



Ministério da Ciência e Tecnologia

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

**I RELATÓRIO CIENTÍFICO
À FAPESP DO PROJETO DE AUXÍLIO À PESQUISA
Processo nº 2001/02496-6**

**MONOTRON E CAVIDADES AZIMUTALMENTE CORRUGADAS :
APLICAÇÃO À GERAÇÃO DE MICROONDAS DE ALTA POTÊNCIA**

PEDRO JOSÉ DE CASTRO

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE
CENTRO DE TECNOLOGIAS ESPECIAIS - CTE
LABORATÓRIO ASSOCIADO DE PLASMA
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, SP
ABRIL 2003**

ÍNDICE

RESUMO	01
1. INTRODUÇÃO	02
2. PROJETO MONOTRON	04
3. ESTUDO DE RESSOADORES CORRUGADOS AZIMUTALMENTE	10
4. MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE DE MATERIAIS METÁLICOS	16
5. DESENVOLVIMENTO DE RESSOADORES DIELÉTRICOS	18
6. ORIENTAÇÃO DE ESTUDANTES E BOLSISTAS	21
7. PARTICIPAÇÃO EM BANCAS	22
8. PARTICIPAÇÃO EM CONGRESSOS	22
9. TRABALHOS PUBLICADOS	23

RESUMO

O presente Relatório Científico de atividades trata da construção e operação inicial de um monotron em 6,7 GHz para geração de microondas de alta potência, do estudo de ressoadores cilíndricos com secção transversa azimutalmente corrugada, da determinação de condutividade elétrica de materiais metálicos e do desenvolvimento de ressoadores dielétricos para aplicação em telecomunicações. Nessas pesquisas têm sido já utilizados diversos componentes de microondas e de vácuo que foram adquiridos no atual projeto da FAPESP. Os primeiros experimentos do monotron revelaram um bom desempenho do catodo emissor de elétrons fornecendo 10 kV de tensão e 2,7 A de corrente de catodo. Estudos quanto à construção estão sendo efetuados para otimizar o seu desempenho com o aumento da corrente de catodo. Na próxima etapa a ênfase será dada para a instalação da linha de transmissão da radiação gerada pelo monotron, com os componentes necessários como antena, atenuador de potência, acoplador direcional, medidor de potência com o objetivo de detectar e medir a frequência de oscilação e potência de saída. Ressoadores cilíndricos com corrugações azimutalmente periódicas descritas por uma função senoidal são investigados teórica e experimentalmente; a teoria é comparada com os experimentos em cavidades com 4 e 8 períodos de corrugação transversal e amplitudes de corrugação de 10 e 20% em relação ao raio médio, sendo obtida uma boa concordância com os valores medidos; uma comparação dos Q ôhmicos desses ressoadores é feita com os cilíndricos de secção circular. Apresenta-se ainda um método bastante versátil para medir a condutividade elétrica de metais em frequência de microondas; as grandezas medidas mostram-se extremamente consistentes com os valores tabelados pela literatura.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o LAP/INPE está construindo uma máquina para experimentos de plasma de fusão - o Tokamak ETE [s. 2]. O projeto do Tokamak representa um esforço brasileiro para iniciar a pesquisa no âmbito da fusão nuclear controlada, que constitui uma forma alternativa de energia prevista para este início de milênio. Na máquina em questão serão estudados vários fenômenos da física envolvida e serão feitos vários diagnósticos como a determinação dos parâmetros do plasma – temperatura e densidade.

Para melhorar as condições de plasma inicial está planejado um sistema de radiofrequência para pré-ionização do plasma no tokamak ETE. A finalidade da pré-ionização é criar um plasma inicial de baixa temperatura e densidade instantes antes da descarga principal de partida, economizando desta forma uma quantidade de energia que pode ser usada para prolongar a duração da corrente de plasma. Além disso, tal fato possibilita que o início da descarga principal ocorra longe das paredes da câmara, diminuindo a contaminação do plasma por impurezas. A pré-ionização por ECR (ressonância eletron-ciclotrônica) tem sido usada em muitos tokamaks. Ela se baseia no fenômeno de ressonância entre uma onda eletromagnética lançada num gás e o movimento ciclotrônico dos elétrons num campo magnético.

Tendo em vista que comercialmente não há fontes de microondas na faixa de 5 a 11 GHz e que gerem radiação em algumas dezenas de quilowatts com pulsos de longa duração (>1 ms), estudos têm demonstrado que o monotron poderia ser utilizado para essas aplicações [s. 2]. O monotron – o mais simples dos geradores de microondas – poderia preencher esta lacuna e se construído, poderia ser usado no sistema de pré-ionização do plasma tori-esférico do tokamak ETE do LAP/INPE.

O funcionamento do monotron requer um sistema de alto vácuo, visto que o feixe de elétrons requer um meio sem impurezas para a sua propagação. Para medidas de potência propomos o uso de um atenuador que suporte a alta potência envolvida, acrescidos de um detector-sensor e um medidor de potência, além de outros acessórios para completar a linha de transmissão de testes. Uma antena do tipo corneta coletará a radiação emitida pelo monotron.

As novas etapas do projeto girotron se direcionam às novas exigências da física dos plasmas do LAP/INPE, com a pesquisa voltada para novos tipos de ressoadores e fontes de microondas de alta potência. Foi concretizado um estudo inicial tanto teórico como experimental de ressoadores abertos corrugados [s. 3] para uso em girotrons harmônicos e em um gerador do tipo monotron. Um dos aspectos interessantes desses ressoadores corrugados de perfil senoidal é a sua maior resistência à ruptura dielétrica por campos elétricos intensos em comparação às

cavidades dos magnetrons tradicionais, além de apresentar interessantes propriedades eletrodinâmicas em termos de seleção de modos. A forma contínua da estrutura senoidal permite que não haja acúmulo de cargas elétricas. Com base em nossos estudos analíticos, foram confeccionados ressoadores de secção transversa corrugada senoidalmente para uso em girotrons harmônicos. O seu caráter inédito manifesta-se no estudo das propriedades citadas e no seu potencial para as aplicações propostas. Um trabalho inicial já foi realizado que focaliza teoria e experimentos.

Para o cálculo dos fatores de qualidades de cavidades ressonantes faz-se necessário conhecer o real valor da condutividade elétrica do material da cavidade a ser investigada, que pode variar na frequência de ressonância desejada. Assim, foi criado um método versátil e prático para a medição da condutividade elétrica para quaisquer materiais [s. 4].

O desenvolvimento de ressoadores dielétricos para aplicação em circuitos de microondas representa uma das primeiras tentativas no país nesse sentido, a partir de tecnologias e matérias-primas nacionais [s. 5]. Tais dispositivos estão sendo desenvolvidos no nosso Laboratório para uma possível aplicação no circuito de microondas de um Satélite de Comunicações do INPE. Alguns protótipos já foram confeccionados e caracterizados e, atualmente, estão sendo estudados ressoadores de nanotitanato de bário dopados com zircônia, com os objetivos de melhorar as suas características em microondas. Este assunto reveste-se de bastante importância pelo fato de que nesta área (Cerâmicas Eletro-Eletrônicas) há dois estudantes – um de Iniciação Científica e outro de Mestrado.

2. PROJETO MONOTRON

Conforme estudos já empreendidos, os atributos do monotron [1] o tornam indicado para aplicação em tokamaks esféricos, onde fontes de microondas de 5 a 11 GHz são requeridas para gerar corrente e aquecer plasmas confinados magneticamente [2,3]. Concretamente a sua aplicação está endereçada para o sistema de pré-ionização do plasma do Tokamak ETE, ora em construção no LAP/INPE.

Os primeiros estudos conceituais do monotron datam de 1940 e indicavam uma eficiência máxima teórica de 14,5%. Tal fato levou o monotron a ser considerado um dispositivo de pouco valor prático. Os nossos estudos, no entanto, vieram demonstrar que eficiências de 20% são atingidas com feixes de elétrons de energias fracamente relativísticas (~100 keV) em interação com um modo ressonante TM circularmente simétrico. Fundamentando-se nesta reavaliação, foi proposta a construção de um protótipo experimental para geração de microondas em 6,7 GHz com 20 kW de potência média para pré-ionização e aquecimento de plasmas em tokamaks esféricos.

O monotron é o mais simples das válvulas de microondas, sobretudo por não requerer a aplicação de um campo eletromagnético externo. Constitui um oscilador por efeito de tempo de trânsito em que um feixe de elétrons atravessa a região de interação em um ângulo de trânsito próximo de $(4N+1)\pi/2$, com N inteiro. Nesta condição de sincronismo, o feixe excita e interage instavelmente com um campo de RF fazendo que as oscilações eletromagnéticas cresçam às expensas da energia contínua do feixe injetado na cavidade. Formam-se então agrupamentos de elétrons que chegam à outra extremidade da cavidade em uma fase desaceleradora do campo de RF e assim transferem energia para a mesma cavidade. Os agrupamentos de elétrons constituem uma componente alternada da corrente alternada de convecção que por sua vez induz nas paredes da cavidade para sustentar as oscilações de forma consistente. Prescindindo de um campo magnético externo e outros atributos, o monotron torna-se um dispositivo compacto, de baixo peso e de fácil construção e manutenção.

A Fig. 2.1 apresenta um diagrama esquemático do monotron. A simulação completa do monotron e que inclui o circuito de saída é mostrada na Fig. 2.1 para o instante $t=1,5\mu\text{s}$ no regime estacionário. A cavidade ressonante ao guia de onda de saída através de uma íris circular de raio 0,6 cm que transfere a potência de RF gerada na cavidade ao guia de saída (de raio 2,0 cm) que opera no modo TM_{01} . Para a simulação de um guia de comprimento infinito na mesma Fig.2.2, instala-se um disco resistivo ($\rho=1,6 \Omega\cdot\text{m}$) com resistência por unidade de área igual à impedância de onda do modo TM_{01} , isto é $Z_{\text{TM}}=\rho/e_t$ onde $e_t=1,0$ cm representa a espessura do

disco. Este, por sua vez, é posicionado a $\lambda_g/4$ (λ_g – comprimento de onda guiada) da extremidade curto-circuitada do guia, que se reflete como uma impedância infinita em paralelo com a resistência casada. Assim, o disco resistivo se comporta como um calorímetro ideal que absorve toda a energia radiada pela abertura circular. Note-se também na Fig. 2.2 que o anodo coletor consiste em um bloco metálico maciço para assegurar um resfriamento eficiente em regimes com pulsos de longa duração (vários microsegundos).

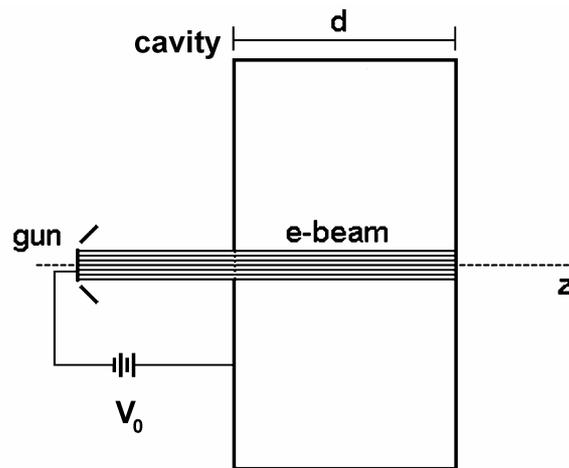


Fig. 2.1. Diagrama esquemático do monotron

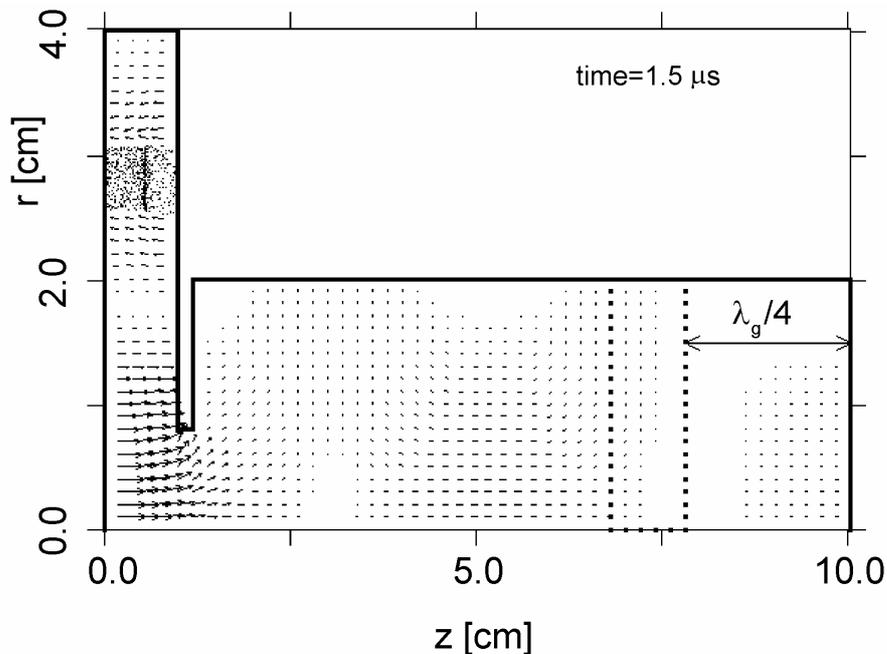


Fig. 2.2. Configuração de simulação por partículas do monotron TM_{020} com o feixe agrupado no regime estacionário (O disco absorvedor de resistividade $1,6 \Omega.m$ é instalado a $\lambda_g/4$ da terminação curto-circuitada do guia de saída.)

O material emissor de elétrons que está sendo empregado é um filme de óxido de bário depositado sobre uma superfície de níquel. Tal material apresenta uma densidade de emissão de $3,0 \text{ A/cm}^2$ para operação do canhão no regime limitado por temperatura. Futuramente pretende-se empregar catodos de hexaboreto de lantânio com densidade típica de 10 A/cm^2 .

Aspectos técnicos de montagem e construção do monotron TM_{02} encontram-se nas Fig. 2.3 e 2.4. A Fig. 2.3 representa uma vista tridimensional da câmara do monotron, onde são indicadas as quatro portas de acesso e isoladores de cerâmica utilizados na polarização do catodo (-38 kV) e na alimentação do filamento de aquecimento da faixa emissora. Uma vista geral de toda a estrutura e montagem é mostrada na Fig. 2.4, incluindo a bomba turbomolecular de vácuo.

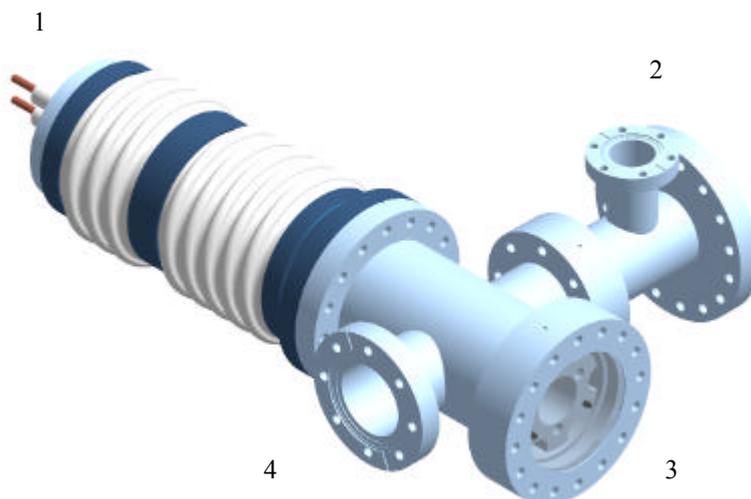


Fig. 2.3. Câmara do monotron e portas de acesso (1: alimentação do canhão; 2: sistema de vácuo; 3: saída da radiação; 4: diagnóstico da corrente de coletor)

Além do desenvolvimento tecnológico, esta linha de pesquisa justifica-se pelo fato de que na requerida de radiação eletromagnética coerente de dezenas de kilowatts e que operem em pulsos de longa duração ($>1\text{ms}$) não se encontram geradores de microondas disponíveis comercialmente. As atividades foram concentradas na construção do monotron em $6,7 \text{ GHz}$ complementadas pela fabricação da estrutura mecânica, flanges, cavidade com íris ressonante. A configuração final do canhão foi definida após intensos testes térmicos par determinar um arranjo que assegurasse, além de um grau de confiabilidade, uma máxima eficiência térmica de aquecimento do catodo. Entre as configurações testadas (incluindo um esquema de aquecimento indireto com o filamento aquecedor embutido em um disco de alumina), chegou-se a um arranjo

por aquecimento indireto em que o filamento de tungstênio, a 2500°C, por transferência térmica radiativa mantém o catodo aquecido na temperatura de operação de 1000°C para a emissão termiônica dos elétrons formadores do feixe eletrônico.

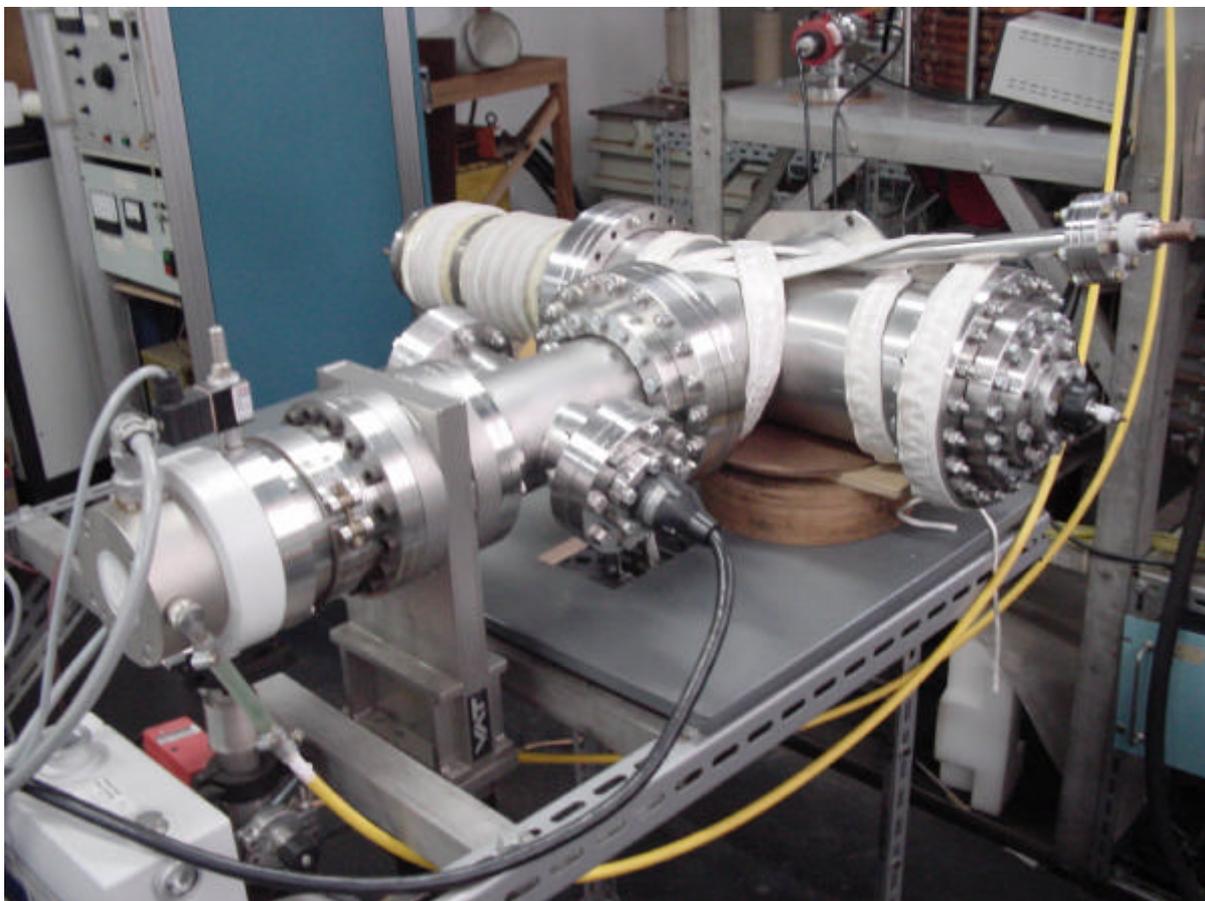


Fig. 2.4. Vista geral da estrutura e montagem do monotron

Uma fonte pulsada de alta tensão é responsável pelo disparo do canhão de elétrons do monotron. Esta fonte usa um tetrodo que realiza a dupla função de chavear a energia armazenada em um banco de capacitores e regular a tensão de saída. Um resistor de 2,5 k Ω em série com o tetrodo protege o sistema contra o risco de curto-circuito. Como a corrente do tetrodo está limitada em torno de 10 A no caso de curto-circuito, a tensão de saída (tensão de carga) suporta até no máximo 25 kV. O sistema pulsado tem uma taxa de repetição de cerca de 1 kHz e uma largura de pulso máxima de 50 μ s.

Os primeiros experimentos do monotron nas condições de catodo quente constataram geração e transporte do feixe de elétrons, fixando a tensão de catodo em 10 kV (para obtenção da frequência teórica de oscilação em torno de 6,7 GHz). Os melhores resultados foram obtidos para uma tensão de filamento de 75 V – que corresponde a uma temperatura de catodo de cerca

de 1000°C. Esses resultados superaram a expectativa e foram os seguintes: tensão de catodo: 10 kV; tensão de saída: 20 kV; corrente de grade: 0,9 A; corrente coletor: 3,1 A.

A Fig. 2.5 apresenta um oscilograma gravado direto do experimento (canal 1- tensão de saída; canal 2 – tensão de catodo; canal 3 – corrente de coletor; canal 4 – corrente de grade). A corrente de grade deveria ser próxima de zero, então se constatou que parte do feixe ficou retida pela grade. Assim, para experimentos futuros deverá haver uma melhor focalização do feixe de elétrons para minimizar a corrente de grade e assim aumentar a corrente de catodo. Os pulsos de tensão (de saída e de catodo) em relação ao resistor de 2,5 kΩ fornecem a corrente total de 4,0 A $\{I_t = (20-10) \text{ kV}/2,5 \text{ k}\Omega = 4,0 \text{ A}\}$, que está consistente com a soma das correntes de grade (~0,9 A) e coletor (~3,1 A).

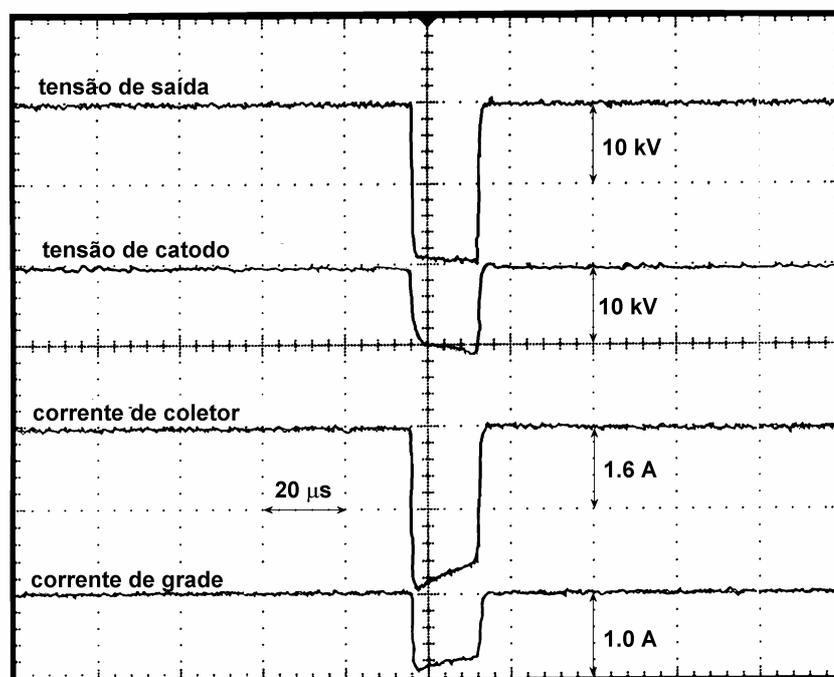


Fig. 2.5. Oscilograma com tensão de catodo e pulsos de corrente do feixe

O experimento endereçado para o próximo ano será o de montar a linha de transmissão do monotron com os equipamentos necessários para medir a frequência de oscilação e a potência de saída.

Foram iniciados os testes com a cavidade do monotron: testes de excitação (por sonda elétrica) e de detecção (por laço magnético) da potência transmitida pelo guia de onda de saída para medir a frequência de ressonância e avaliar o fator Q de difração do sistema eletrodinâmico, cuja montagem é retratada na Fig. 2.6.

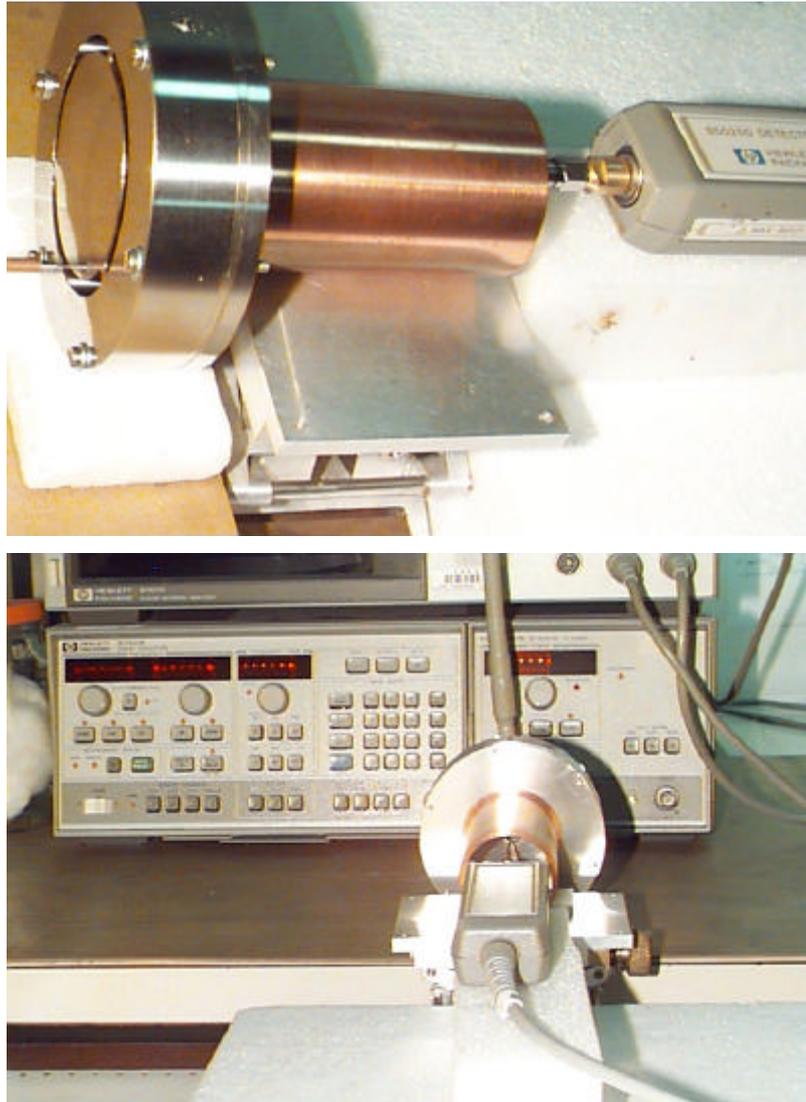


Fig. 2.6. Vistas das montagens da cavidade do monotron em teste com sondas elétricas e magnéticas

Referências:

- [1] BARROSO, J.J. “Design Facts in the Axial Monotron”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 28, p. 652-665, June 2000.
- [2] LUDWIG, G. O. “The ETE Spherical Tokamak Project”. VIII Latin American Workshop on Plasma Physics – LAWPP 98, Tandil, Argentina, November 16-27 1998. *Invited and Review Papers*. Tandil: UNCPBA, 1998, p. 55-65.
- [3] GIRALDEZ, D.C.; CASTRO, P.J. “The ECR Preionization System Project for ETE”. In: 5º Encontro Brasileiro de Física dos Plasmas, Águas de Lindóia, SP, 30/nov-4/dez 1998. *Proceedings*. SBF, 1998, p. 273-276.

3. ESTUDO DE RESSOADORES CORRUGADOS AZIMUTALMENTE SENOIDAIS

No ressoador corrugado azimutalmente senoidal, os modos normais consistem na superposição de harmônicos espaciais, todos com a mesma velocidade de grupo, mas com velocidades de fase individuais, para satisfazer a condição de contorno de que a componente tangencial resultante do campo elétrico se anule ao longo do perfil senoidal de determinado período de corrugação. A Fig. 3.1 apresenta o perfil senoidal em tais estruturas e a Fig. 3.2 mostra as correspondentes linhas de campo elétrico em uma cavidade de 8 períodos para os modos π (a) e 2π (b), respectivamente.

A cavidade azimutalmente corrugada possui importante aplicação em girotrons harmônicos porque ela possibilita eficiente interação harmônica entre um feixe helicoidal de elétrons e um determinado modo TE da composição de modos ou harmônicos espaciais, representados por componentes de Fourier [1-4] que se superpõem e coexistem no interior da cavidade para satisfazer as condições de contorno na parede corrugada. Confinados por um campo magnético uniforme B_0 em um sistema axi-simétrico, os elétrons são injetados (com energia γmc^2) na cavidade povoada de modos TE e a atravessam girando – na frequência ciclotrônica $\omega_B = eB_0 / \gamma m$ (onde e e m representam a carga e a massa do elétron, respectivamente; γ é o fator relativístico) – em torno do eixo do sistema. Ao fim do percurso, os elétrons terão transferido energia para o campo de RF da cavidade desde que determinada condição de sincronismo tenha sido satisfeita. A condição de sincronismo significa que o elétron mantém a mesma relação de fase com uma particular componente de Fourier, ou seja, $\omega t - n\Phi = const.$, sendo n o número harmônico, ω – a frequência angular do campo de RF e Φ – a posição angular do elétron, isto é, $d\Phi/dt = \omega_e$. Tem-se então $\omega = n\omega_e$ que reescrita na forma

$$B_0 [kG] = \frac{1}{n} \frac{gf [GHz]}{2,8}$$

estabelece a condição de sincronismo elétron-campo de RF.

Em termos práticos, isto significa que a intensidade de campo magnético em um girotron harmônico fica reduzida pelo fator n (o número harmônico da interação) em relação a um girotron que opere na frequência ciclotrônica fundamental ($n=1$). Como ilustração, um girotron em 32 GHz requer um campo magnético de 12,3 kG para operação fundamental, enquanto este campo se reduz a 1,5 kG em operação harmônica com $n=8$. Redução de campo magnético implica em redução de peso, volume e energia de alimentação das bobinas com a conseqüente possibilidade de utilização de ímãs permanentes.



Fig. 3.1. Vistas dos ressoadores com corrugação transversa de perfil senoidal (o comprimento e o diâmetro externo dos cilindros são respectivamente 10,0 e 3,2 cm)

Desta forma, o emprego de cavidades azimutalmente corrugadas em girotrons harmônicos torna possível a realização de fontes de radiação submilimétrica de alta potência em sistemas compactos e portáteis. Esta linha de pesquisa se insere no programa de colaboração firmado entre o LAP/INPE e o Centro de Pesquisas para o Desenvolvimento da Região do Infravermelho Distante (FIR Center FU) da Universidade de Fukui, Japão. O programa prevê a utilização de um girotron harmônico de 480 GHz – a ser transferido da Universidade de Fukui e instalado no laboratório do tokamak ETE [5]. A aplicação prevista é o diagnóstico de plasma do ETE

(determinação de densidade e do perfil da corrente) a partir de medidas de campo magnético com base na rotação de Faraday.

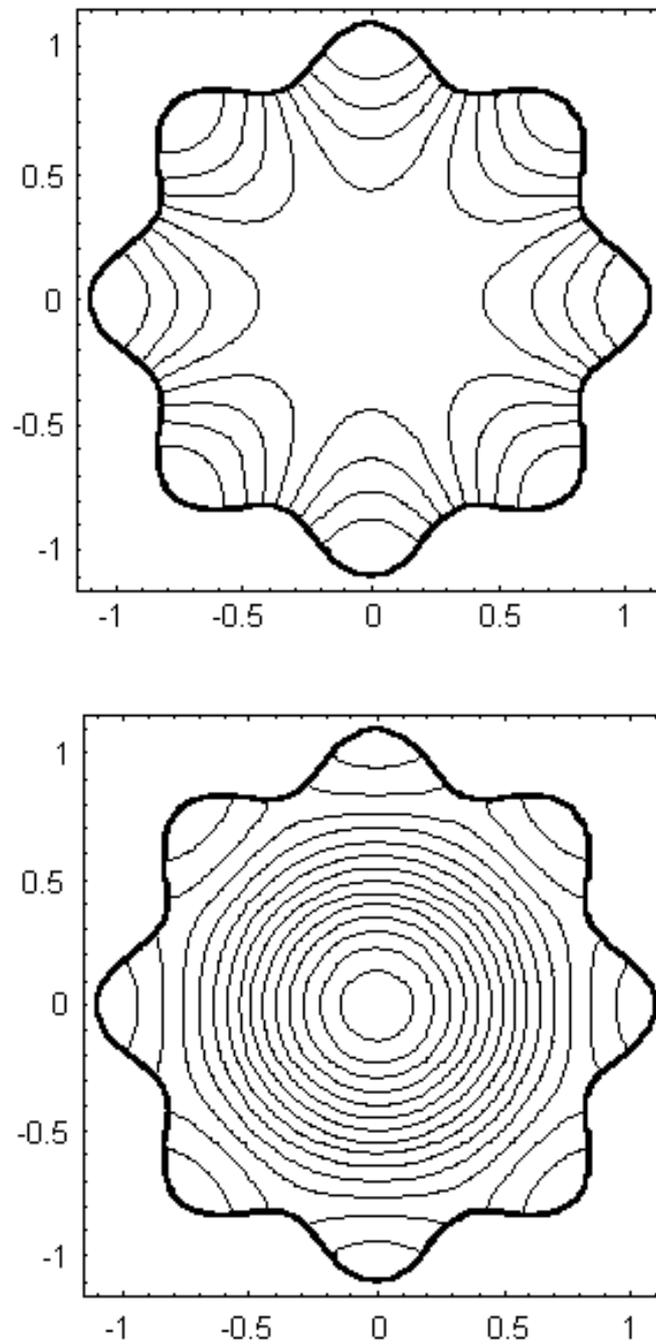


Fig. 3.2. Linhas de campo elétrico em cavidade de 8 períodos para os modos π (gráfico superior) e 2π (inferior)

A construção mecânica de tais estruturas senoidais utiliza a técnica de erosionamento com fio. Neste processo, a cavidade é confeccionada a partir de um tarugo de cobre (de 10 cm de comprimento), onde um fio de latão é introduzido através de um canal de 0,25 mm de diâmetro.

O fio é então aquecido ohmicamente e o seu movimento é controlado por um torno computadorizado para remover a parte interna do tarugo seguindo o trajeto senoidal prescrito. Depois de usinado, dois discos de cobre são fixados nas extremidades do cilindro erosionado, assim fechando o guia de onda oco de 10 cm de comprimento. Utilizando essa técnica, foi confeccionado um conjunto de quatro cavidades de raio médio $R_0 = 1.00$ cm, amplitude de corrugação de $\varepsilon = 0,1$ e $\varepsilon = 0,2$ com períodos de corrugação de $N = 4$ e $N = 8$.

A Fig. 3.3 ilustra a montagem experimental para medir as frequências de ressonância e dos seus associados Q_Ω . Os modos ressonantes TE foram excitados por meio de uma sonda magnética (ou elétrica) que injeta potência através de um furo de diâmetro de 1 mm localizado na tampa [6]. Uma sonda receptora detectou o modo excitado. O tipo de sonda e o local de excitação e extração de potência de microondas dependeram da eficiência de acoplamento para cada modo. Para cada modo detectado, as sondas foram devidamente posicionadas para maximizar a intensidade do sinal detectado, e ao mesmo tempo, para desacoplar o máximo possível a cavidade do circuito externo a fim de obter o Q não-carregado. Desta forma se pôde assegurar que o fator de qualidade medido é o Q ôhmico ou não-carregado. A sua medição decorreu das medições das frequências nos pontos de -3 dB do espectro detectado.

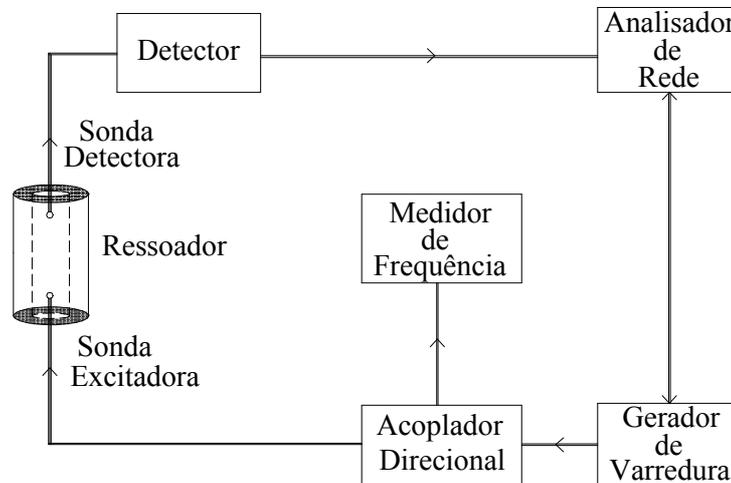


Fig. 3.3. Montagem experimental para medir as frequências de ressonância e os correspondentes Q_Ω dos modos investigados

A Tabela 3.1 apresenta os resultados calculados e medidos das frequências de ressonância e respectivos fatores Q ôhmicos para modos fundamentais TE detectados na faixa de 8 a 25 GHz [8]. O Q_Ω foi calculado adotando o valor da condutividade do cobre como $5,6 \times 10^7$ S/m. Este valor foi medido experimentalmente [7] tendo em vista que não se sabia qual o tipo de cobre usado na usinagem das peças. O valor da condutividade altera significativamente o valor do Q_Ω .

Resta dizer que em relação ao latão, o valor do Q_{Ω} diminui cerca de 90%. Efetuando um tratamento estatístico dos dados, verificou-se que nas medições do Q_{Ω} , o desvio padrão relativo é tipicamente da ordem de 2%.

Como outro padrão de comparação, foram feitas medições para o ressonador cilíndrico de secção circular com raio $R_0 = 1,00$ cm. Como se pode observar pelos resultados mostrados na Tabela 3.1, há uma maior consistência entre os valores experimentais em relação aos calculados, as frequências de ressonância são todas de valores inferiores. Isto se deve a uma maior homogeneidade da estrutura do ressonador cilíndrico reto. Tal fato não ocorre com as estruturas dos ressoadores corrugados, cujas variações azimutais não correspondem exatamente à função senoidal por defeito de fabricação, o que se pôde constatar visualmente. Isto se refletiu nos valores medidos, pois as imperfeições na estrutura senoidal devem ter afetado algumas frequências de ressonância mais que outras, influenciando também no valor do Q_{Ω} , pois altera a relação volume/área da superfície total.

Tabela 3.I. Valores calculados e medidos das frequências de ressonância e respectivos fatores Q ôhmicos para modos fundamentais TE na faixa de 8 a 25 GHz

N	ϵ	Índice do modo ℓ	calculado	medido	calculado	medido
			F [GHz]	$F \pm 1 \times 10^{-3}$ [GHz]	Q_{Ω}	Q_{Ω}
4	0,1	0 (2π)	17,7693	17,6678	17860	13133
4	0,1	1	8,7316	8,6916	9884	7244
4	0,1	2 (π)	12,7979	12,7347	9329	6920
4	0,2	0 (2π)	16,3847	16,3410	15266	12410
4	0,2	1	8,2144	8,2136	9500	7220
4	0,2	2 (π)	10,9479	10,9725	8852	7200
8	0,1	0 (2π)	18,0961	17,9926	18962	14265
8	0,1	1	8,7139	8,6755	9804	8175
8	0,1	2	13,9422	14,1022	9475	7580
8	0,1	3	18,2260	18,3229	8739	7840
8	0,1	4 (π)	20,2738	20,0446	7853	5977
8	0,2	0 (2π)	17,1307	17,1479	16446	12385
8	0,2	1	8,1840	8,1146	7600	5747
8	0,2	2	12,1686	11,9954	7070	5346
8	0,2	3	14,5782	14,3185	6154	5303
8	0,2	4 (π)	15,3839	15,3726	5464	4041
0	0	TE ₀₁	18,3435	18,2854	20302	18929
0	0	TE ₁₁	8,9116	8,8852	10083	9485
0	0	TE ₂₁	14,6494	14,6083	10357	9483
0	0	TE ₃₁	20,1010	19,9727	10383	9125
0	0	TE ₄₁	25,4158	25,3378	10332	8750

De qualquer forma, foi verificada uma boa concordância entre a teoria e os experimentos; para as frequências de ressonância uma discrepância média situou-se abaixo de 1%, com exceção

de um modo ($N = 8$, $\varepsilon = 0,2$ e $\ell = 3$) que atingiu 1,8%; quanto aos Q_n os piores resultados de discrepância alcançaram 20-26%, principalmente para as frequências mais altas, acima de 20 GHz.

Resta ainda considerar que, relativamente às frequências de ressonância, o cálculo dos fatores de qualidade envolve uma propagação de erro pelas expansões em série dos campos e pela integração nas superfícies das cavidades e isso se traduz num resultado aproximado. As estruturas em guias de ondas cilíndricos em estudo com perfil corrugado de formato contínuo apresentam um aspecto atraente para dispositivos eletrônicos relativísticos pela sua maior resistência à ruptura elétrica de campos de RF em comparação com as cavidades tradicionais de magnetrons. Ressonadores azimutalmente corrugados encontram aplicação em fontes de alta potência em ondas milimétricas.

Referências:

- [1] N. Kroll, "The unstrapped resonant system", in *Microwave Magnetrons*, G. B. Collins, ed., McGraw-Hill, New York, 1948, ch. 2.
- [2] P. S. Rha, L. R. Barnett, J. M. Baird, and R. W. Grow, "Self-consistent simulation of harmonic gyrotron and peniotron oscillator operating in a magnetron-type cavity", *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 36 (4), p. 789-800, 1989.
- [3] G. F. Brand, "Resonant frequencies of a rising-sun gyrotron cavity", *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, vol. 17, No. 1, p. 269-281, 1996.
- [4] R.A. Corrêa, and J.J. Barroso, "Electromagnetic field and cutoff frequencies of the zimuthally rippled wall waveguide", *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, 21(6), p. 1019-1029, June 2000.
- [5] G.O. Ludwig et al., "The ETE spherical tokamak project", INPE, São José dos Campos, Brazil, Tech. Rep. 7301-RPQ/699, Aug. 1999.
- [6] P.J. Castro, J.J. Barroso, and J.P. Leite, "Resonance frequency of cavities with sinusoidally rippled cross sections", *Proc. Int. Microwave and Optoelectronics Conf.*, Belém-PA, Brazil, Aug. 6-10, 2001, p. 75-78.
- [7] J.J. Barroso, P.J. Castro e J.P. Leite, "Medida da condutividade elétrica de materiais metálicos através do fator Q de uma cavidade ressonante". *Anais do X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, Recife-PE, Brazil, 12-16 de agosto, 2002, p. 66-68.
- [8] P.J. Castro, J.J. Barroso e J.P. Leite, "Determinação do fator Q ôhmico de ressoadores com corrugação transversa de perfil senoidal". *Anais do X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, Recife-PE, Brazil, 12-16 de agosto, 2002, p. 561-565.

4. MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE DE MATERIAIS METÁLICOS

Apresenta-se um método de medida da condutividade elétrica de materiais metálicos a partir da determinação do fator de qualidade Q de uma cavidade ressonante. A cavidade é de geometria cilíndrica circular com razão de aspecto $L/R=0,5$ sendo L e R , respectivamente, o comprimento e o raio, conforme a Fig. 4.1. A base inferior e a superfície lateral são confeccionadas em alumínio enquanto a tampa circular superior é feita do material de condutividade elétrica σ_x a ser determinada. Desta forma, tem-se uma grande flexibilidade para a medição da condutividade de vários materiais com a simples substituição do disco circular superior que constitui uma amostra do material a ser examinado.

Para avaliação do método, são medidos os fatores Q carregados da cavidade com tampa superior removível. O modo de operação TE_{011} é excitado por uma sonda elétrica; uma sonda receptora fornece a medida do fator Q por leitura direta das frequências nos pontos de -3dB no espectro detectado. Então, $Q=f_0/\Delta f$, onde Δf indica a faixa de frequência correspondente ao nível de potência 3dB abaixo do nível da potência de ressonância.

O presente método apenas requer a determinação do fator relativo Q_s/Q_x , que por sua vez relaciona matematicamente a condutividade elétrica σ_s do material padrão – alumínio e a condutividade σ_x do material a ser determinada. Assim, medindo-se Q_s e Q_x e sabendo o valor da condutividade elétrica do alumínio ($\sigma_s=3,10 \times 10^7 \text{ S/m}$), calcula-se σ_x . A Fig. 4.2 expressa a dependência entre o fator Q_x medido e σ_x . Apresentando desvios relativos tipicamente de 2%, as condutividades medidas para as amostras de cobre ($\sigma=5,62 \times 10^7 \text{ S/m}$) e de latão ($\sigma=1,62 \times 10^7 \text{ S/m}$) mostram-se extremamente consistentes com os valores tabelados na literatura. Na verdade esta última figura representa a curva de resposta do “medidor da condutividade”.

O método apresentado para medição de condutividade elétrica reveste-se de dois méritos. Primeiro, a operação mecânica para a determinação da condutividade envolve somente a instalação de um disco (feito do material a ser examinado) em uma cavidade ressonante de referência, onde o contacto elétrico entre a tampa circular e o corpo da cavidade é facilitado pela operação do modo circularmente simétrico TE_{011} . O segundo aspecto refere-se ao fato de que a medição da condutividade baseia-se na razão entre dois fatores Q carregados, não sendo necessários, portanto, experimentos separados para a determinação dos coeficientes de acoplamento entre os circuitos externos e a cavidade, nem a operação na condição de fraco acoplamento.

Pretende-se adiante investigar o comportamento das condutividades elétricas desses

mesmos materiais e de outros metais para várias frequências até as ondas milimétricas. Além disso, as condutividades dos diversos materiais serão medidas em outros modos de ressonância e comparadas com o presente modo TE_{011} .

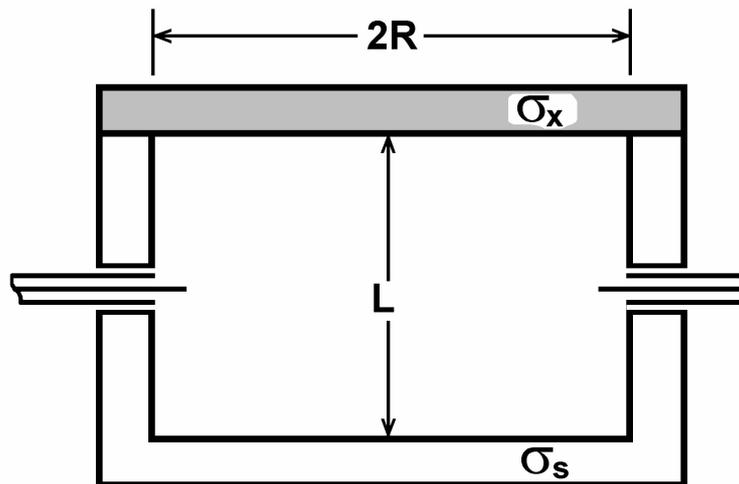


Fig. 4.1. Geometria da cavidade com razão de aspecto $A=L/R=0,5$ com $R=4,00\text{cm}$, e as sondas de excitação e de detecção (σ_x é a condutividade a ser determinada com base na condutividade de referência σ_s .)

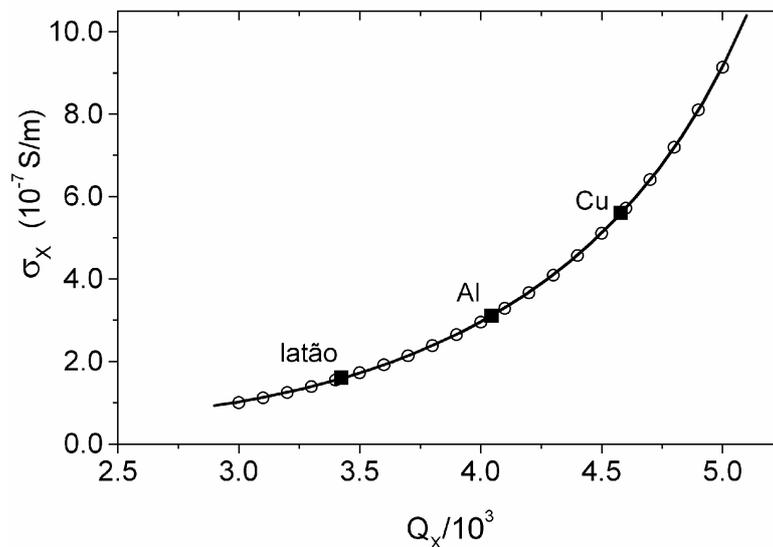


Fig. 4.2. Dependência entre as quantidades normalizadas \tilde{s}_x e \tilde{Q}_x : valores indicados por círculos são obtidos da formulação matemática; a curva contínua representa uma função de ajuste.

5. DESENVOLVIMENTO DE RESSOADORES DIELÉTRICOS

No estágio atual está sendo investigada a influência do estrôncio (Sr) em ressoadores dielétricos de nanotitanato de bário [1-3] nas propriedades em microondas. Os requisitos essenciais desses dispositivos são alta seletividade e estabilidade em frequência, alto valor da constante dielétrica, poucas perdas dielétricas (alto Q) e baixo coeficiente de variação da frequência de ressonância com a temperatura.

Seis amostras foram confeccionadas: uma pura de nanotitanato de bário e outras dopadas com estrôncio nas proporções de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0% em composição molar [3]. As cerâmicas foram preparadas usando matérias primas brasileiras como misturas estequiométricas dos pós, compostas por $0,818 \text{ TiO}_2 + 0,182 \text{ BaCO}_3$ sem e com adição de óxido de estrôncio (SrO) com teores variando de 0,2 a 1,0% em mol. Os pós foram misturados em moinhos de bolas a úmido, e a mistura na forma de pós foi compactada por prensagens uniaxial (40MPa) e isostática (300MPa), produzindo corpos de prova cilíndricos com uma relação H/D pré-estabelecidas (H = altura e D = diâmetro) de modo a obter a faixa de frequência desejada em torno de 5,3 GHz. As cerâmicas foram sinterizadas em duas etapas: inicialmente em 1200°C por 4 horas, e posteriormente em 1360°C por 3 horas. Para a caracterização cerâmica foram utilizadas as técnicas de difração de raios X para identificação das fases presentes (Fig. 5.2). As superfícies de fratura foram observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e fotografadas para análise de sua microestrutura. As características dielétricas em microondas foram determinadas usando uma caixa metálica adequadamente projetada, onde a cerâmica, na forma de um cilindro dielétrico, foi colocada entre duas placas condutoras paralelas. A Fig. 5.1 mostra a montagem experimental para medir a frequência de ressonância, constante dielétrica e fator Q devido às perdas dielétricas dos ressoadores dielétricos (RD) [1].

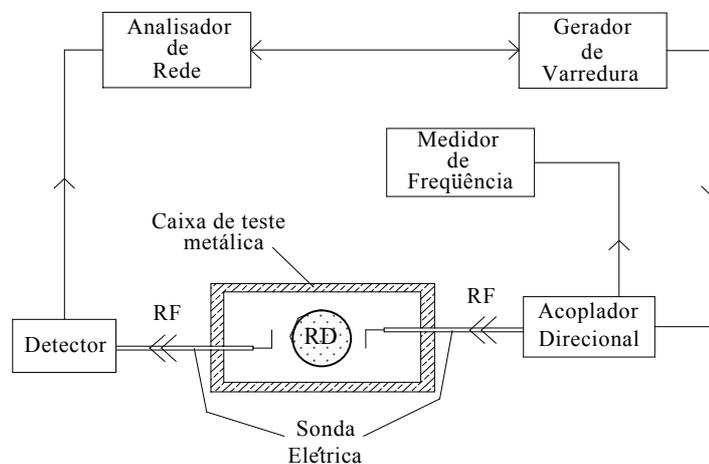


Fig. 5.1. Montagem experimental para medição das características dos RDs em microondas

A análise das cerâmicas por difração de Raios X mostrou a presença de uma fase (composto) que não foi possível ser identificada. Supõe-se que esta pode estar relacionada com a homogeneização da mistura dos pós iniciais [3]. As cerâmicas foram sinterizadas em duas etapas, porque na primeira delas (4h em 1200°C) não ocorreu a formação da fase de nanotitanato de bário. Realmente, após a segunda sinterização observou-se a formação da fase desejada como majoritária. A Fig. 5.2 apresenta os difratogramas de raios X para as cerâmicas investigadas. A posição do pico em $2\theta=36^\circ$ (indicado por asterisco) corresponde à fase não-identificada [3].

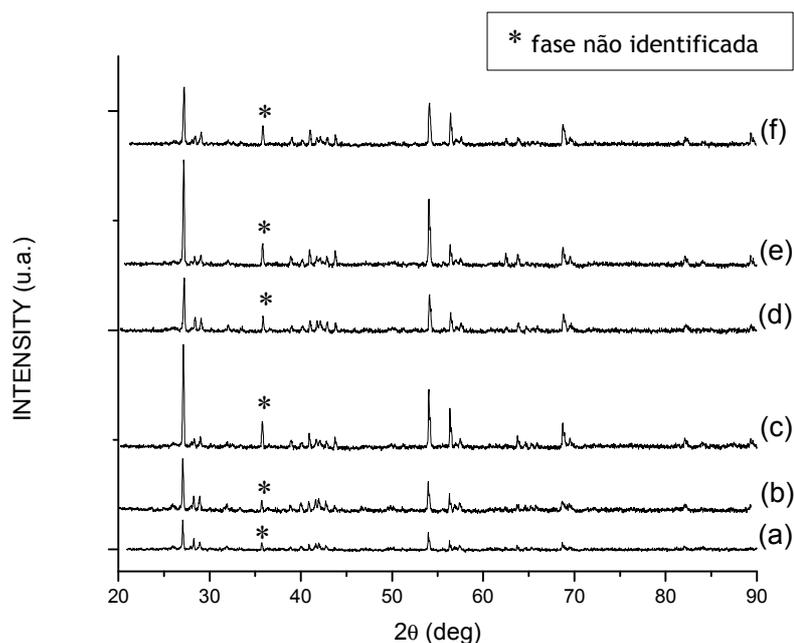


Fig. 5.2. Difratogramas de raios X para as cerâmicas analisadas de Ba₂Ti₉O₂₀: (a) sem adição de Sr, (b) com 0,2 mol % de Sr, (c) com 0,4 mol % de Sr, (d) com 0,6 mol % de Sr, (e) com 0,8 mol % Sr e (f) com 1,0 mol % de Sr

Em relação ao trabalho anterior com adição de nióbio [1] foi melhorado o problema da migração do óxido de titânio para a superfície das cerâmicas. Além disso, o processamento do nanotitanato de bário foi mais bem elaborado, procedendo-se a sintetização e a sinterização simultâneas em uma única etapa. Como resultado obtiveram-se cerâmicas mais densas. De qualquer forma, a densificação deveria ser melhor. O problema é que uma das matérias-primas – o carbonato de cálcio possui partículas com formas inadequadas (em forma de agulha) e assim dificulta um bom empacotamento do pó da amostra (CaCO₃ + TiO₂), fato que resulta no aparecimento de poros relativamente grandes, os quais não são eliminados durante o processo de sinterização [1]. Na próxima etapa (durante o ano de 2003), pretende-se resolver esse problema por meio de uma moagem mais eficiente da mistura. E também estudar a influência do tamanho

do grão da microestrutura da cerâmica (que se forma no processo de sinterização) nas propriedades em microondas.

Os resultados das medidas em microondas para os RDs analisados são apresentados na Tabela 5.I. A sigla 00Nb representa a amostra do nanotitanato de bário puro (sem adição de Sr), 02Nb – com 0,2% de Sr, 04Sr – com 0,4% de Sr, 06 Sr – com 0,6% Sr, 08Sr – com 0,8% de Sr e 10Sr – com 1,0% de Sr.

Tabela 5.I. Valores medidos dos parâmetros dos ressoadores dielétricos em microondas (H – altura, a – raio, f - frequência de ressonância, ϵ – constante dielétrica, Q_o – fator Q devido às perdas dielétricas)

RD	$H \pm 0,04$	$a \pm 0,04$	$f \pm 5,0 \times 10^{-3}$	$e \pm 0,5$	$Q_o \pm 200$
sigla	[mm]	[mm]	[GHz]		
00Sr	4, 10	5,45	7,64540	35,5	3770
02Sr	4, 20	5,45	7,68061	35,2	3824
04Sr	4, 15	5,45	7,67426	35,2	3929
06Sr	4, 10	5,45	7,65263	35,3	4495
08Sr	4, 25	5,40	7,67644	35,2	4610
10Sr	4, 20	5,40	7,69248	35,0	5002

Referências:

- [1] CASTRO, P.J.; NONO, M.C.A. “Microwave Properties of Barium Nanotitanate Dielectric Resonators”. *Journal of Microwave and Optoelectronics*, [on line], v. 1, n. 4, p. 12-19, Sep. 1999. <<http://www.jmo.ene.unb.br>>>
- [2] NONO, M.C.A.; CASTRO, P.J. “Microstructure Study and Crystalline Phase Formation on Nb₂O₅-Ba₂Ti₉O₂₀ Microwave Resonators”. *Advanced Powder Technology*, Trans Tech Publ., p. 11-17, 2003.
- [3] FONSECA, S.T.; NONO, M.C.A.; CASTRO, P.J. “Microstructure study of barium nanotitanate ceramics doped with strontium for microwave application” [CD ROM]. In: Congresso de Microscopia e Microanálise no Mercosul (MICROMAT 2002), Curitiba, PR, 20-22 de novembro, 2002. *Anais. Curitiba, Micromat, 2002*, p. 56-59.

6. ORIENTAÇÃO DE ESTUDANTES E BOLSISTAS

- Estudante: Yulia Koldayeva
 - Nível: Mestrado
 - Curso: Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE) na Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores (CMS) /ETE/INPE. (Bolsa CAPES)
 - Título do Trabalho: “Ressonadores Dielétricos para Microondas de $Ba_2Ti_9O_{20}$ dopados com ZrO_2 ”
 - Instituição: LAP/CTE/INPE, LAS/CTE/INPE (grupo TECAMB)
 - Orientação em conjunto com Maria do Carmo de Andrade Nono (LAS/TECAMB)
 - Data: Início em março/2002.

- Estudante: Solange Tamara Fonseca
 - Nível: Iniciação Científica
 - Curso: Iniciação Científica em Engenharia de Materiais
 - Título do Trabalho: “Desenvolvimento de Ressonadores Dielétricos de Nanotitanato de Bário Ativados com Estrôncio”
 - Instituição: LAP/INPE, LAS/INPE (grupo TECAMB)
 - Orientação em conjunto com Maria do Carmo de Andrade Nono (LAS)
 - Data: Início em fevereiro/2002

- Bolsista: Rosana Rothmeier da Silva
 - Nível: Treinamento Técnico, nível II (Programa de Capacitação Técnica relacionado com o Processo nº 2001/02496-6 da FAPESP)
 - Título do Projeto: “Um Motor de Passo para Posicionamento de Antenas no Processo de Determinação de Diagrama de Radiação de Ressonadores e Geradores de Microondas”
 - Instituição: INPE/FAPESP
 - Data: maio/2002 a abril/2003

7. PARTICIPAÇÃO EM BANCAS

- Banca de **Revalidação de Diploma** de Doutorado de Adalberto Pacífico Comiran (obtido no Instituto de Telecomunicações de Moscou), fevereiro/março, 2002.
- **Presidente da Comissão Examinadora** do Concurso Público do INPE para o cargo de Tecnologista Sênior, Código 59, 4-6 de junho, 2002.

8. PARTICIPAÇÃO EM CONGRESSOS

- X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, Recife-PE, 12-16 de agosto, 2002 (apresentação de trabalhos).

8. TRABALHOS PUBLICADOS

- [1] BARROSO, J.J.; CASTRO, P.J.; LEITE NETO, J.P. “Electrical Conductivity Measurement through the Loaded Q Factor of a Resonant Cavity”. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 24 (1): 79-86, Jan. 2003.
- [2] NONO, M.C.A.; CASTRO, P.J. “Microstructure Study and Crystalline Phase Formation on $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{-Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ Microwave Resonators”. *Materials Science Forum*, 416-418: 11-17, Jan. 2003.
- [3] FREITAS, D.; NONO, M.C.A.; CASTRO, P.J. “Cubic Polycrystalline Zirconia Stabilized With Yttrium and Rare Earth Oxides Mixtures: Processing Phase And Microstructure Characterization”. *Materials Science Forum*, 416-418: 525-530, Jan. 2003.
- [4] CASTRO, P.J.; BARROSO, J.J.; LEITE NETO, J.P. “Determinação do Fator Q Ôhmico de Ressonadores com Corrugação Transversa de Perfil Senoidal”. In: X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, Recife-PE, 12-16 de agosto, 2002. *Anais*. Recife-PE, SBMO, 2002, p. 561-565.
- [5] BARROSO, J.J.; CASTRO, P.J.; LEITE NETO, J.P. “Medida da Condutividade Elétrica de Materiais Metálicos através do Fator Q de uma Cavidade Ressonante”. In: X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, Recife-PE, 12-16 de agosto, 2002. *Anais*. Recife-PE, SBMO, 2002, p. 66-68.
- [6] FONSECA, S.T.; NONO, M.C.A.; CASTRO, P.J.; KURANAGA, C. “ $\text{SrO}_2\text{-Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ Ceramics as Microwave Dielectric Resonators for Telecommunication Applications”. In: 1st Brazil – Material Research Meeting, Rio de Janeiro-RJ, 7-10 July, 2002. *Proceedings*. Rio, SBPMat, 2002, p. 194-196.
- [7] FONSECA, S.T.; NONO, M.C.A.; CASTRO, P.J. “Cerâmicas de Nanotitanato de Bário para Aplicação de Ressonadores Dielétricos em Microondas”. Relatório de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE). Apresentado no Seminário de Iniciação Científica do INPE, 10-11 de junho, 2002. *Relatório INPE-9036-PRE/4713*, Laboratório Associado de Plasma, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, agosto de 2002. 15 p.
- [8] BARROSO, J.J.; CASTRO, P.J.; LEITE, J.P. “Um Método para Medir a Condutividade Elétrica de Metais em Frequências de Microondas”. XXIII Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência - CBRAVIC, Florianópolis-SC, 10-12 de julho, 2002.
- [9] FONSECA, S.T.; NONO, M.C.A.; CASTRO, P.J. “Microstructure study of barium nanotitanate ceramics doped with strontium for microwave application” [CD ROM]. In: Congresso Int. de Microscopia e Microanálise no Mercosul (MICROMAT 2002), Curitiba, PR, 20-22 de novembro, 2002. *Proceedings*. Curitiba, Micromat, 2002, p. 56-59.