

RESSOADORES DIELÉTRICOS NO MODO WHISPERING-GALLERY APLICAÇÃO AOS CIRCUITOS NA FAIXA MILIMÉTRICA

Luís Afonso Bermúdez

Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Elétrica
Caixa Postal 153041
70910 Brasília - DF - Brasil

X. H. Jiao, Ph. Auzemery, P. Guillon

IRCOM - Université de Limoges
123, Av. Albert Thomas
87060 Limoges - CEDEX - France

RESUMO

Em frequências milimétricas, para a utilização de ressoadores dielétricos, se faz necessário o estudo de novas geometrias seja para melhorar o confinamento dos campos eletromagnéticos e obter assim ressoadores com fator de qualidade elevado, seja para aumentar as dimensões dos ressoadores dielétricos convencionais e tornar possível assim a sua fabricação e usinagem. Com este objetivo, neste trabalho foi realizado o estudo dos ressoadores dielétricos no modo de ressonância chamado "Whispering-Gallery" de forma a se chegar na concepção e realização de dispositivos passivos (filtros, acopladores direcionais) e ativos (osciladores e combinadores de potência), funcionando na banda de frequências milimétricas e submilimétricas.

ABSTRACT

The new type of resonators presented in this paper use the Whispering-Gallery Mode (WGM) of disk dielectric samples, the lateral surface of these being machined or of simulated-build type. They permit to have a resonator with high performance and easy to integrate, in particular in passive and active millimeter and microwave circuits.

INTRODUÇÃO

Atualmente, existem dois tipos principais de materiais onde as propriedades são satisfeitas para a fabricação de ressoadores dielétricos, [1]:

- Os materiais de permissividade relativa (ϵ_r) entre 35 e 40, onde o coeficiente de temperatura não passa de alguns ppm/°C e onde o fator de mérito é da ordem de $Q.f = 40000$ (f expresso em GHz).

- Os materiais de permissividade relativa mais baixa, da ordem de 10, estável em temperatura e com fator de mérito $Q.f = 350000$.

Em frequências milimétricas, a utilização dos materiais do primeiro tipo conduz a dimensões de ressoadores pouco compatíveis com o problema de usinagem (confeção mecânica) e ainda, o coeficiente de qualidade dos ressoadores nestas frequências é relativamente baixo. Como exemplo, pode-se citar o caso de um ressoador dielétrico cilíndrico funcionando no modo TE_{0,1,0} a 100 GHz terá um diâmetro e uma altura da ordem de 500 μ m. A utilização do segundo tipo de material leva a ressoadores de dimensões e fator de qualidade razoáveis. Entretanto, a permissividade sendo baixa, as perdas por radiação devem ser eliminadas.

Uma solução a esses dois problemas (redução de tamanho e perdas por radiação) consiste em utilizar os modos chamados "Whispering-Gallery", (W.G.) dos ressoadores dielétricos com seção circular.

Nestes modos de ressonância, o campo está confinado entre a parede lateral do ressoador e uma caústica, como está mostrado na Fig.1. Nela está representado esquematicamente (utilizando a teoria da ótica dos raios) o trajeto de um raio totalmente refletido na interface ar-dielétrico.

Dada esta característica, o interesse então se concentra nas ondas que ficam confinadas numa pequena zona na direção axial, confinamento este que é assegurado aumentando o diâmetro da região central de um cilindro dielétrico como é mostrado na Fig.2.

Estas ondas que permitem a obtenção de ressoadores dielétricos facilmente usináveis e integráveis, oferecem ainda:

- Uma excelente possibilidade de supressão dos modos parasitas. Estes modos são evanescentes no exterior da zona central e são absorvidos sem perturbação dos modos desejados.

- Baixas perdas por radiação e o fator de qualidade dos ressoadores funcionando nestes modos é limitado somente pelo fator de qualidade intrínseco do material.

- Uma grande facilidade de excitação, principalmente pela utilização de dispositivos à ondas progressivas sincronizadas com as ondas dos modos a W.G..

- Uma grande capacidade de integração para a realização de dispositivos passivos e ativos na banda milimétrica.

ESTUDO ELETRONAGNÉTICO

Um estudo eletromagnético do ressoador foi necessário para a definição das frequências de ressonância e do fator de qualidade em função do modo e das dimensões escolhidas para o ressoador. Para isto, dois métodos foram estudados: o método analítico e o método numérico.

No método analítico, obteve-se inicialmente a equação de dispersão que caracteriza os modos híbridos ao longo de um cilindro dielétrico, obtendo-se assim a separação dos modos não atenuados (W.G.) dos modos atenuados. Tudo isso a partir das componentes do campo eletromagnético.

Em função das características obtidas, os W.G. foram classificados em modos WGE $n,m,1+1$, que é o modo que possui um campo elétrico radial e modos WGH $n,m,1+1$, que é um modo que possui um campo elétrico axial. Os índices n, m e l caracterizam respectivamente, as variações azimutais, radiais e axiais. O índice $+1$ indicará o sentido de rotação que no entanto pode ser suprimido se o material utilizado para confeccionar o ressoador for isotrópico pois neste caso a frequência de ressonância vai ser única não importando o sentido de rotação.

A partir da equação de dispersão, que é uma equação dependente unicamente da constante de propagação axial, β , e da frequência, para valores do número azimutal e para as características do cilindro dielétrico, pode-se determinar a frequência de ressonância.

Para isto, leva-se em conta também que o ressoador comporta uma saliência no meio do cilindro e que β é diferente nos meios 1 e 2 da Fig.3 (Condições de contorno), [2], [3], [4].

No método numérico, o estudo foi abordado utilizando o conhecido método dos elementos finitos para estruturas que apresentam uma simetria de revolução.

1) princípio da resolução é baseado na discretização das equações de Maxwell. As soluções purias são comuns neste tipo de problema, também as geradas mas podem ser eliminadas por relações de divergência dos campos.

O método utilizou-se do "pacote" de programas de título e simulação disponível no MODULEF, [5], com a vantagem de obter-se não somente a frequência de ressonância mas também uma cartografia dos campos eletromagnéticos envolvidos, como pode ser visto na Fig.4.

Os dois métodos foram verificados experimentalmente e os resultados obtidos comprovam a eficácia de ambos, [4], [6].

ESTUDO ELÉTRICO

O estudo elétrico deste ressoador, possibilitou a análise dos ressoadores a W.G. acoplados a linhas de transmissão com vistas às condições elétricas necessárias para a concepção de dispositivos ativos e passivos em ondas milimétricas.

O acoplamento desses modos é obtido sincronizando uma onda exterior com a onda do ressoador a W.G., [7].

Dois casos são possíveis de analisar: o R.D. à W.G. acoplado à uma linha de transmissão e o R.D. à W.G. acoplado à duas linhas de transmissão, como é mostrado na Fig.5.

No primeiro caso temos um comportamento de filtro stopband e no segundo caso temos um filtro diretivo.

Em ambos os casos, a matriz [S] obtida para os circuitos é função da distância linha-R.D. a W.G..

RESSOADORES PLANARES À WHISPERING-GALLERY

O modo de ressonância W.G. pode ser observado também em discos (pastilhas) dielétricos tais como o mostrado na Fig.6.

Ele corresponde ao caso ideal de modos W.G. onde não há propagação na direção do eixo Z porque toda a energia modal é confinada entre a caustica e a fronteira do R.D..

Desta maneira, a frequência de ressonância depende somente da permissividade ϵ_r e do raio do ressoador, sendo independente da espessura da pastilha. Em [8] podem ser vistos alguns resultados experimentais.

A excitação para este tipo de ressoador é feita da mesma maneira que para o ressoador cilíndrico, Fig.7.

Os resultados obtidos mostraram a realizabilidade de ressoadores planares tão finos quanto se queira e compatíveis com uma possível implementação de circuitos em microondas como também em ondas milimétricas.

APLICAÇÕES

1) Filtro stopband: esta é a estrutura mais simples de circuito realizável com ressoadores dielétricos à W.G.. A propriedade de transmissão desse tipo de filtro está mostrada na Fig.5.a. A performance deste filtro pode ser melhorada em termos de banda e atenuação, utilizando vários ressoadores em cascata, [6].

2) Filtros direcionais: este tipo de filtro está mostrado na Fig.5.b. Filtros diretivos multipolos podem ser confeccionados sendo que o parâmetro crítico neste caso é o acoplamento inter-ressoadores.

3) Filtros periódicos: até hoje os filtros periódicos na faixa milimétrica tem sido confeccionados com anéis de guias de ondas dielétricos. Entretanto, eles apresentam fortes perdas por radiação. No caso dos R.D. à W.G. este problema desaparece, e devido a natureza periódica do modo é possível então a implementação deste tipo de filtro, [6].

4) Osciladores-dobradores: utilizando a propriedade de filtro diretivo do R.D. planar a U.G. é possível a confecção de osciladores-dobradores de frequência em bandas de frequências milimétricas, como por exemplo em 94 GHz, [9].

CONCLUSÃO

Neste trabalho pretendeu-se mostrar as aplicações e potencialidades do uso de ressoadores dielétricos operando no modo chamado "WHISPERING-GALLERY" em frequências na banda milimétrica. Os resultados práticos obtidos em várias aplicações comprovaram a potencialidade desse tipo de ressonador, principalmente no tocante à integração do mesmo em circuitos híbridos e semi-híbridos para a faixa milimétrica.

Obs.: Este trabalho foi suportado em partes:

- pela Direction des Recherches, Etudes et Techniques, França, Contrato No. 86.34081.00.470.75.01.

- pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Brasil, através de uma bolsa de doutorado para L.A. Bernudez.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D.Kajfez e P.Guillon, Dielectric Resonators, Norwood, NJ: Artech House, 1986.
- [2] J.R.Wait, "Electromagnetic whispering-gallery modes in a dielectric rod", Radio Sci., vol.2, no.9, pp.1005-1017, Sept.1967.
- [3] C.Vendrenne e J.Arnaud, "Whispering-gallery modes of dielectric resonators", Proc. Inst. Elec.Eng., pt.H, vol. 129, pp.183-187, Aug.1982.
- [4] X.H.Jiao, P.Guillon e L.A.Bernudez, "Resonant frequencies of whispering-gallery dielectric resonator modes", Proc. Inst. Elec. Eng., pt.H, vol.134, pp.497-501, Dec.1987.
- [5] Club MODULEF, INRIA, Domaine de Rocquencourt, France.
- [6] P.Guillon, X.H.Jiao, Ph.Auxemery e L.A.Bernudez, "Whispering-gallery modes herald DR mm-wave use", Microwaves & RF, pp.85-96, Sep.1987.
- [7] X.H.Jiao, P.Guillon e J.Obregon, "Theoretical analysis of the coupling between whispering-gallery dielectric resonator modes and transmission lines", Electron.Lett., vol.21, no.3, pp.88-89, Jan.1985.
- [8] X.H.Jiao, P.Guillon, L.A.Bernudez e Ph.Auxemery, "Whispering-gallery modes of dielectric structures: applications to millimeter-wave bandstop filters", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.ETT-35, no.12, pp.1169-1175, Dec.1987.
- [9] L.A.Bernudez, P.Guillon, J.Obregon e A.Bert, "A 94 GHz low-noise GaAs FET oscillator using whispering-gallery dielectric resonator modes and a new push-push configuration reducing 1/f converted noise", 1988 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. (New York, NY), May 25-27, 1988, pp.481-484.

Luis A. Bernudez

Nasceu em Uruguaiana, RS, Brasil em Dezembro de 1953. Obteve o Bacharelado em Engenharia Eletrônica na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, PUCRS, Brasil, em 1977. É Mestre em Ciências pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, em 1980, na área de Microondas. Obteve o título de Doutor em Eletrônica, especialidade Comunicações Óticas e Microondas no Institut de Recherche en Communications Optiques et Microondes (IRCOM) da Universidade de Limoges, França, em 1987. Desde 1980 é Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, Brasil. Suas áreas de pesquisa são os dispositivos ativos e passivos de microondas e na faixa milimétrica.

Xiao H. Jiao

Nasceu em Henan, China, em Novembro 1962. Obteve o Bacharelado em Engenharia Eletrônica no Chengdu Institute of Radio Engineering (CIRE), China, em Julho de 1982. Obteve o Diplôme d'Études Approfondies (DEA) em Comunicações Óticas e Microondas em 1984 e o título de Doutor na Universidade de Limoges, França, em 1988. Atualmente é pesquisador no Institut de Recherche en Communications Optiques et Microondes (IRCOM), Limoges, França. Sua área de atuação são os circuitos integrados para uso na banda milimétrica.

Philippe Auxemery

Nasceu em Limoges, França, em 1963. Obteve o Diplôme d'Études Approfondies (DEA) em Eletrônica na Universidade de Limoges, França, em 1986. Atualmente desenvolve pesquisas sobre os ressoadores dielétricos à Whispering-Gallery para a obtenção do título de Doutor no Institut de Recherche en Communications Optiques et Microondes (IRCOM) da Université de Limoges, França.

Pierre Guillon

Nasceu em Maio de 1947 na França. Recebeu o Título de Doutor pela Universidade de Limoges, França. De 1971 a 1980 trabalhou com ressoadores dielétricos e suas aplicações em microondas e na faixa milimétrica, na Université de Limoges, França. De 1981 a 1985 foi Professor de Engenharia Elétrica na Université de Poitiers, França. Em 1985 retornou à Université de Limoges onde atualmente é Coordenador de um grupo de pesquisas na área de dispositivos e circuitos de microondas e na faixa milimétrica.

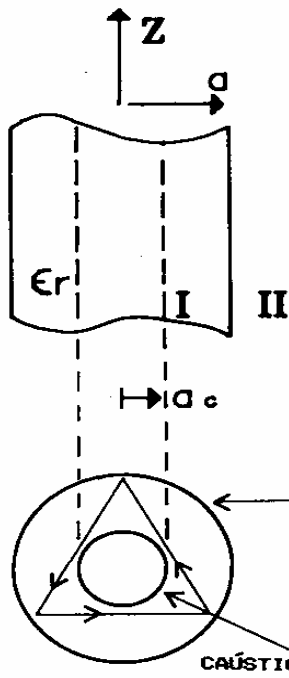


Fig. 1 = CILINDRO DIELETRICO DE COMPRIMENTO INFINITO, RAI0 "a" E PERMISSIVIDADE "Er".

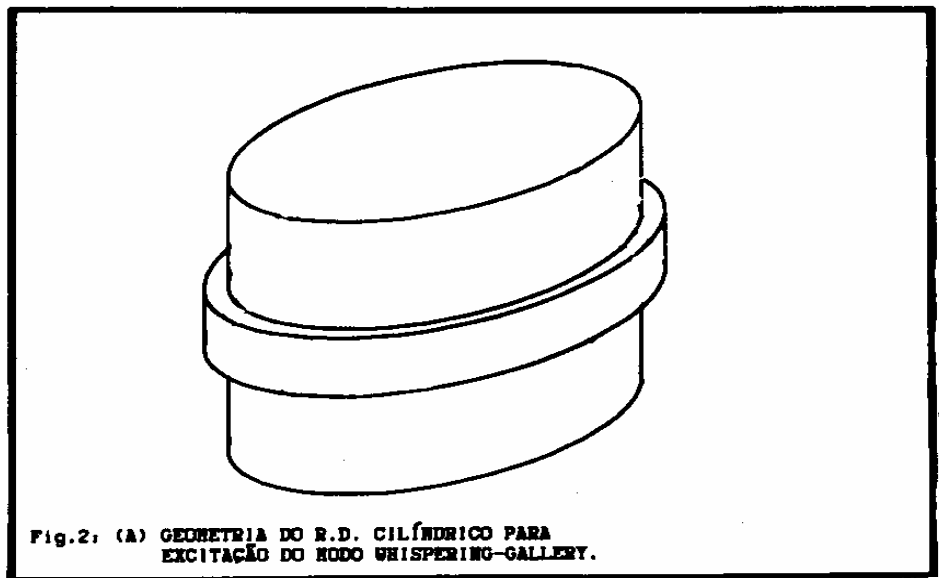
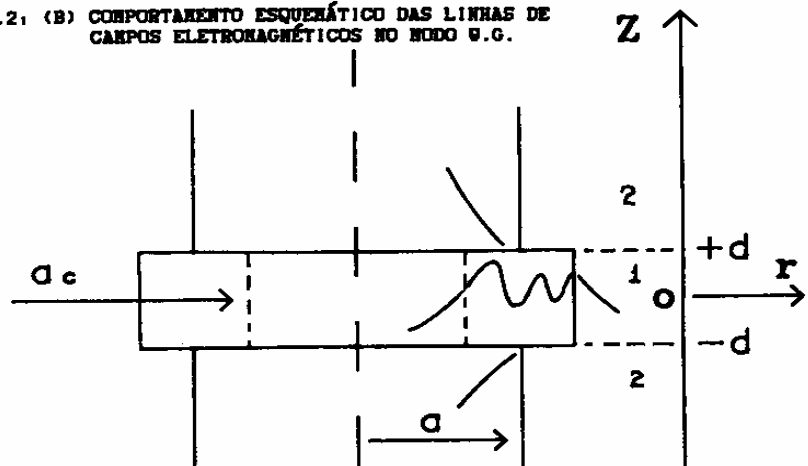


Fig.2: (A) GEOMETRIA DO R.D. CILINDRICO PARA EXCITACAO DO MODO WHISPERING-GALLERY.

Fig.2: (B) COMPORTAMENTO ESQUERATICO DAS LINHAS DE CAMPOS ELETRONAGNETICOS NO MODO W.G.



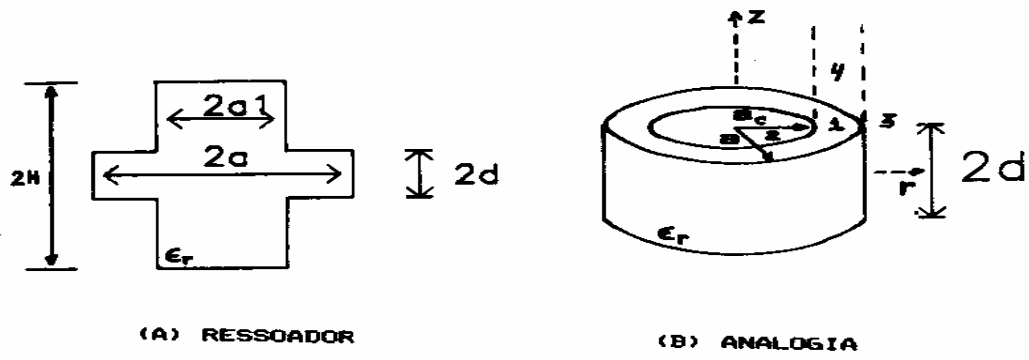


Fig. 3 : RESSOADOR DIELÉTRICO NO MODO WHISPERING-GALLERY E O ANEL EQUIVALENTE PARA O CÁLCULO DA FREQUENCIA DE RESSONÂNCIA.

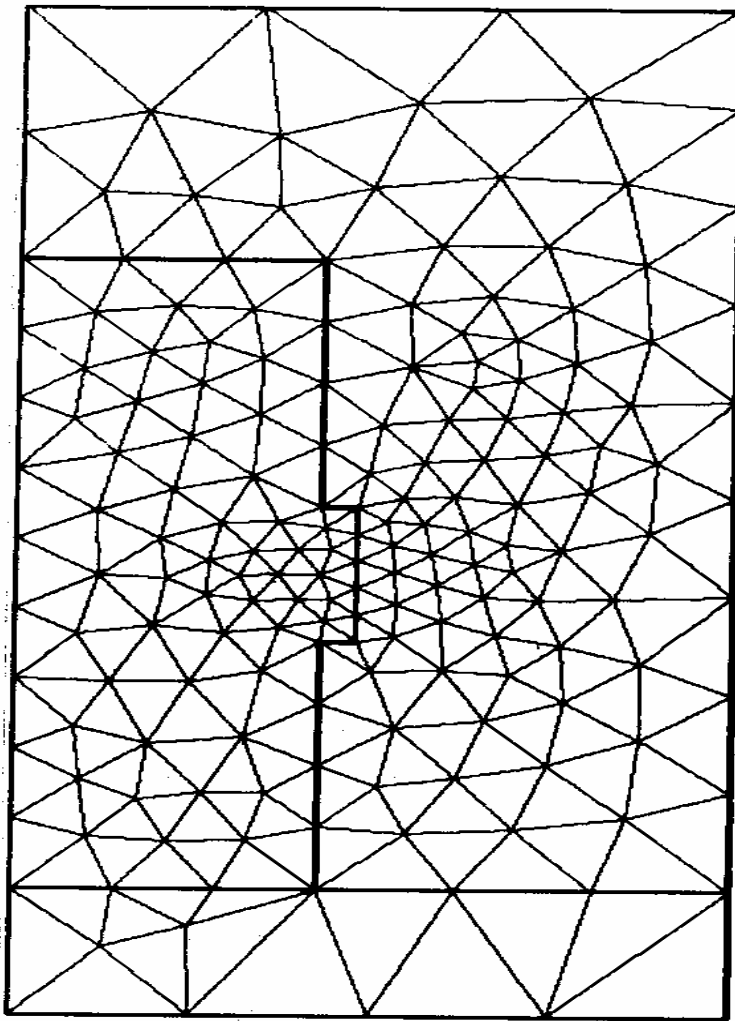


Fig.4: (A) DIVISÃO EM MALHA DA GEOMETRIA DO R.D. À W.G. PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS. (6).

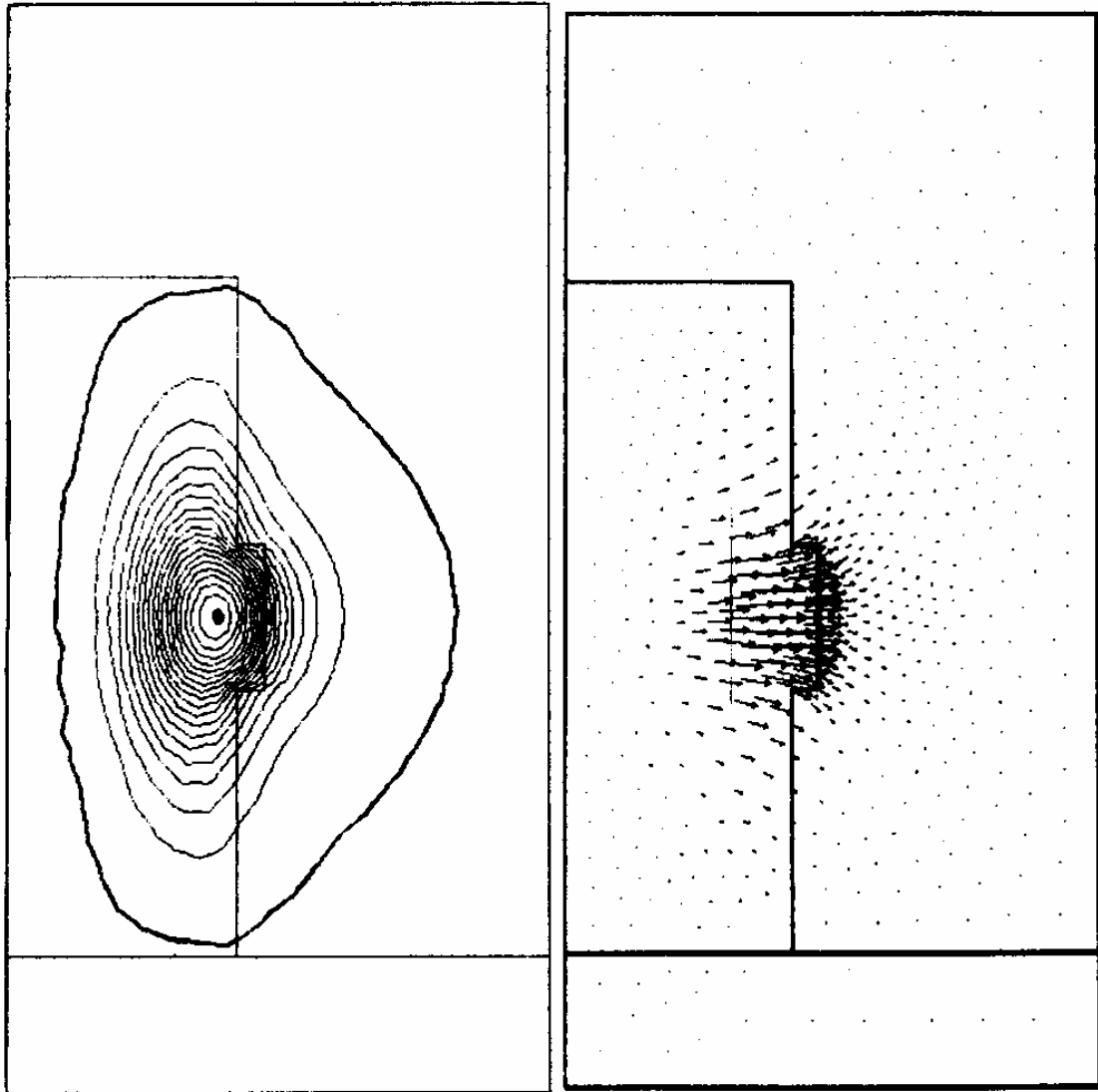
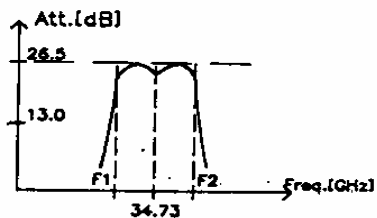
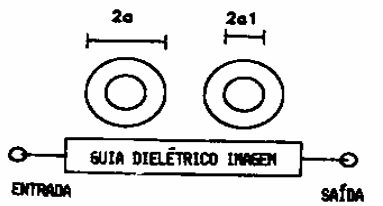


Fig. 4 : (B) LINHAS EQUI-AMPLITUDES DO CAMPO MAGNÉTICO NO PLANO (r,z) , $E_r = 36$, $F = 88,8$ GHz.
 MODO: $n = 7$, $m = 0$, $l = 0$.

(C) VETOR CAMPO MAGNÉTICO NO PLANO (r,z) , $E_r = 36$,
 $F = 88,8$ GHz.
 MODO: $n = 7$, $m = 0$, $l = 0$.

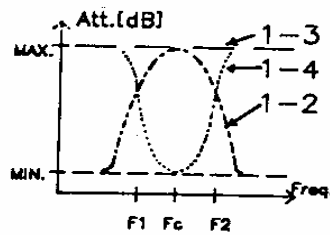
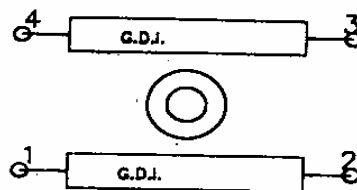


CURVA DE RESPOSTA DO FILTRO COM R.D. À M.G.M.

R.D. a W.G.M.: $\epsilon_r = 36$
 $2a = 5.3 \text{ mm}$
 $2a_1 = 4.71 \text{ mm}$
 $2d = 1.4 \text{ mm}$

G.D.I.: $\epsilon_r = 9.6$
 $2a = 2. \text{ mm}$
 $b = 1. \text{ mm}$

(A)



CURVA DE RESPOSTA DO FILTRO DIRETIVO

(B)

Fig. 5 : (A) FILTRO STOP-BAND COM RESSOADOR DIELETRICO NO MODO WHISPERING-GALLERY.

(B) FILTRO DIRETIVO COM RESSOADOR DIELETRICO NO MODO WHISPERING-GALLERY.

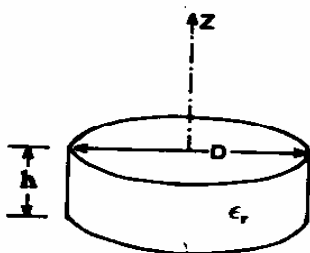
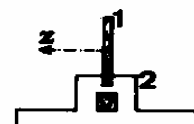


Fig.6: RESSOADOR DIELETRICO PLANAR NO MODO WHISPERING-GALLERY.



(A)



(B)

1. RESSOADOR NO MODO W.G.
 2. TRANSIÇÃO GUIA DE ONDA - GUIA DIELETRICO
 3. GUIA DIELETRICO IMAGEM

Fig. 7 : MONTAGEM PARA MEDIDAS EM TRANSMISSÃO COM GUIA DIELETRICO IMAGEM PARA A OBTENÇÃO DA FREQUENCIA DE RESSONANCIA E FATOR DE QUALIDADE DOS R.D. À M.G.M. NA BANDA MILIMÉTRICA.

(A) VISTA LATERAL. (B) VISTA FRONTAL.