionnée à l'extrémité du collecteur d'électrons (voir figure 5) sur l'axe de révolution du tube et perpendiculaire à la direction moyenne de propagation d'électrons dans le tube ; la fenêtre hyperfréquence doit pouvoir supporter la très grande puissance à véhiculer, d'une part, et d'autre part elle doit être protégée contre le bombardement accidentel par des électrons énergétiques qui circulent dans le tube depuis le canon à électrons vers le collecteur.

Selon une caractéristique de l'invention, un convertisseur de mode de propagation est intégré dans la construction d'un tube hyperfréquence tel le gyrotron, par exemple. Le couplage de ce convertisseur se fait sur les parois latérales de la cavité de sortie, et la puissance est véhiculée par ces couplages. C'est-à-dire que la fenêtre unique, dans l'axe telle que montrée sur la figure 5, n'est plus nécessaire, car elle peut ainsi être remplacée par plusieurs fenêtres installées sur les guides latéraux qui font partie du convertisseur selon l'invention (voir figure 9).

Cette caractéristique de l'invention ajoute aux avantages propres au convertisseur de mode selon l'invention, des avantages complémentaires tels que la baisse de puissance à véhiculer à travers chaque fenêtre (en moyenne), et l'impossibilité de bombardement électronique de ces fenêtres grâce à leur position éloignée de l'axe principal du tube et de la trajectoire moyenne des électrons selon l'axe.

Pour atteindre ces buts, la présente invention propose un convertisseur de mode de propagation guidée des ondes électromagnétiques, comprenant une structure dite de transition et des moyens de couplage entre ladite structure de transition et un guide d'onde apte à propager le mode résultant de la conversion de mode à effectuer par ledit convertisseur de mode, et comprenant également des moyens de couplage entre ladite structure de transition et un guide d'ondes ou une source d'énergie électromagnétique hyperfréquence, ces moyens de couplage étant aptes à propager le mode à convertir à l'aide du convertisseur faisant objet de l'invention.

Selon une caractéristique importante non limitative de l'invention, ladite structure de transition comprend  $l$  guides d'ondes,  $l$  étant un nombre entier supérieur à un, choisi en fonction du mode  $TE_{lm}$  à convertir ( $m$  étant également un nombre entier supérieur ou égal à 1) ; ces  $l$  guides étant couplés à leurs deux extrémités, par des trous de couplage, respectivement à une source d'énergie électromagnétique hyperfréquence ou à un guide d'onde dans lequel se propage une onde  $TE_{lm}$  de structure complexe, d'une part, et d'autre part à un guide d'ondes apte à propager le mode résultant de la conversion de mode.

Selon une autre caractéristique importante de l'invention, ladite structure de transition comprenant  $l$  guides d'onde est couplée directement sur la cavité de sortie d'un tube hyperfréquence générateur d'énergie électromagnétique hyperfréquence dans un mode  $TE_{lm}$  ; et, selon une autre caractéristique, ledit tube hyperfréquence est un gyrotron.

Selon une autre caractéristique de l'invention, on couple ces guides à un deuxième guide central unique fonctionnant dans un mode différent de celui du premier guide (ou cavité).

Selon une autre caractéristique importante de l'invention, les  $l$  guides sont couplés directement sur la cavité de sortie d'un tube hyperfréquence fonctionnant en mode  $TE_{lm}$  et chaque guide d'onde comporte une fenêtre hyperfréquence étanche au vide et transparent à l'énergie électromagnétique hyperfréquence, de façon à ce que la puissance hyperfréquence  $P$  produit par ledit tube soit véhiculée par les  $l$  guides à travers  $l$  fenêtres et donc la puissance qui traverse chaque fenêtre est de  $P/l$  en moyenne.

De cette manière le chauffage de chaque fenêtre par des pertes diélectriques de transmission de l'énergie électromagnétique peut être réduit vis-à-vis d'une construction à fenêtre unique, et par ailleurs les possibilités de refroidissement de ces  $l$  fenêtres sont plus faciles à réaliser, en raison de leurs dimensions réduites et d'une facilité accrue d'accès périphérique pour le refroidissement de ces fenêtres.

D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture de la description faite ci-après de quelques réalisations données à titre d'exemples non limitatifs, avec référence aux dessins ci-annexés dans lesquels :

La figure 1 représente les lignes de champ électrique du mode de propagation  $TE_{01}$  ;  
 la figure 2 représente les lignes de champ électrique du mode de propagation  $TE_{34}$  ;  
 la figure 3 représente les lignes de champ électrique du mode de propagation  $TE_{93}$  ;  
 la figure 4 représente en coupe longitudinale, dessinée par ordinateur, un convertisseur de mode selon l'art antérieur ;

- la figure 5 représente schématiquement et en coupe longitudinale un gyrotron selon l'art antérieur ;  
la figure 6a représente schématiquement et en coupe longitudinale un coupleur hyperfréquence connu de l'art antérieur ;  
la figure 6b représente schématiquement le transfert de puissance selon la direction de propagation dans le coupleur de la figure 6a ;  
5 la figure 7a représente schématiquement en coupe transversale un exemple d'une réalisation d'un convertisseur de mode selon l'invention ;  
la figure 7b montre schématiquement en perspective un exemple d'une réalisation d'un convertisseur de mode selon l'invention ;  
10 la figure 8 montre schématiquement en perspective un exemple d'une réalisation d'un convertisseur de mode selon l'invention intégré sur la cavité d'un gyrotron ;  
la figure 9 montre schématiquement en perspective un autre exemple d'une réalisation d'un convertisseur de mode selon l'invention, intégré sur la cavité d'un gyrotron, avec des fenêtres hyperfréquences intégrées sur les guides de couplage ;  
15 la figure 10 montre schématiquement en perspective un exemple d'une réalisation d'un convertisseur de ce mode selon l'invention, coude en 90° ;  
la figure 11 montre schématiquement en plan un exemple des guides d'onde faisant partie d'un convertisseur de mode selon l'invention, dans lesquels un déphaseur permet d'obtenir une variation de phase dans le convertisseur selon la longueur ;  
20 La figure 12 représente les lignes de champ électrique du mode de propagation  $TE_{51}$ .  
Les figures représentent des exemples non limitatifs de réalisations, sur lesquelles les mêmes repères désignent les mêmes éléments sur les différentes figures. D'autres réalisations selon l'invention ou ses principales caractéristiques seront facilement imaginées par l'homme de l'art.
- Sur la figure 1, l'on voit que les lignes de champ électrique de mode  $TE_{01}$  en propagation en guide de section circulaire sont des cercles concentriques et coaxiaux avec l'axe du guide. La simplicité de ce diagramme correspond avec l'efficacité de livraison de puissance hyperfréquence en ce mode de propagation.
- Sur la figure 2, l'on voit que les lignes de champ électrique du mode  $TE_{34}$  en propagation en guide de section circulaire sont considérablement plus compliquées, car elles présentent une symétrie azimutale d'ordre 3, ainsi que quatre lignes nodales radiales. Ce diagramme correspond au mode de propagation d'une source gyrotron fonctionnant à des fréquences modérées.
- Sur la figure 3, l'on voit que les lignes de champ électrique du mode  $TE_{93}$  en propagation en guide de section circulaire sont considérablement plus compliquées encore, car elles présentent une symétrie azimutale d'ordre 9, ainsi que trois noeuds radiaux. Ce diagramme correspond au mode de propagation d'une source gyrotron fonctionnant à des fréquences élevées.
- 35 Sur la figure 4, l'on voit en coupe longitudinale un tronçon d'un convertisseur de mode connu de l'art antérieur. Il s'agit d'un tronçon de guide circulaire avec des corrugations ou des ondulations sur les parois selon la longueur. Ces ondulations sont calculées par ordinateur de façon à déterminer les modes de propagation qui seront supportés dans le guide, compatibles avec les équations de Maxwell et les conditions imposées sur les champs électromagnétiques à l'interface air/métal, par exemple la nullité des champs électriques parallèles à la surface d'un conducteur électrique.
- 40 Sur la figure 5, l'on voit en coupe longitudinale un gyrotron connu de l'art antérieur. Ce gyrotron est d'une géométrie symétrique autour d'un axe de révolution indiqué en pointillé sur la figure. Un fort courant électronique est généré à la surface émissive 52 de la cathode 51 et accéléré par les première 53 et deuxième 54 anodes. La divergence du faisceau électronique dans le canon à électrons due à la charge d'espace est évitée par l'application d'un champ magnétique axial produit par un courant électrique circulant dans les bobines 513. Les hautes tensions d'accélération sont appliquées aux conducteurs du canon à électrons qui sont isolés électriquement les uns des autres à l'aide des éléments céramiques 514. Les électrons décrivent un mouvement cyclotronique relativiste autour des lignes de champ magnétique générées par des bobines supraconductrices 511. Le couplage entre l'énergie cinétique azimutale des électrons et l'énergie hyperfréquence se produit dans la cavité 55. Après cette interaction les électrons sont récoltés sur les parois du collecteur 57 où leur énergie résiduelle est convertie en chaleur à l'impact avec les parois, et évacuée par le circuit de refroidissement 510,512. L'énergie hyperfréquence est propagée dans le collecteur, et doit traverser la fenêtre hyperfréquence 58. Cette fenêtre est généralement réalisée en céramique, et doit être étanche au vide interne du tube mais transparente à l'énergie hyperfréquence. L'énergie hyperfréquence HF est ensuite livrée dans le sens de la flèche, à l'aide du guide de sortie 59, au circuit d'utilisation non montré.
- 55 Comme l'on voit sur la figure et d'après l'explication schématique que l'on vient de donner, la propagation des électrons du canon au collecteur est selon l'axe du gyrotron, donc vers la fenêtre céramique qui se trouve à l'extrémité du collecteur. Cependant, il est impératif que les trajectoires des électrons soient assez divergen-

tes dans le collecteur 57 pour finir toutes sur les parois du collecteur, car l'impact éventuel des électrons sur la fenêtre 58 la détruirait et rendrait le tube inutilisable. Ce problème est en fait assez difficile à résoudre, et diverses méthodes sont mises en oeuvre dans les réalisations pratiques du gyrotrons. Une des réalisations caractéristiques de convertisseur de mode selon l'invention permet de résoudre ce problème comme l'on verra plus loin.

Sur la figure 6, l'on voit un coupleur hyperfréquence à trous connu de l'art antérieur ; la figure 6a montre le coupleur physique de façon schématique en coupe longitudinale, et la figure 6b montre graphiquement le transfert de puissance selon la longueur du coupleur. Comme l'on voit sur la figure 6a, la puissance P1 est introduite dans le guide d'onde 1 qui est orienté parallèlement à un autre guide d'onde 2, et les deux guides sont rendus solidaires dans la région de couplage de façon à ce qu'une partie de la paroi du guide 1 est contiguë avec une partie correspondante du guide 2, au moins sur toute la longueur de la région de couplage ; pratiquement, ceci peut être réalisé avec une seule et unique paroi qui sépare les deux guides au moins dans la région de couplage. Aussi, sur toute la longueur de la région de couplage, des trous de couplage sont pratiqués dans la paroi qui sépare les deux guides, et le couplage électromagnétique à travers ces trous de couplage permet le transfert de la puissance hyperfréquence P1 du guide 1 vers le guide 2. Le graphique de la figure 6b montre, pour un coupleur idéal, le transfert de puissance P1 dans le guide 1 vers le guide 2 selon la longueur du coupleur ; à la fin de la région de couplage de longueur L, l'on retrouve la puissance P2(L) dans le guide 2. Dans le cas d'un coupleur idéal,  $P1(0) = P2(L) = P$ , et le transfert de puissance selon la direction de propagation  $z$  suit approximativement :  $P1(z) = P \cos^2(\pi \cdot z/2L)$ ,  $P2(z) = P \sin^2(\pi \cdot z/2L)$ .

La figure 7 représente schématiquement en coupe transversale (7a) et perspective (7b) un exemple d'une réalisation d'un convertisseur de mode selon l'invention ; la coupe de la figure 7a est représentative et montre la configuration, par exemple, aux deux points 7a indiqués sur la figure 7b.

Le guide circulaire G1 est censé, dans cet exemple de réalisation d'un convertisseur de mode selon l'invention, véhiculer une onde électromagnétique hyperfréquence de mode complexe, par exemple le mode TE<sub>41</sub> montré en vignette, qui sera convertie en mode désiré dans le guide circulaire G2 à l'aide du convertisseur selon l'invention, par exemple le mode TE<sub>01</sub> montré en vignette.

Selon la symétrie azimutale d'ordre  $l$  du mode à convertir en mode TE<sub>01</sub>, un nombre  $l$  de guides rectangulaires sont accolés sur la paroi du guide G1, orientés parallèlement à l'axe de ce dernier et distribués sur le pourtour de façon symétrique tel que montré sur la figure 7a. Dans cet exemple non limitatif d'une réalisation de convertisseur de mode selon l'invention, le mode à convertir TE<sub>41</sub> montre une symétrie azimutale d'ordre 4 ; ainsi tel que montré sur la figure 7a, les  $l$  guides rectangulaires sont au nombre de quatre ( $l = 4$ ), et sont placés équidistant les uns des autres sur la paroi du guide circulaire G1, c'est-à-dire à l'intervalle de 90° ou de façon équivalente  $2\pi/4$  radians. Sur la figure 7b, les quatre guides rectangulaires sont indiqués par les repères g1, g2, g3, g4 ; mais seulement le guide g1 est montré complètement, les autres guides rectangulaires étant identiques à ce dernier.

La puissance hyperfréquence est transférée du guide G1 dans les quatre guides g1, g2, g3, g4 par des trous de couplage ; la symétrie azimutale d'ordre  $l$  du mode de propagation à convertir dicte une répartition de puissance identique dans les  $l$  guides rectangulaires. La puissance hyperfréquence injectée dans le guide G1 peut se retrouver intégralement dans les  $l$  guides rectangulaires si plusieurs conditions sont remplies :

- Les pertes ohmiques ou autres doivent être négligeables.
- Les vitesses de phase des deux modes propagés dans le guide circulaire et dans les  $l$  guides rectangulaires doivent être égales, compte tenu de leur modification par la présence des trous.
- La longueur L sur laquelle les trous s'étendent doit avoir une valeur bien précise qui dépend de l'intensité du couplage produit par les trous et de leur nombre par unité de longueur.

Les dimensions des trous et la longueur L du couplage sont choisies en fonction de plusieurs critères, notamment : l'intensité des champs électriques dans les trous, qui peut conduire à des arcs, ce que l'on évite en utilisant un grand nombre de petits trous sur une grande longueur ; présence d'autre modes dans les guides à la fréquence de fonctionnement. On peut éviter l'excitation de ces modes parasites si leur vitesse de phase est différente de la vitesse de phase des modes utilisés, car les différences de phase avec les modes indésirés changent de signe plusieurs fois le long des guides, ce qui empêche les excitations locales de s'additionner de manière constructive.

Dans l'exemple d'une réalisation d'un convertisseur de mode selon l'invention telle que montrée sur la figure 7, l'on voit que les quatre guides rectangulaires sont excités en phase car les cartes de champs autour des points de couplage sont identiques, comme l'on voit sur la vignette qui représente les lignes de champ de mode TE<sub>41</sub>. A l'abscisse de B, le long de l'axe principal, la conversion du mode excité en G1 vers les quatre guides g1, g2, g3, g4 est complète ; il n'y a donc plus de puissance dans G1. Il est toutefois indiqué de placer une charge constituée par un absorbant (partie hachurée sur le dessin à l'abscisse de B), de préférence sans réflexion sur aucun mode de manière à éviter toute réflexion vers le générateur, suivant une technique habi-

tuelle pour les coupleurs. De même, les quatre guides  $g_1, g_2, g_3, g_4$  sont reliés en A et en D à des charges adaptées, et le guide G2 est terminé par une charge adaptée à l'abscisse de C.

Au-delà de B, les quatre guides  $g_1, g_2, g_3, g_4$  sont prolongés suivant un parcours comportant en général une sinuosité de manière à pouvoir être accolés à un guide G2 dont le diamètre sera différent de celui de G1. En effet, ces deux guides propagent par hypothèse des modes différents et doivent avoir la même vitesse de phase, qui est aussi celle des quatre guides  $g_1, g_2, g_3, g_4$ . Il est également possible que G1 et G2 aient le même diamètre, mais les quatre guides  $g_1, g_2, g_3, g_4$  doivent alors changer progressivement de section entre G1 et G2 au lieu de présenter une sinuosité. La règle est que les quatre guides  $g_1, g_2, g_3, g_4$  doivent avoir dans la région comprise entre A et B la même vitesse de phase que le mode transporté par G1 ( $TE_{41}$  dans l'exemple de la figure 7) et, dans celle comprise entre C et D, la même vitesse de phase que celui transporté par G2 ( $TE_{01}$  dans cet exemple).

Le fonctionnement est assuré de la manière suivante : dans la section de G1, les quatre guides répartis sur la circonférence sont couplés au mode  $TE_{41}$  à des points qui sont en phase car les cartes de champs autour de ces points sont identiques. Les quatre guides sont donc excités en phase, et, comme indiqué plus haut, les dimensions des trous et la longueur AB sont choisies pour permettre le transfert complet de la puissance vers ces quatre guides.

Dans le guide G2, les quatre guides peuvent exciter tout mode présentant des phases identiques à des régions séparées de  $90^\circ$ . Mais les excitations locales de tous les trous ne s'ajoutent en phase que pour les modes qui possèdent la même vitesse de phase que les modes des guides  $g_1, g_2, g_3, g_4$  dans cette région. On aura choisi le diamètre de manière que le mode  $TE_{01}$  remplisse cette condition, dans l'exemple de la Fig. 7 ; on aura choisi les dimensions des trous et la longueur CD de manière que toute la puissance propagée dans les quatre guides  $g_1, g_2, g_3, g_4$  soit transférée dans G2.

Cet exemple illustre une autre propriété de filtre de mode de l'arrangement objet de l'invention. En effet, le mode  $TM_{11}$  (montré en vignette sur la figure 7b) possède la même fréquence de coupure que le mode  $TE_{01}$ , donc la même vitesse de phase et, à cet égard, est susceptible de prélever une partie de la puissance destinée au mode  $TE_{01}$ . Mais, dans le mode  $TM_{11}$ , des points diamétralement opposés sont en opposition de phase, et les excitations par des trous diamétralement opposés en phase s'annulent. Ce mode ne pourra donc être excité.

Il existe de nombreuses variantes que l'on peut caractériser par des règles mathématiques précises, mais dont nous ferons simplement comprendre la nature par un exemple.

Supposons que G1 est excité dans le mode  $TE_{51}$  (montré sur la figure 12) et comporte encore quatre guides périphériques.

Une composante de champ de G1 par exemple  $H_z$ , varie à la paroi comme

$$H_z = H_0 \cos(\omega t - \beta z - 5 \varnothing),$$

en polarisation tournante

$$H_z = H_0 (\omega t - \beta z) \cos 5 \varnothing,$$

en polarisation fixe (ondes progressives vers + z).

Au quatre guides  $g_1, g_2, g_3, g_4$ , on aura

$$H_z = H_0 \cos\left(\omega t - \beta z - 5n \frac{\pi}{2}\right) = H_0 \cos\left(\omega t - \beta z - \frac{n\pi}{2}\right)$$

ou

$$H_z = H_0 \cos(\omega t - \beta z) \cos 5 \frac{n\pi}{2} = H_0 \cos(\omega t - \beta z) \cdot \cos \phi$$

50 car

$$\frac{5\pi}{2} = 2\pi + \frac{\pi}{2}$$

Les caractéristiques de phase obtenues sont les mêmes que celle d'un mode :  $TE_{1m}$

$$H_2 = H_0 \cos(\omega t - \beta z - \varnothing)$$

55 ou

$$H_2 = H_0 \cos(\omega t - \varnothing z) \cos \varnothing$$

Ainsi, il est possible de transformer le mode  $TE_{51}$  tournant ou fixe en mode  $TE_{11}$  tournant ou fixe, par exemple.

De façon générale, un convertisseur de mode selon l'invention, construit avec  $g$  guides latéraux régulièrement espacés autour du guide principal (séparé par  $2\pi/g$  radians), permet d'obtenir une conversion de mode entre deux modes initiaux et finaux dont les indices azimutaux diffèrent d'un multiple de  $g$ .

La figure 8 représente un exemple de réalisation de convertisseur de mode selon l'invention. Selon une caractéristique importante de l'invention, le convertisseur de mode est relié à la cavité non montrée d'un gyrotron par le guide G1. L'espace entre B et C peut être prolongé de manière à recevoir les électrons du faisceau sur le collecteur 87 qui peut être aisément dimensionné pour dissiper la chaleur générée.

Le guide circulaire G1 est censé, dans cet exemple de réalisation d'un convertisseur de mode selon l'invention, véhiculer une onde électromagnétique hyperfréquence de mode complexe provenant de la cavité d'un gyrotron, par exemple le mode  $TE_{41}$  montre en vignette, qui sera converti en mode désiré dans le guide circulaire G2 à l'aide du convertisseur selon l'invention, par exemple le mode  $TE_{01}$  montré en vignette.

Comme dans le cas illustré précédemment sur la figure 7, selon la symétrie azimutale d'ordre  $l$  du mode à convertir en mode  $TE_{01}$ , un nombre  $l$  de guides rectangulaires sont accolés sur le paroi du guide G1, orientés parallèlement à l'axe de ce dernier et distribués sur le pourtour de façon symétrique. Comme dans le cas précédent, nous avons choisi dans cet exemple non limitatif d'une réalisation de convertisseur de mode selon l'invention, le mode à convertir  $TE_{41}$  qui montre une symétrie azimutale d'ordre 4 ; ainsi tel que montré sur la figure 8, les  $l$  guides rectangulaires sont au nombre de quatre ( $l = 4$ ), et sont placés équidistant les uns des autres sur la paroi du guide circulaire G1, c'est-à-dire à l'intervalle de  $90^\circ$  ou de façon équivalent  $2\pi/4$  radians. Sur la figure 8, les quatre guides rectangulaires sont indiqués par les repères  $g1, g2, g3, g4$  ; mais seulement le guide  $g1$  est montré complètement, les autres guides rectangulaires étant identiques à ce dernier.

Comme dans le cas précédent, la puissance hyperfréquence est transférée du guide G1 dans les quatre guides  $g1, g2, g3, g4$  par des trous de couplage ; la symétrie azimutale d'ordre  $l$  du mode de propagation à convertir dicte une répartition de puissance identique dans les  $l$  guides rectangulaires. La puissance hyperfréquence injectée dans le guide G1 peut se retrouver intégralement dans les  $l$  guides rectangulaires si les conditions énumérées dans la description de la figure 7 ci-dessus sont remplies.

Les dimensions des trous et la longueur  $L$  du couplage sont choisies en fonction des mêmes critères que dans le cas précédent.

A l'abscisse de B le long de l'axe principal, la conversion du mode excité en G1 vers les quatre guides  $g1, g2, g3, g4$  est complète ; il n'y a donc plus de puissance dans G1. Il n'est donc pas nécessaire, dans le cas d'un convertisseur relié directement à la sortie d'un gyrotron tel que montré sur la figure 8, de mettre une charge adaptée après la région B, mais c'est préférable dans le cas où des modes indésirables sont engendrés par le gyrotron. La distance entre B et C peut être choisie pour donner une dimension suffisante au collecteur 87 d'électrons, suivant la puissance à dissiper. De même que dans le cas précédent, les quatre guides  $g1, g2, g3, g4$  sont reliés en A et en D à des charges adaptées, ainsi que le guide G2 est relié à une charge adaptée à l'abscisse de C.

Comme dans l'exemple d'un convertisseur de mode montré sur la figure 7, au-delà de B, les quatre guides  $g1, g2, g3, g4$  sont prolongés suivant un parcours comportant en général une sinuosité de manière à pouvoir être accolés à un guide G2 dont le diamètre sera différente de celui de G1. En effet, ces deux guides propagent par hypothèse des modes différents et doivent avoir la même vitesse de phase, qui est aussi celui des quatre guides  $g1, g2, g3, g4$ . Il est également possible que G1 et G2 ait la même diamètre, mais les quatre guides  $g1, g2, g3, g4$  doivent alors changer progressivement de section entre G1 et G2 au lieu de présenter une sinuosité. La règle est que les quatre guides  $g1, g2, g3, g4$  doivent avoir dans la région comprise entre A et B la même vitesse de phase que le mode transporté par G1 ( $TE_{41}$  dans l'exemple de la figure 8) et, dans celle comprise entre C et D, la même vitesse de phase que celui transporté par G2 ( $TE_{01}$  dans cet exemple).

La figure 9 représente un autre exemple de réalisation de convertisseur de mode selon l'invention, identique à la réalisation de la figure 8 à l'exception des fenêtres hyperfréquence 98 placées sur les guides latéraux. Selon une caractéristique importante de l'invention, un convertisseur de mode est relié à la cavité (non montrée) d'un gyrotron par le guide G1, comme dans l'exemple précédent illustré sur la figure 8, mais dans l'exemple de réalisation de la figure 9, les guides latéraux  $g1, g2, g3, g4$  sont munis des fenêtres hyperfréquence 98 étanches au vide interne du gyrotron, mais transparentes à l'énergie hyperfréquence. Cette solution permet de refroidir les fenêtres plus aisément que la solution classique d'une seule fenêtre de sortie de puissance hyperfréquence, en raison de dimensions réduites de ces multiples fenêtres et de la moindre puissance à véhiculer par chaque fenêtre, d'une part, et d'autre part l'accès périphérique à ces fenêtres éloignées du gyrotron lui-même est bien plus facile pour installer l'équipement de refroidissement.

Un autre avantage de cette configuration provient de l'action filtre de mode du convertisseur : les modes réfléchis ne pourront en général pas atteindre les fenêtres ni le guide G1 car seul les modes ayant la vitesse de phase du mode désiré dans G2 peuvent exciter les petits guides  $g1, \dots$

La figure 10 montre un autre exemple de réalisation de convertisseur de modes selon l'invention, dans une

caractéristique selon laquelle les guides latéraux sont courbés de 90° entre les guides G1 et G2, de façon à réduire l'encombrement du système le long de l'axe de G1. En effet, un problème à résoudre dans des installations pratiques de gyrotrons est que le gyrotron fonctionne, en général, en position verticale, mais éloigné de la charge par des distances de quelques dizaines de mètres dans un sens latéral. Donc, il est souhaitable de réaliser un coude dans le guide qui relie la sortie verticale du gyrotron avec la charge éloignée du gyrotron. Mais la réalisation des coudes en guide surdimensionné est très délicat car ces guides peuvent propager l'énergie hyperfréquence dans de nombreux modes plus ou moins compliqués, et le coude peut facilement entraîner des conversions de modes entre ces modes propagés par le guide surdimensionné, vers des modes non désirés. Pour éviter ceci dans des réalisations selon l'art antérieur, les coudes sont effectués avec un rayon de courbure très grand, qui accroît considérablement l'encombrement du système.

L'avantage de la réalisation montrée sur la figure 10 provient du fait que les guides latéraux ne propagent qu'un mode unique, donc il n'y a pas possibilité de conversion parasite vers des modes non désirées. La propagation sera peu sensible aux coudes des guides latéraux à condition de respecter les conditions de phase énumérées précédemment. Bien entendu, des courbures autre que 90° peuvent être facilement réalisées selon le même principe.

Dans d'autres variantes de convertisseur de mode selon l'invention, telles que montrées schématiquement sur la figure 11, les guides  $g_1, g_2, \dots, g_n$  sont munis entre G1 et G2 de déphaseurs, ou de longueurs supplémentaires, de manière à modifier les phases autour de G2, ce qui offre des possibilités nombreuses pour le changement d'indice azimutal de mode. Sur la figure 11 l'on voit schématiquement deux guides latéraux  $g_1, g_3$  en coupe longitudinal, dans la même configuration que sur les figures 7 à 9 précédentes, avec des charges absorbantes A et D aux extrémités comme dans ces cas précédents. Une coupe à l'abscisse S montre que dans cet exemple, l'on considère un convertisseur de mode avec trois guides latéraux. Si l'on commence avec une onde en mode  $TE_{34}$ , par exemple, l'on peut obtenir le mode  $TE_{10}$  à l'abscisse P. En insérant des déphaseurs 111 différents dans les différents guides latéraux  $g_1, g_2, \dots, g_n$ , l'on peut introduire des longueurs électriques différentes sur les différents guides ; le même effet peut être obtenu avec des longueurs physiques différentes. Le résultant décalage de phase entre les composants véhiculés dans les différents guides est choisi de façon à changer l'indice azimutal de l'onde propagé; dans l'exemple de la figure 11, l'onde résultante après déphasage à P sera dans le mode  $TE_{01}$ .

Sur la figure 12, l'on voit que les lignes de champ électrique du mode  $TE_{51}$ , en propagation en guide de section circulaire sont assez compliquées, car elles présentent une symétrie azimutale d'ordre 5, avec un seul noeud radial au niveau de la paroi. Ce diagramme correspond au mode de propagation d'une source discutée dans l'exemple de la figure 7 précédemment.

L'invention a donc de nombreuses applications qui peuvent être facilement imaginées par l'homme de l'art. Par exemple, l'invention peut être utilisée comme convertisseur de mode sur un circuit hyperfréquence, par exemple en guide d'onde surdimensionné pour des hautes puissances et des hautes fréquences, ou directement sur la sortie d'une source hyperfréquence pour obtenir le mode de propagation préféré, ou encore comme filtre de mode car elle empêche la propagation des modes non désirés. De plus, l'utilisation de l'invention dans des systèmes compliqués destinés à véhiculer de fortes puissances d'énergie hyperfréquence à des fréquences élevées peut permettre de simplifier la réalisation pratique de ses systèmes car l'invention permet une certaine liberté dans les choix de la géométrie relative des sources et charges hyperfréquences, sans augmenter pour autant les risques de conversion vers des modes parasites. Quand utilisée directement en sortie d'un gyrotron ou d'autres sources hyperfréquences de très haute puissance, l'invention permet aussi de s'affranchir de certains problèmes associés aux fenêtres hyperfréquences.

45

## Revendications

1. Convertisseur de mode de propagation guidée des ondes électromagnétiques, comprenant : une structure dite "de transition" et des moyens de couplage par trous entre ladite structure de transition et un guide d'ondes circulaire G2 dit "guide aval" apt à propager le mode résultant de la conversion de mode à effectuer par ledit convertisseur de mode, dit le "mode cible" ; et comprenant également des moyens de couplage par trous entre ladite structure de transition et une source d'énergie électromagnétique hyperfréquence ou un guide d'ondes circulaire G1 dit "guide amont" qui apporte de l'énergie électromagnétique hyperfréquence, dans un mode de propagation de nombre propre élevé à convertir par ledit convertisseur de mode, dit le "mode source", vers ladite structure de transition ; caractérisé en ce que ladite structure de transition comprenne plusieurs guides d'ondes  $g_1, \dots, g_n$  ( $n$  étant un nombre entier supérieur à 2) apt à propager le mode cible ; le nombre, la forme et l'espacement des trous de couplage, ainsi que le nombre  $n$  de guides compris dans ladite structure de transition, étant choisis selon la conversion de mode à effectuer.

2. Convertisseur de mode selon la revendication 1, caractérisé en ce que les guides d'onde  $g_1, \dots, g_n$  compris dans ladite structure de transition sont courbés selon leur longueur pour suivre un parcours comportant une sinuosité de manière à pouvoir être accolés à leurs extrémités à un guide aval G2 et à un guide amont G1 dont les diamètres peuvent être différents.
- 5
3. Convertisseur de mode selon la revendication 1, caractérisé en ce que les guides d'onde  $g_1, \dots, g_n$  compris dans ladite structure de transition présentent une section qui change progressivement selon leur longueur pour accorder la vitesse de phase de propagation dans la région de couplage A à B avec le guide amont G1 avec la vitesse de phase du mode source, et à l'autre extrémité dans la région de couplage C à D avec le guide aval G2 avec la vitesse de phase du mode cible, dans le cas où les diamètres des guides amont G1 et aval G2 sont les mêmes.
- 10
4. Convertisseur de mode selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que ledit guide amont G1 est la cavité de sortie d'un tube électronique hyperfréquence source de l'énergie électromagnétique hyperfréquence.
- 15
5. Convertisseur de mode selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que ladite structure de transition est constituée de plusieurs guides d'ondes  $g_1, \dots, g_n$  comportant chacun une fenêtre hyperfréquence 98 transparente à l'énergie hyperfréquence mais étanche au vide.
- 20
6. Convertisseur de mode selon l'une quelconque des revendications 4 ou 5, caractérisé en ce que ledit tube hyperfréquence est un gyrotron.
7. Convertisseur de mode selon l'une quelconque des revendications 1, 3, 4, 5, ou 6 caractérisé en ce que les guides d'onde  $g_1, \dots, g_n$  compris dans ladite structure de transition sont courbés selon leur longueur, tous dans le même sens et par le même angle pour suivre un parcours comportant une courbure de manière à effectuer un changement de l'orientation de l'axe de propagation en même temps que la conversion de mode.
- 25
8. Convertisseur de mode selon l'une quelconque des revendications 1 à 7 caractérisé en ce que les guides d'onde  $g_1, \dots, g_n$  compris dans ladite structure sont de longueurs électriques différentes de manière à obtenir une différence de phase entre les ondes qui se propagent dans lesdits guides d'onde  $g_1, \dots, g_n$  compris dans ladite structure, ce qui permet d'obtenir encore d'autres possibilités de modes azimutaux.
- 30

35

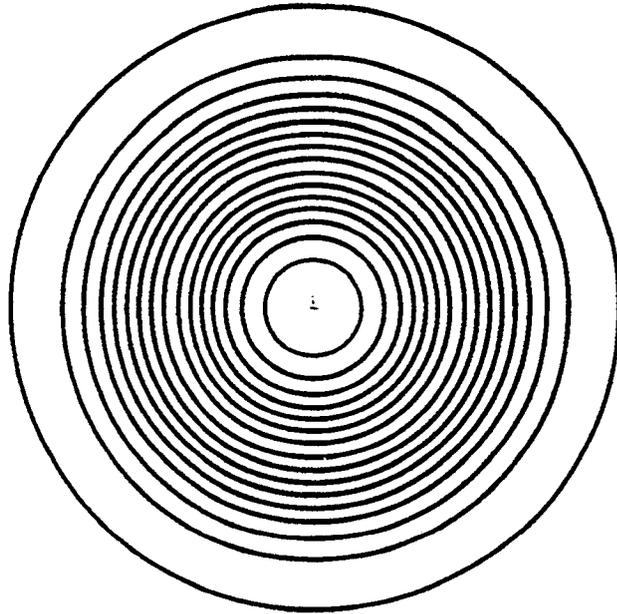
40

45

50

55

FIG\_1



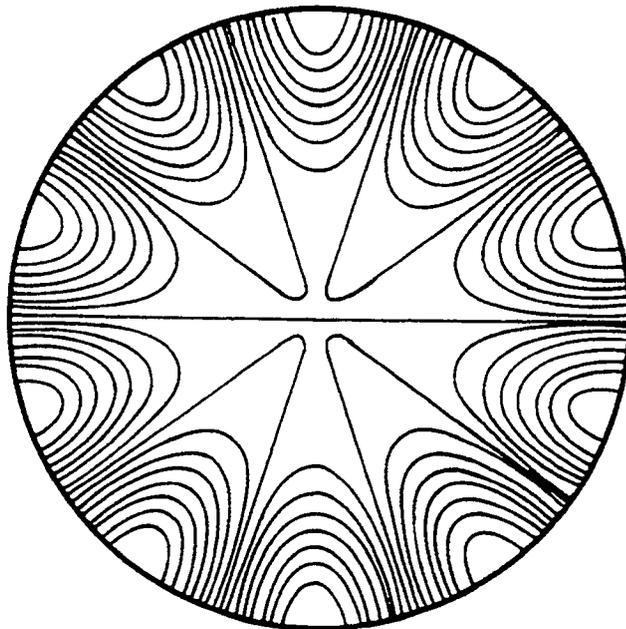
FIG\_2

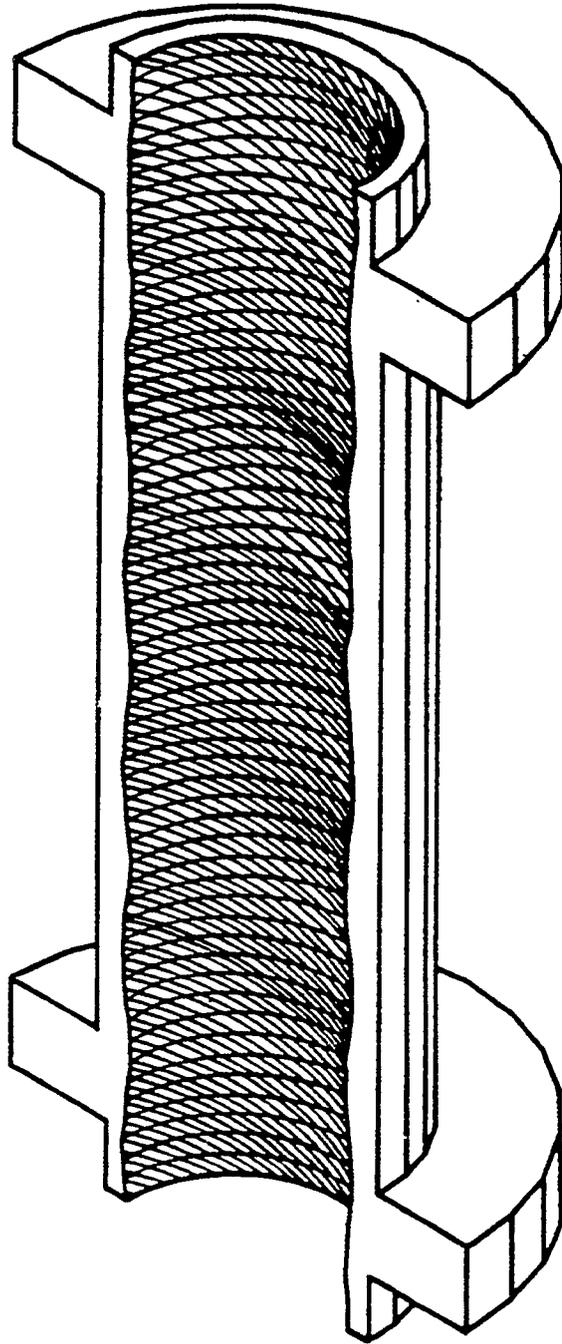


FIG\_3



FIG\_12

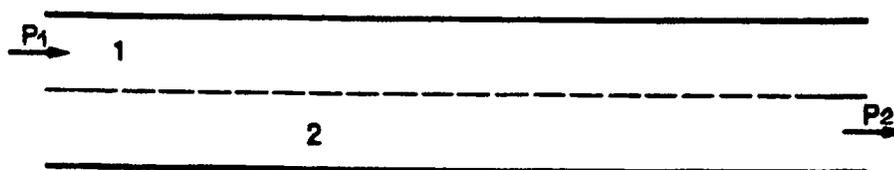




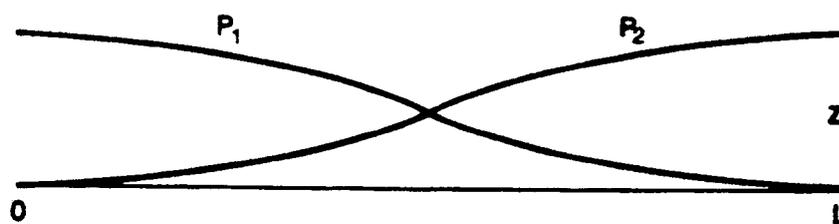
FIG\_4



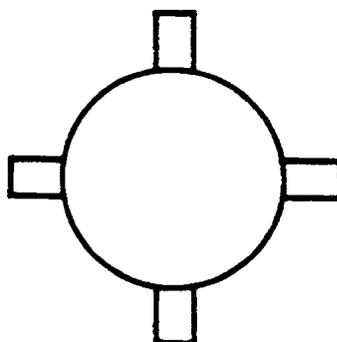
FIG\_6-a



FIG\_6-b



FIG\_7-a



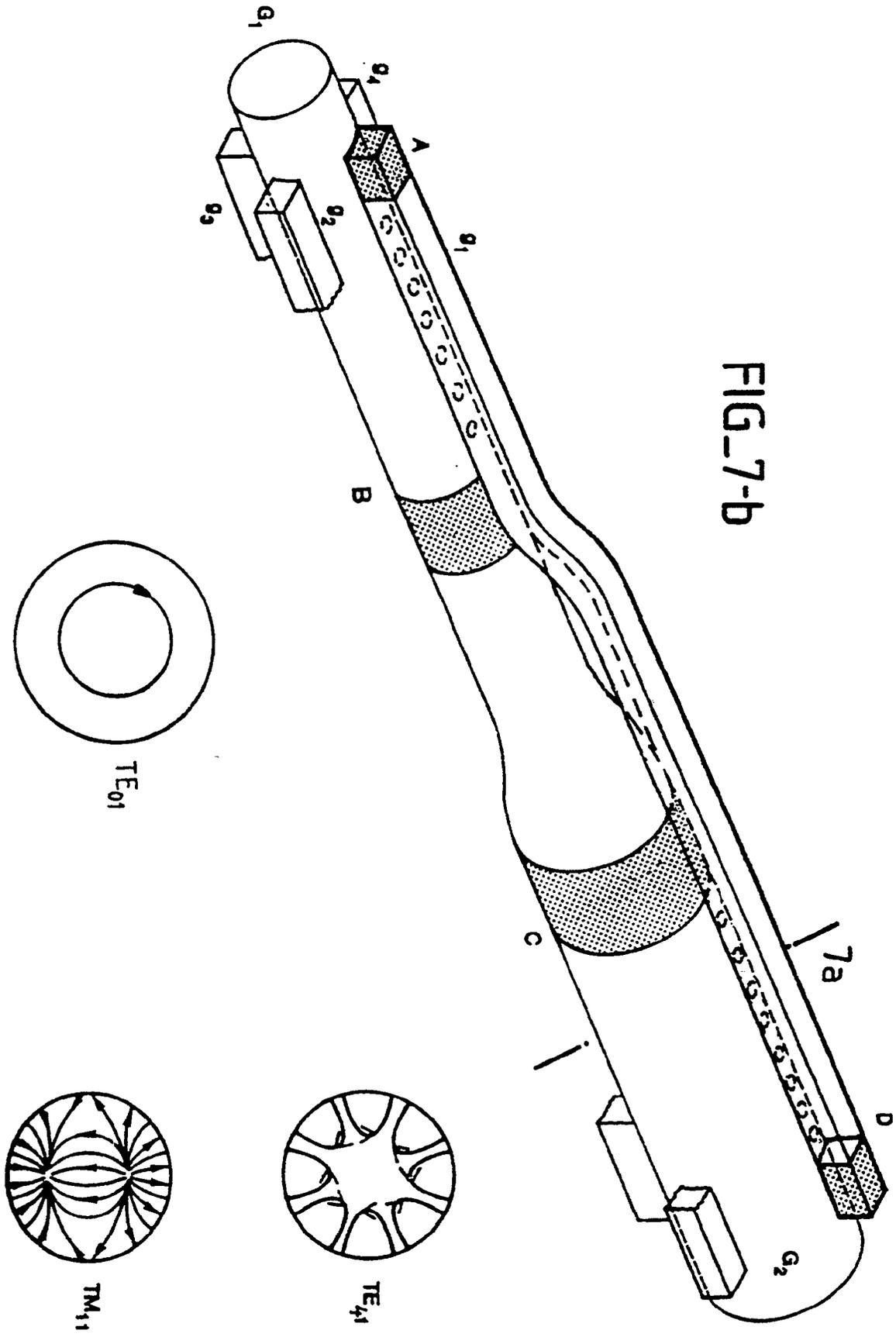
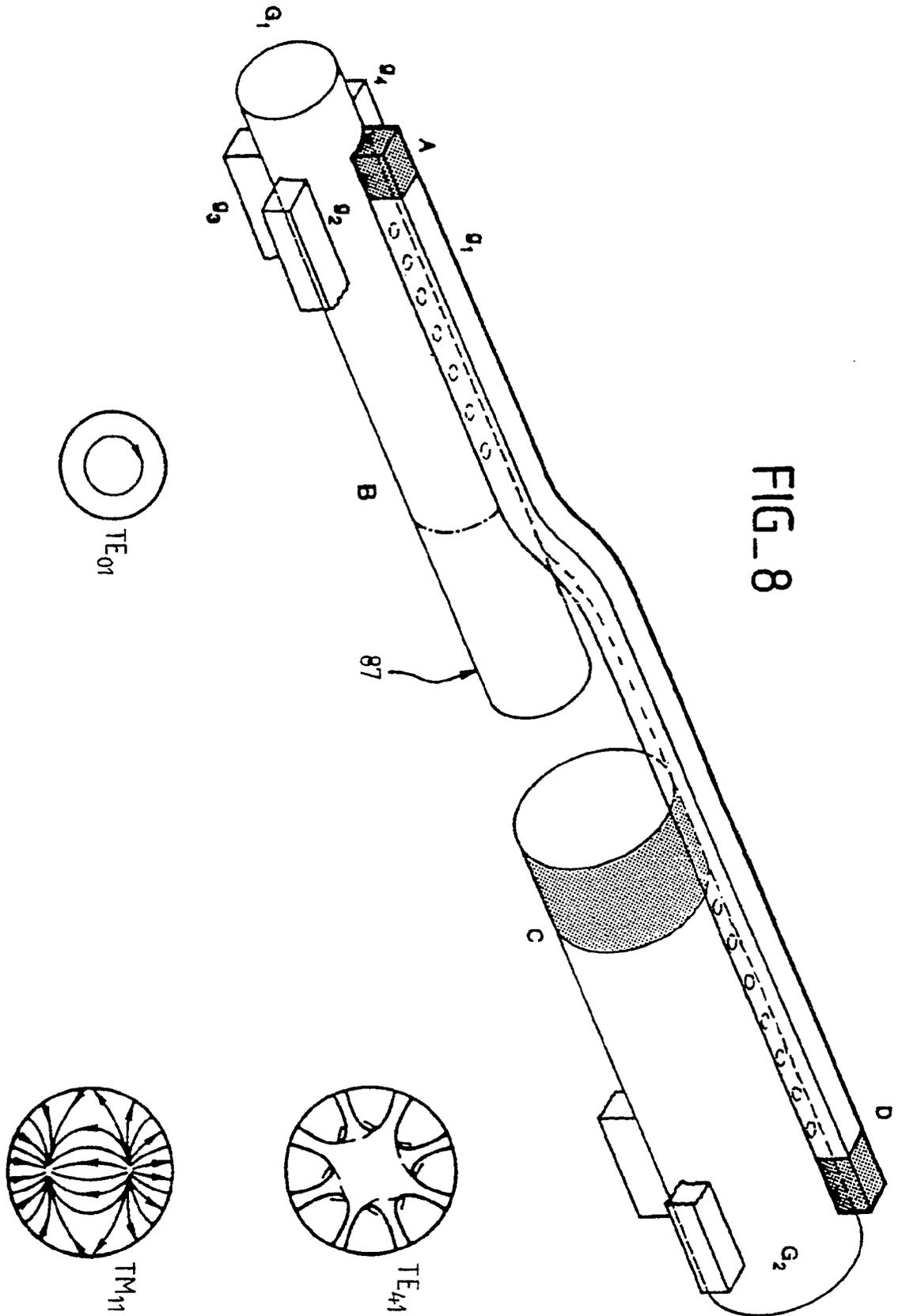
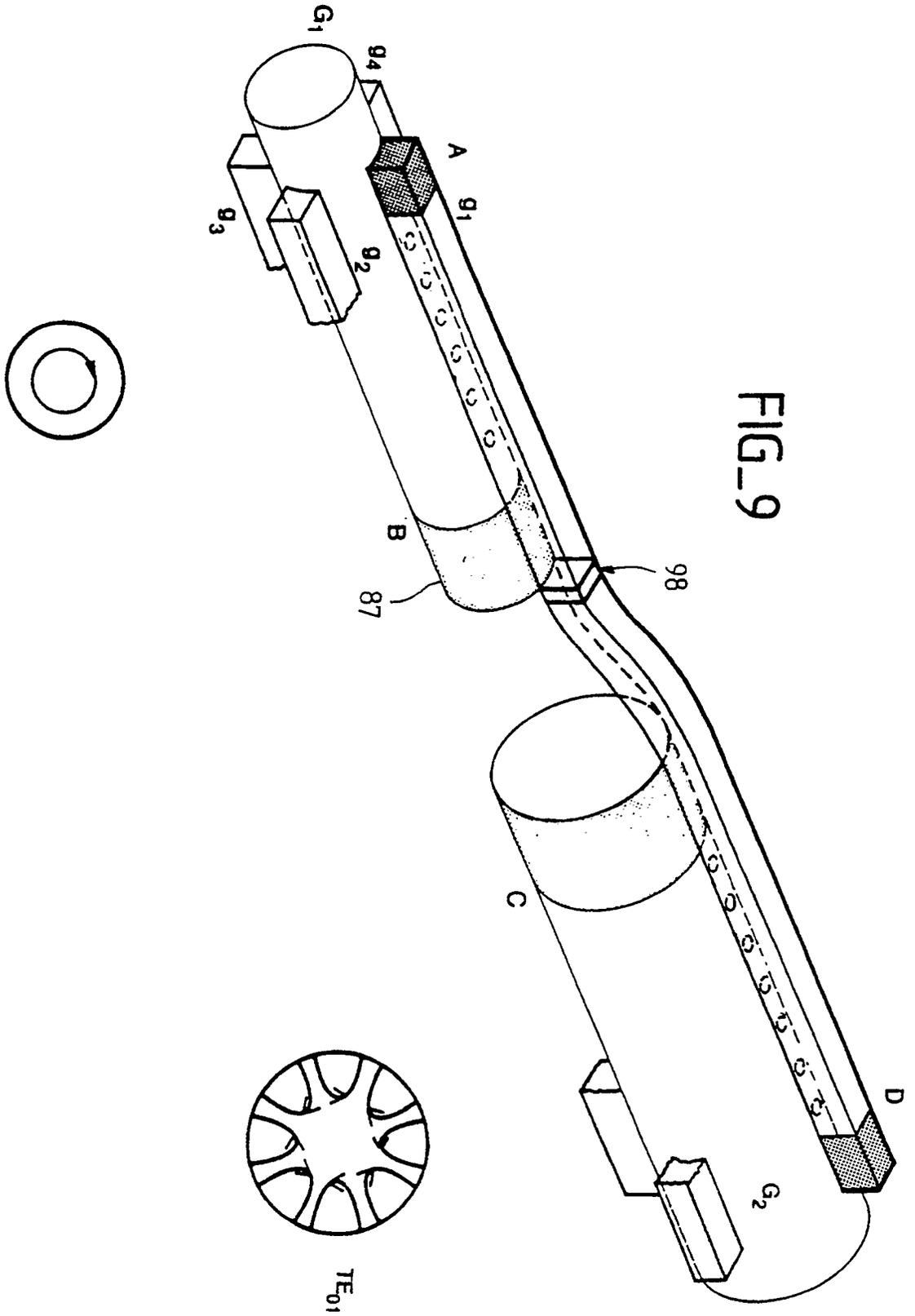


FIG-7-b

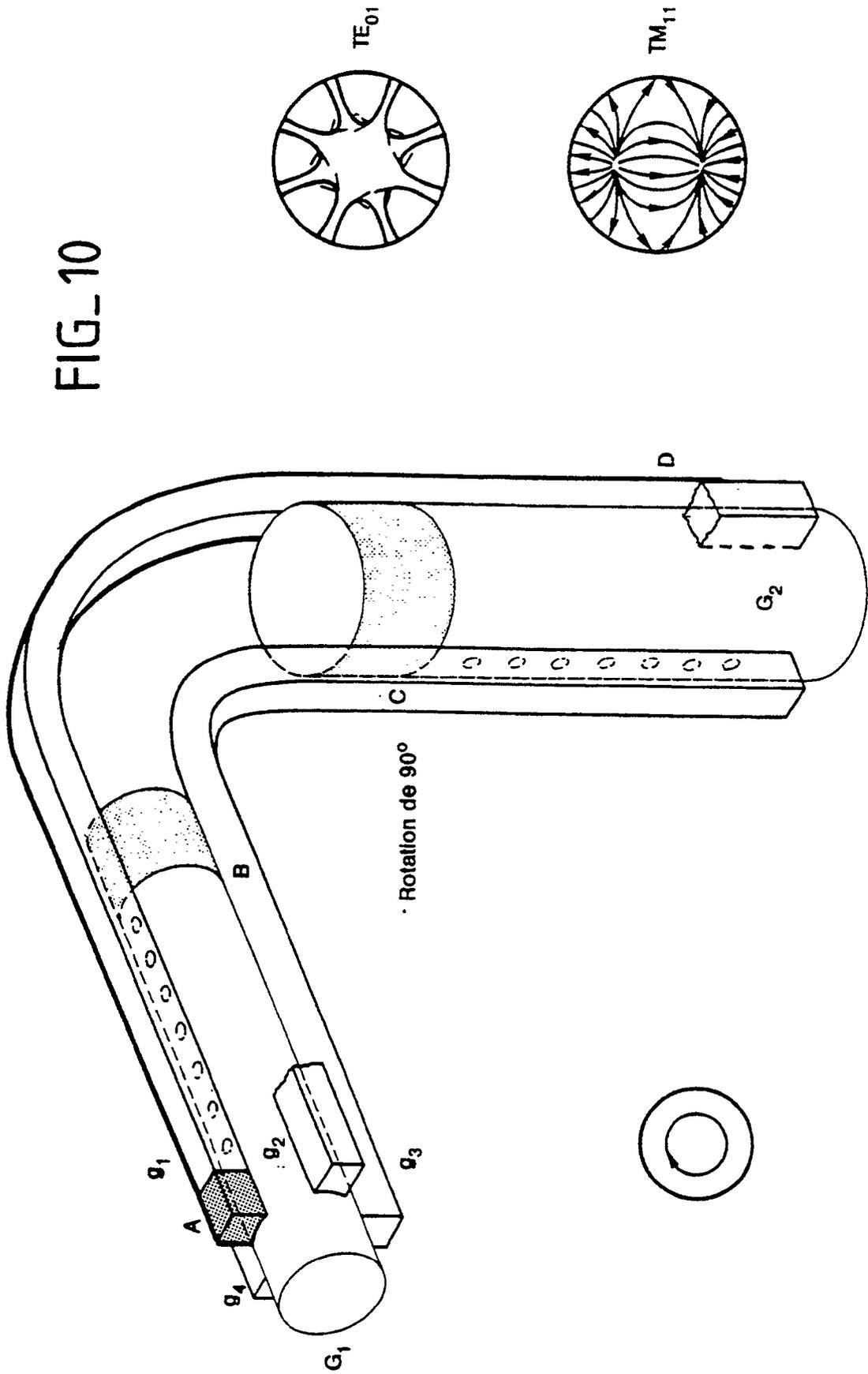
FIG\_8





FIG\_9

FIG\_10



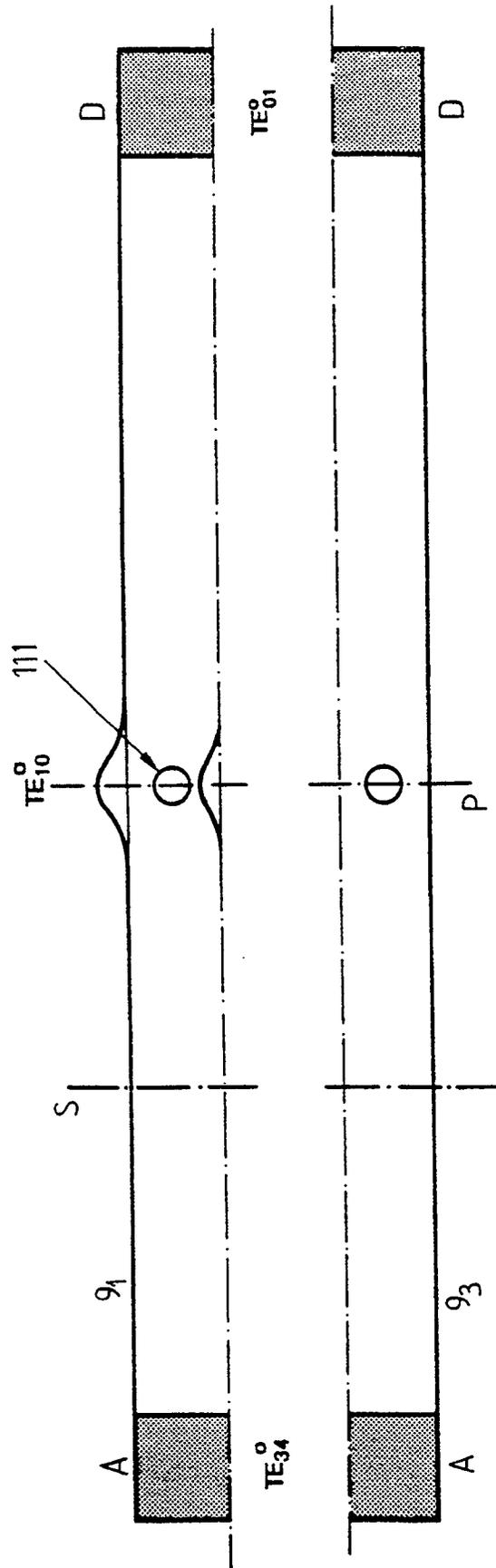
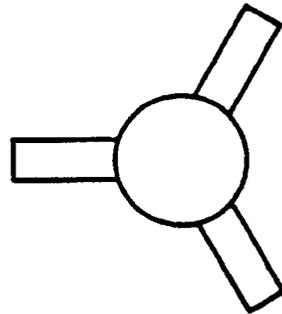


FIG-11





Office européen  
des brevets

RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numero de la demande

EP 91 40 1002

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int. Cl.5)
Y	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 8, no. 261 (E-281)(1698) 30 novembre 1984, & JP-A-59 131201 (NIPPON DENKI K.K.) 28 juillet 1984, * le document en entier *	1, 2	H01P1/163 H01J23/36
Y	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 13, no. 270 (E-776)(3618) 21 juin 1989, & JP-A-1 60001 (NEC CORP.) 07 mars 1989, * le document en entier *	1, 2	
A	RADIO ENGINEERING AND ELECTRONICS, vol. 2, no. 1, janvier 1957, WASHINGTON US pages 96 - 111; M.V.PERSIKOV: "Directional coupler for HO1_waves in circular guide" * page 97, ligne 5 - page 98, ligne 2 * * page 100, ligne 17 - page 102, ligne 3; figures 2-4 *	1	
A	EP-A-0122834 (THOMSON-CSF) * page 1, lignes 1 - 22 * * page 10, ligne 21 - page 11, ligne 9; figure 16 *	4-6	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. Cl.5)
A	DE-C-964882 (SIEMENS & HALSKE AG) * page 2, lignes 3 - 16 * * page 2, lignes 54 - 66 * * page 3, lignes 33 - 66; figure 2 *	7	H01P H01J
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche LA HAYE		Date d'achèvement de la recherche 15 JUILLET 1991	Examineur DEN OTTER A.M.
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande I : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

EPO FORM 1503 03.82 (P0402)