

Aula 4

Plasmas de microondas

Plasmas de microondas

- A interação de campos eletromagnéticos em frequências altas (microondas) usualmente ocorrem em regime coletivo, onde não ha distinção entre elétrons e íons. Nos anos 80 houve um grande acréscimo nas aplicações de plasmas de microondas em microeletrônica, em reatores de processamento químico e em tochas.

Características dos Plasmas de Microondas

- Os plasmas de microondas são normalmente gerados a partir de válvulas do tipo magnetron e apresentam energias maiores que as obtidas em plasmas DC ou RF. Não utilizam eletrodos e podem ser utilizados com paredes dielétricas. Os regimes de pressão também são diferenciados.

Características dos Plasmas de Microondas

- Os potenciais típicos de microondas são de alguns keVs enquanto que em plasmas DC e RF situam-se entre 1 e 15 eV. A densidade a 2,45 GHz é de 7×10^{16} e/m³. Os sistemas convencionais de microondas trabalham em pressões de 10 mTorr a 1 atm. Os ECRs podem trabalhar entre 1 μ Torr e 10 mTorr.

Frequências de microondas

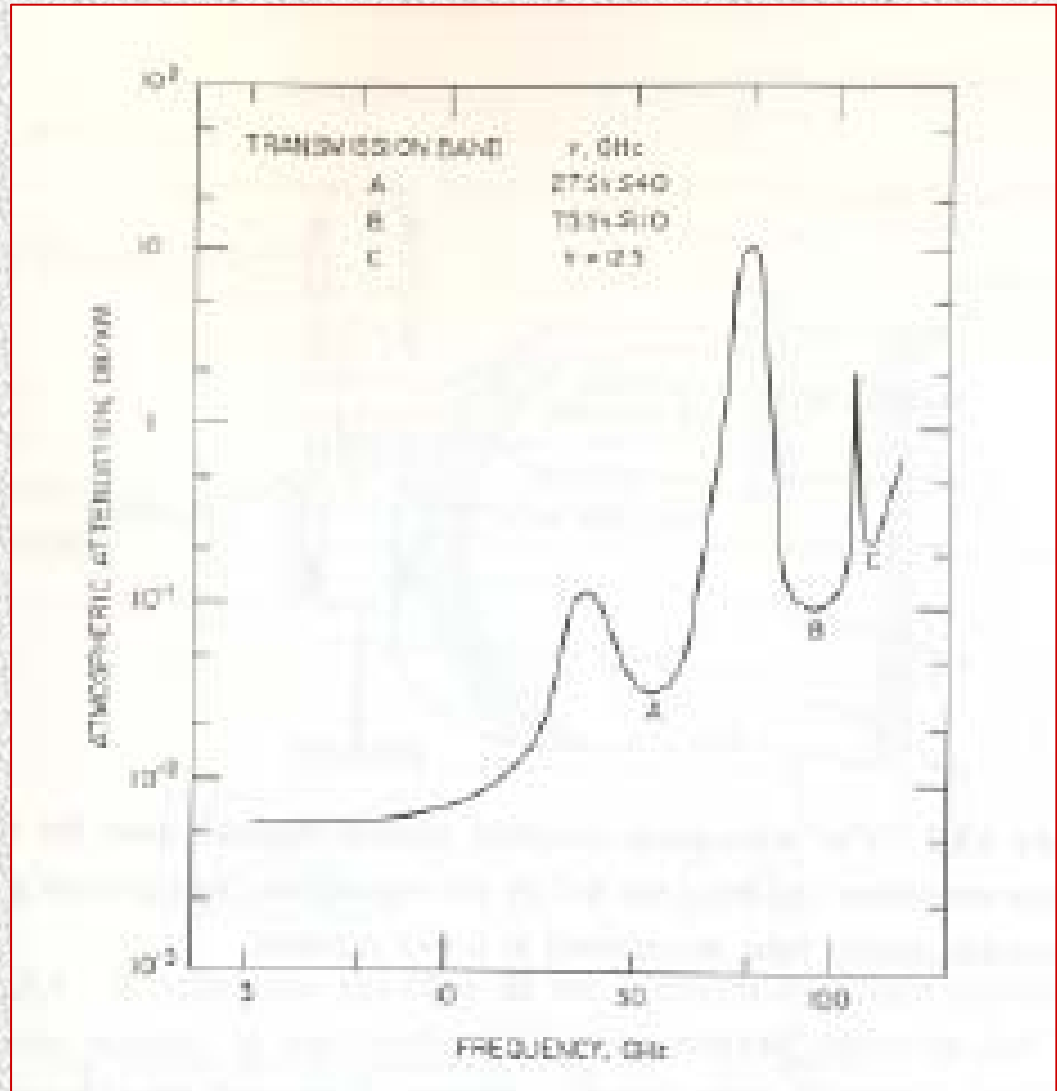
$0.4 \leq \nu \leq 20 \text{ GHz}$

$27 \leq \nu \leq 40 \text{ GHz}$

$75 \leq \nu \leq 110 \text{ GHz}$

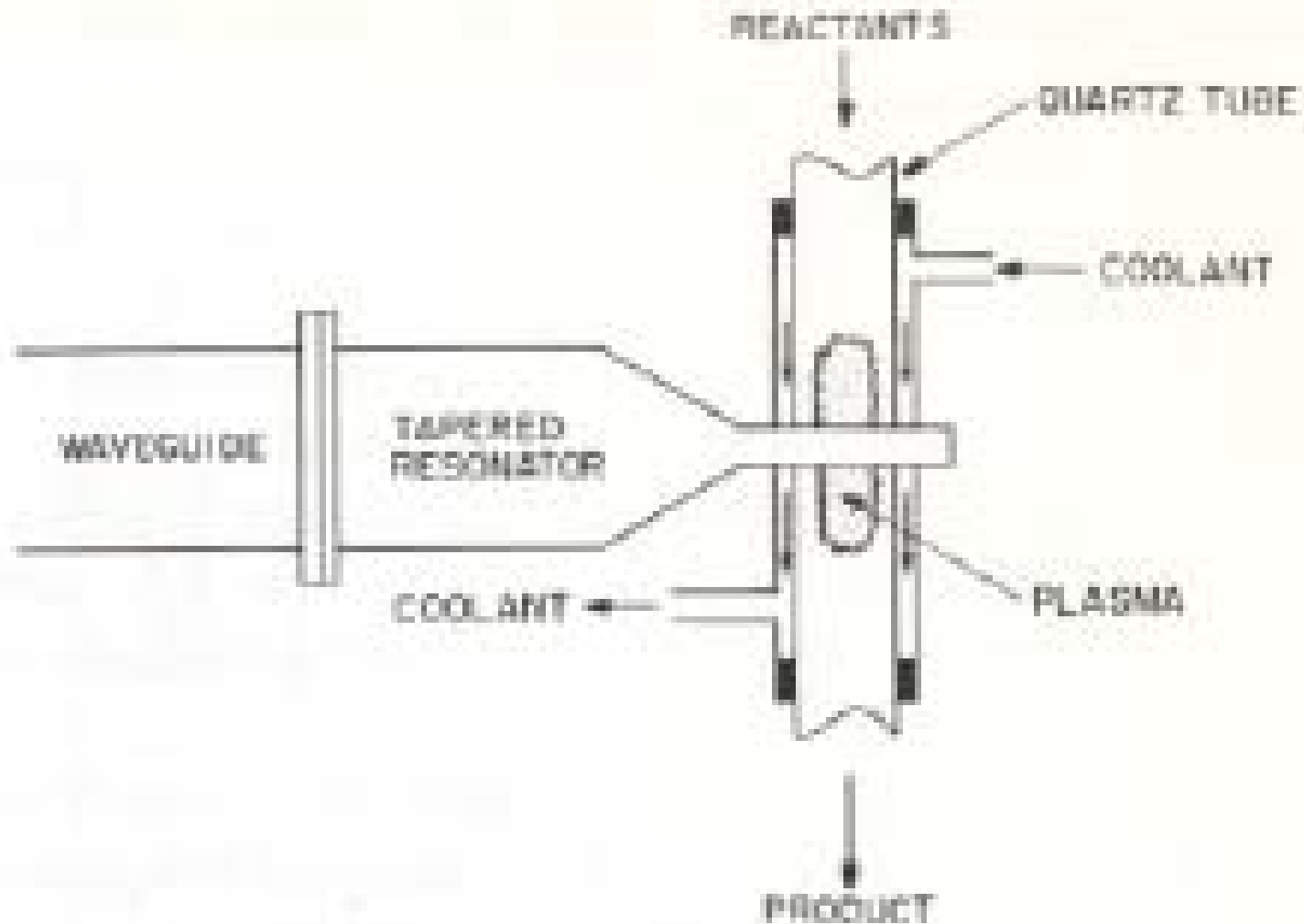
$\nu \approx 125 \text{ GHz}$

Em processos industriais são utilizadas principalmente as frequências de 2,45 GHz e 0,915 GHz.



Reatores de microondas

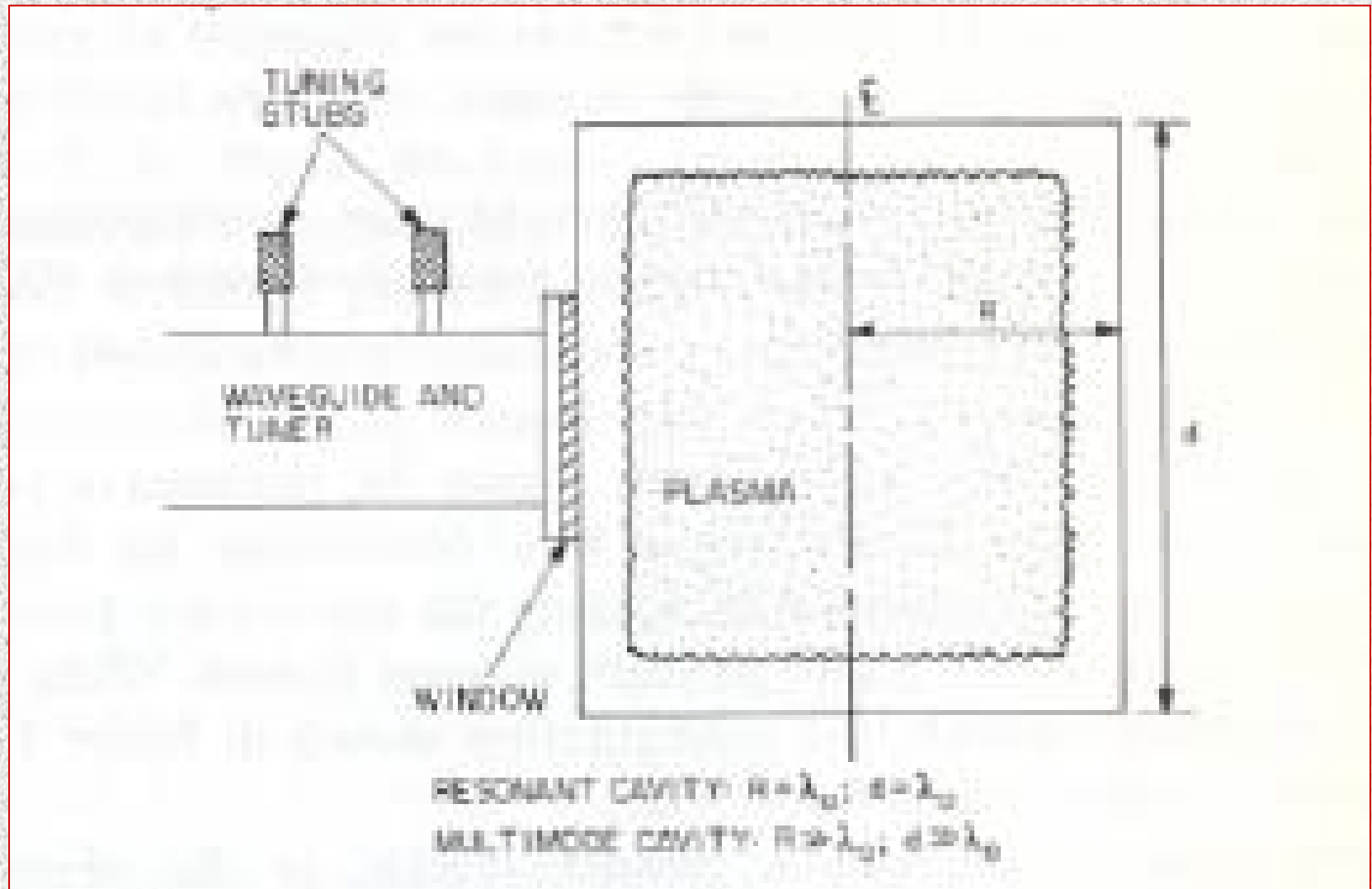
Reator com acoplamento



Reator com acoplamento

- Os reatores com acoplamento por guia de onda são principalmente utilizados em plasma químicos. Neste sistema é usado um guia de onda acoplado a um tubo de quartzo onde ocorre a geração do plasma e conseqüente geração de radicais.

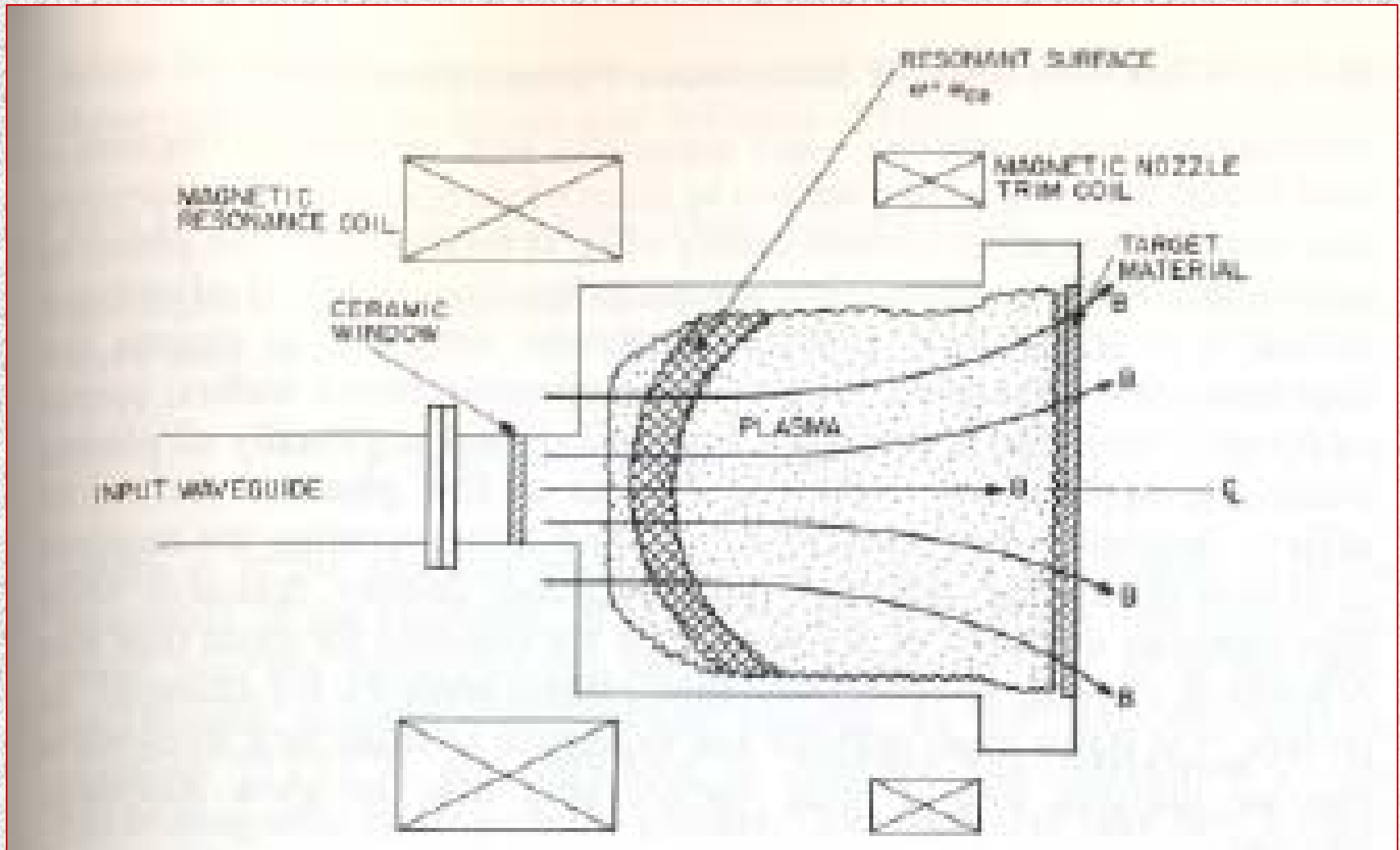
Reator com cavidade ressonante



Reator com cavidade ressonante

- Este plasma é gerado a baixa pressão e necessita de uma janela dielétrica para a propagação do microondas. Os materiais comumente usados nestes sistemas são a alumina e o quartzo. As dimensões da cavidade são comparáveis a o livre caminho médio, se as dimensões são muito grandes ocorrem várias harmônicas e são conhecidas como cavidades multimodo.

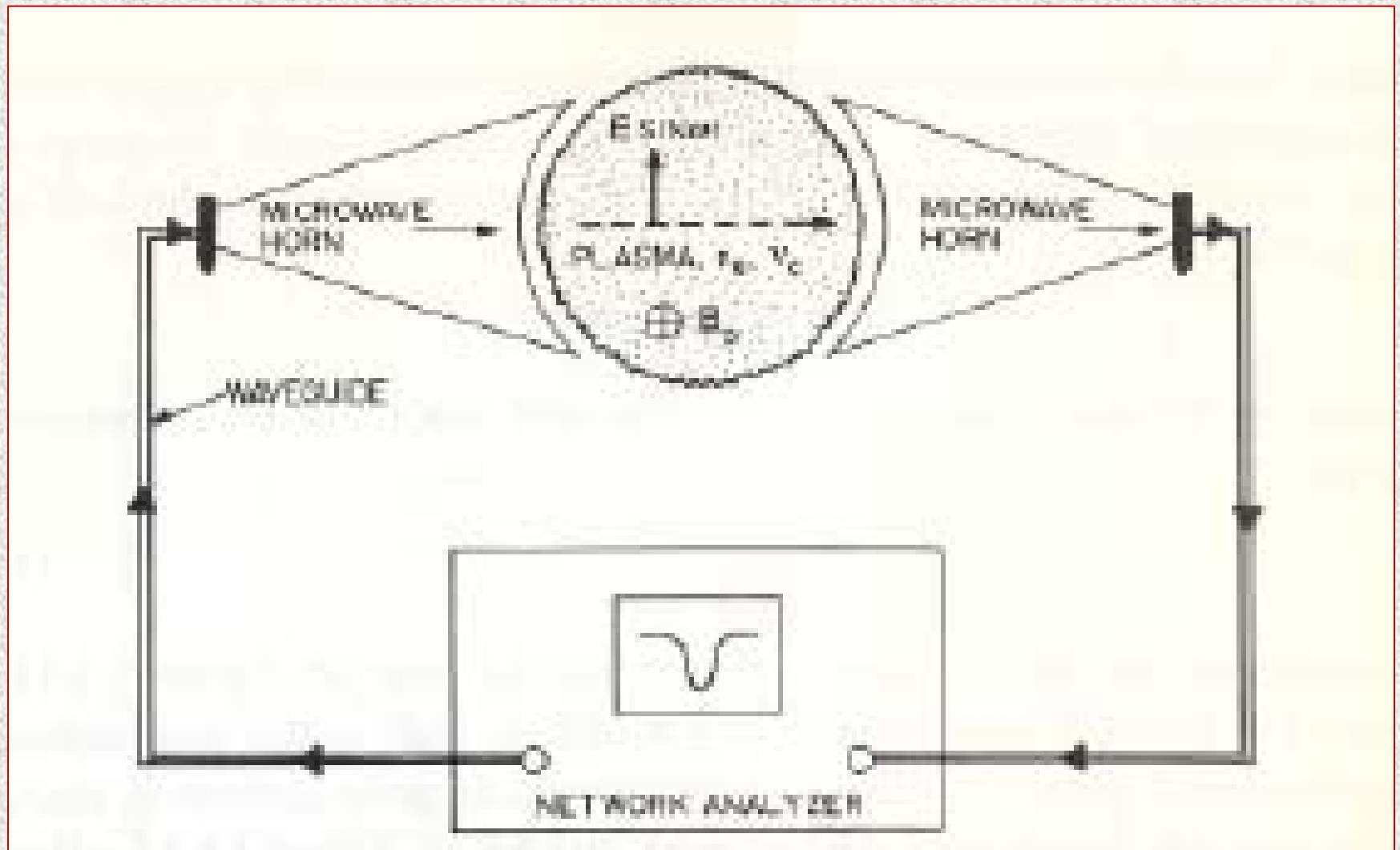
Reator do tipo ECR



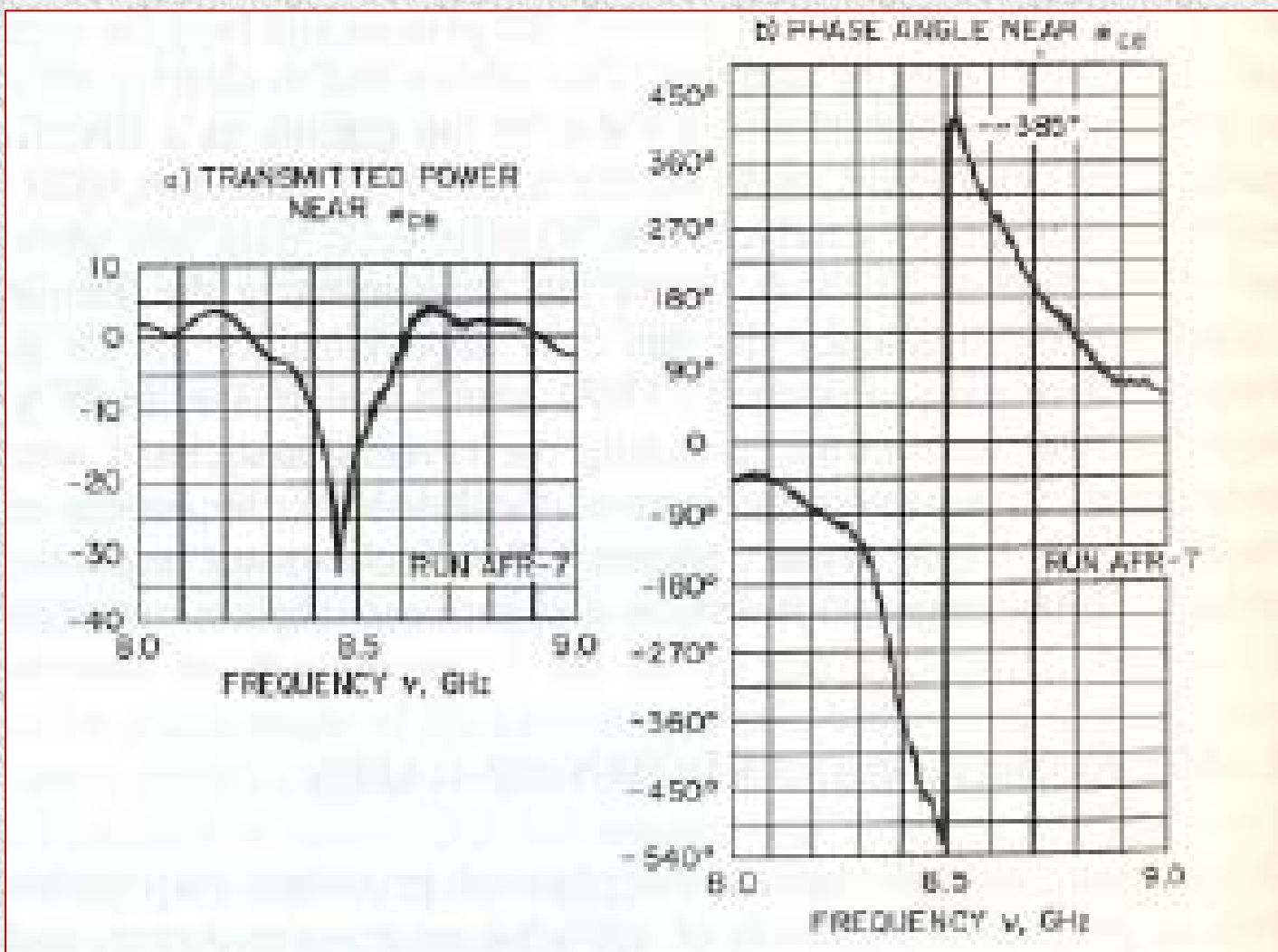
Reator do tipo ECR

- Nesta configuração as microondas são inseridas na câmara de processos a partir de uma janela dielétrica, o plasma gerado entra em ressonância a partir do campo magnético dos ímãs permanentes, gerando um plasma de alta densidade a baixa pressão.

Teste de ruptura de gases por microondas



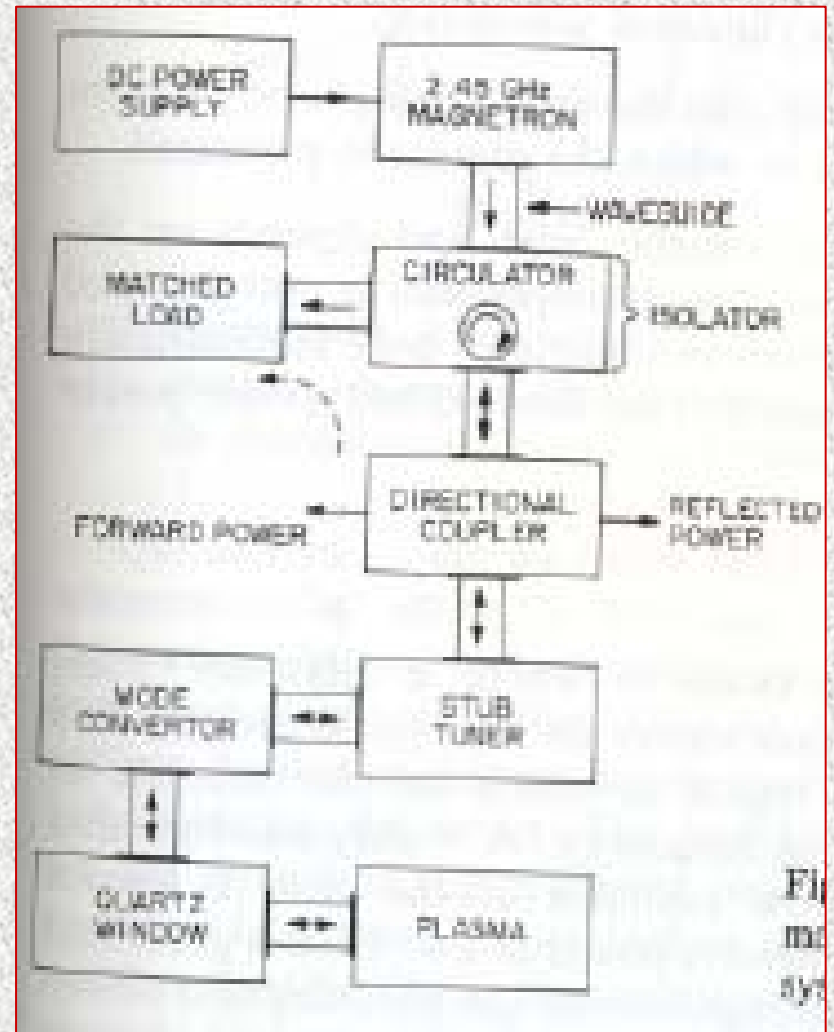
Teste de acoplamento em gases



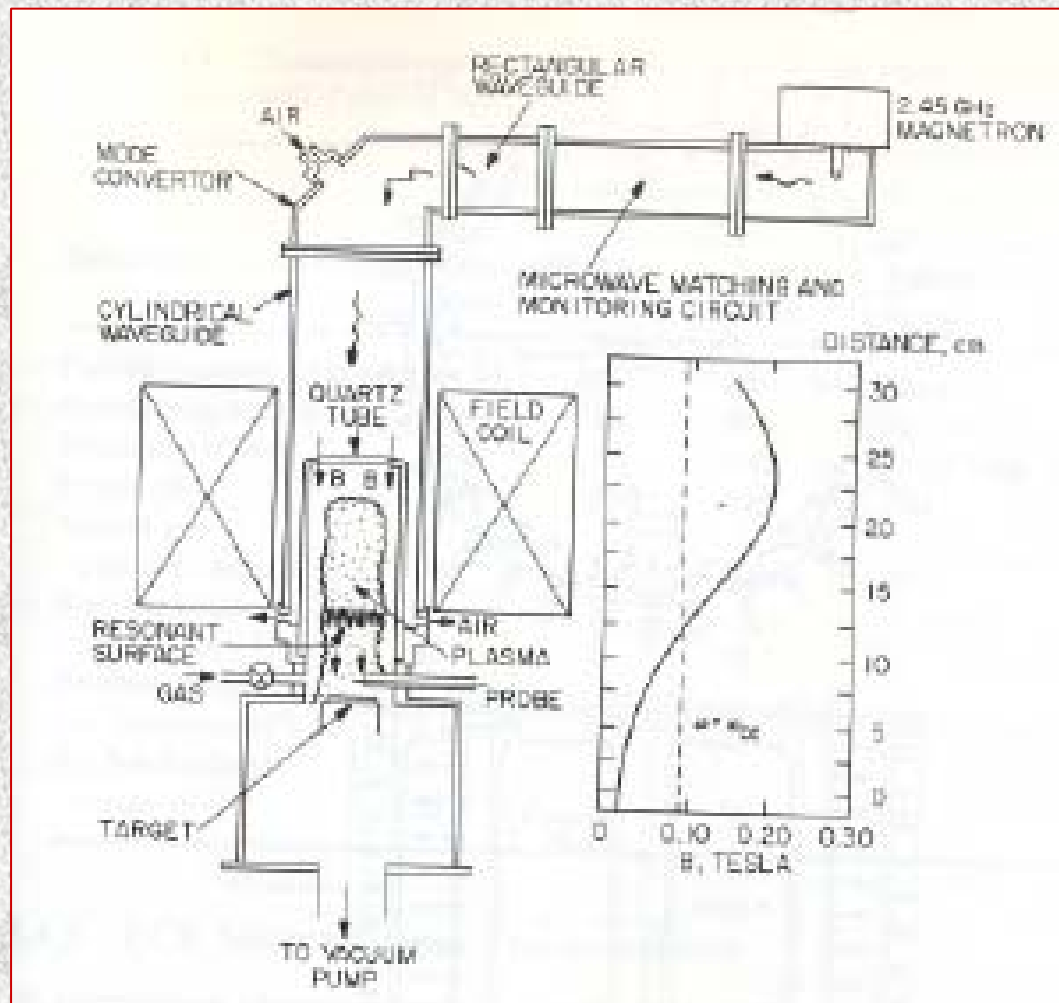
Sistema tipo ECR

Sistema tipo ECR

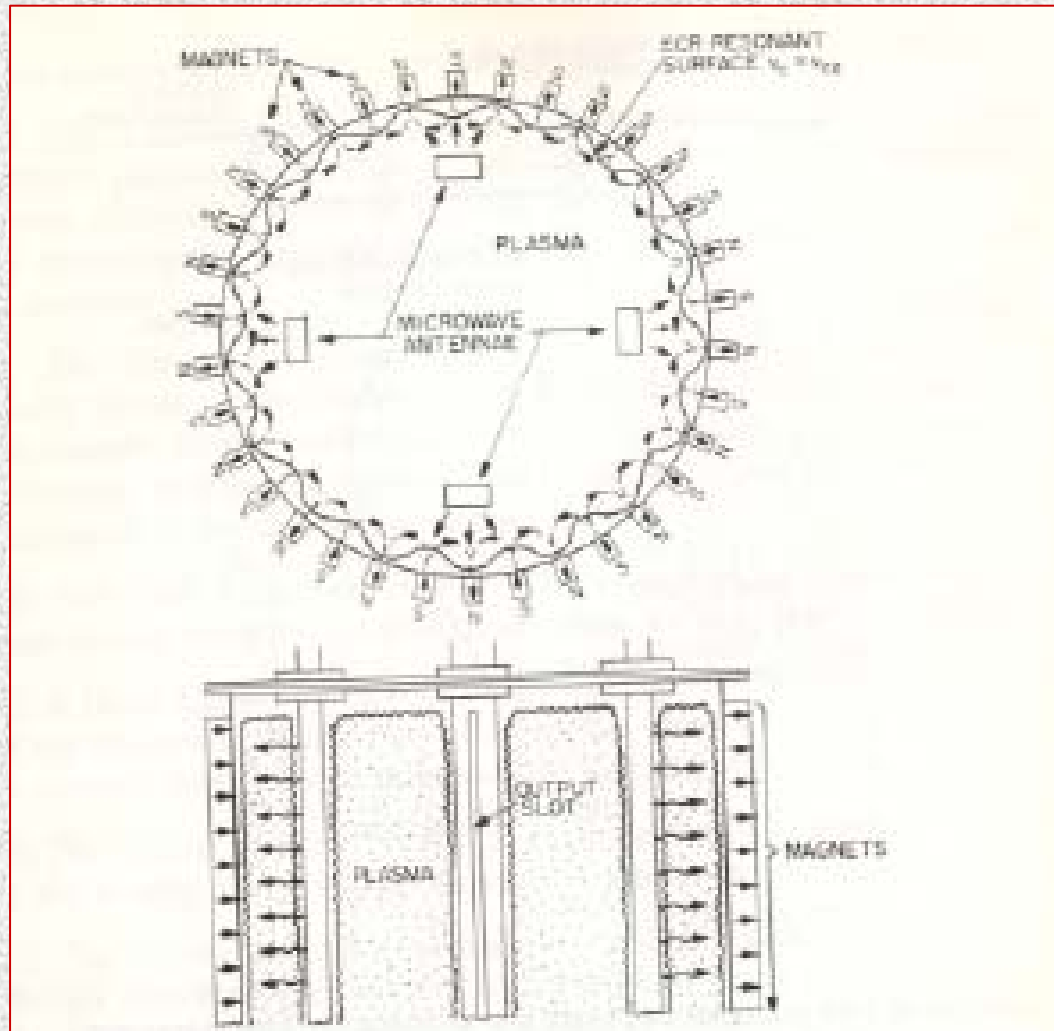
- Fonte DC;
- Magnetron de 400 W a 1 kW;
- Circulador e Cargas;
- Acoplador direcional;
- *Stub*;
- Conversor de modo;
- Janela dielétrica;
- Cavidade.



Sistema de imersão em plasma ECR



DECR



Características dos sistemas ECR

Parameter	ECR microwave plasmas			RF sources
	High value	Low value	Typical value	Typical value
Plasma diameter (cm)	30	5	10	10
Plasma length (cm)	100	10	20	5
Frequency (GHz)	10	0.9	2.45	13.56 MHz
Power (W)	2000	200	500	200
Neutral gas pressure (mTorr)	100	0.02	0.40	75
Electron kinetic temperature, T_e (eV)	15	5	10	5
Electron density, n_e (electrons/m ³)	5×10^{18}	10^{14}	10^{17}	10^{16}
Ion bombardment energy (eV)	50	10	30	100

Características dos sistemas ECR

- Poucos gases neutros e radicais;
- Alto grau de ionização;
- Alta densidade de elétrons;
- Baixo bombardeamento iônico;
- Sem controle do bombardeamento iônico, necessário o uso de DC bias;
- Dificuldade de acoplamento;
- Custo elevado dos sistemas.

Plasmas de microrondas não ressonantes

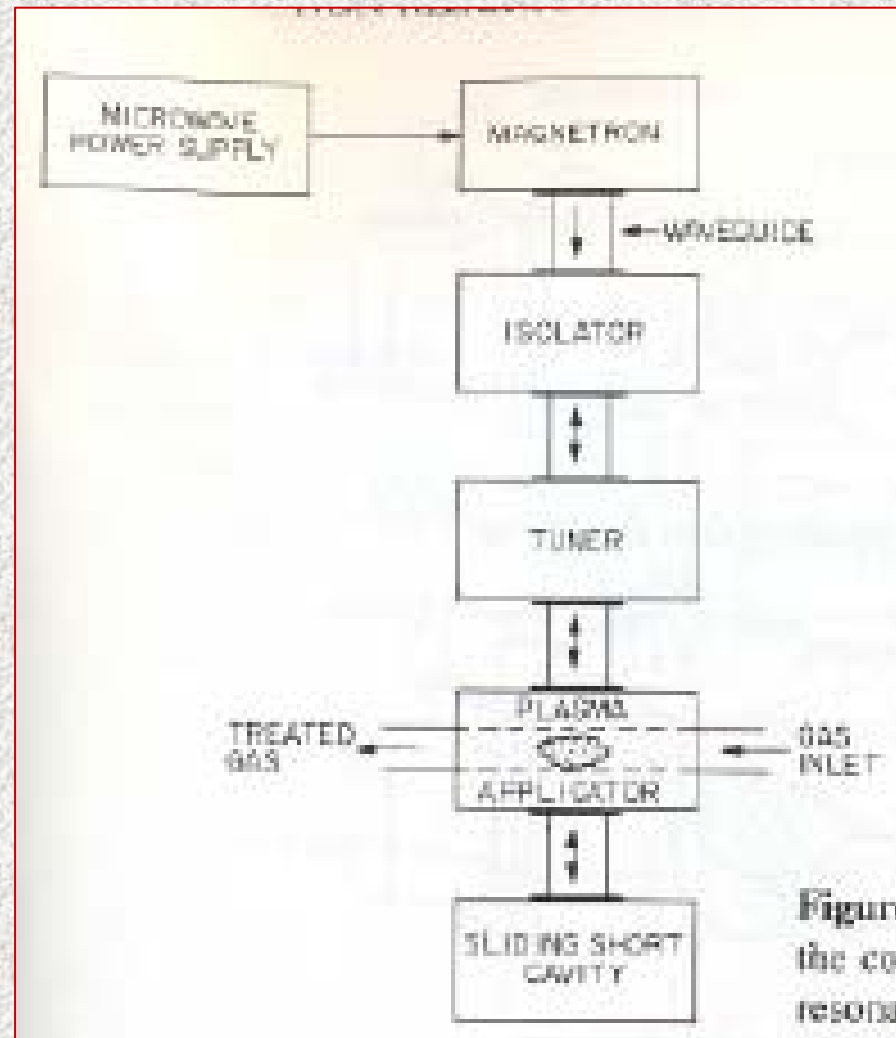
Plasmas não ressonantes

- Estes sistemas de microondas, não apresentam nenhuma indução magnética, no entanto a densidade e a energia dos plasma são equivalentes as obtidas em plasmas indutivos de alta potência.

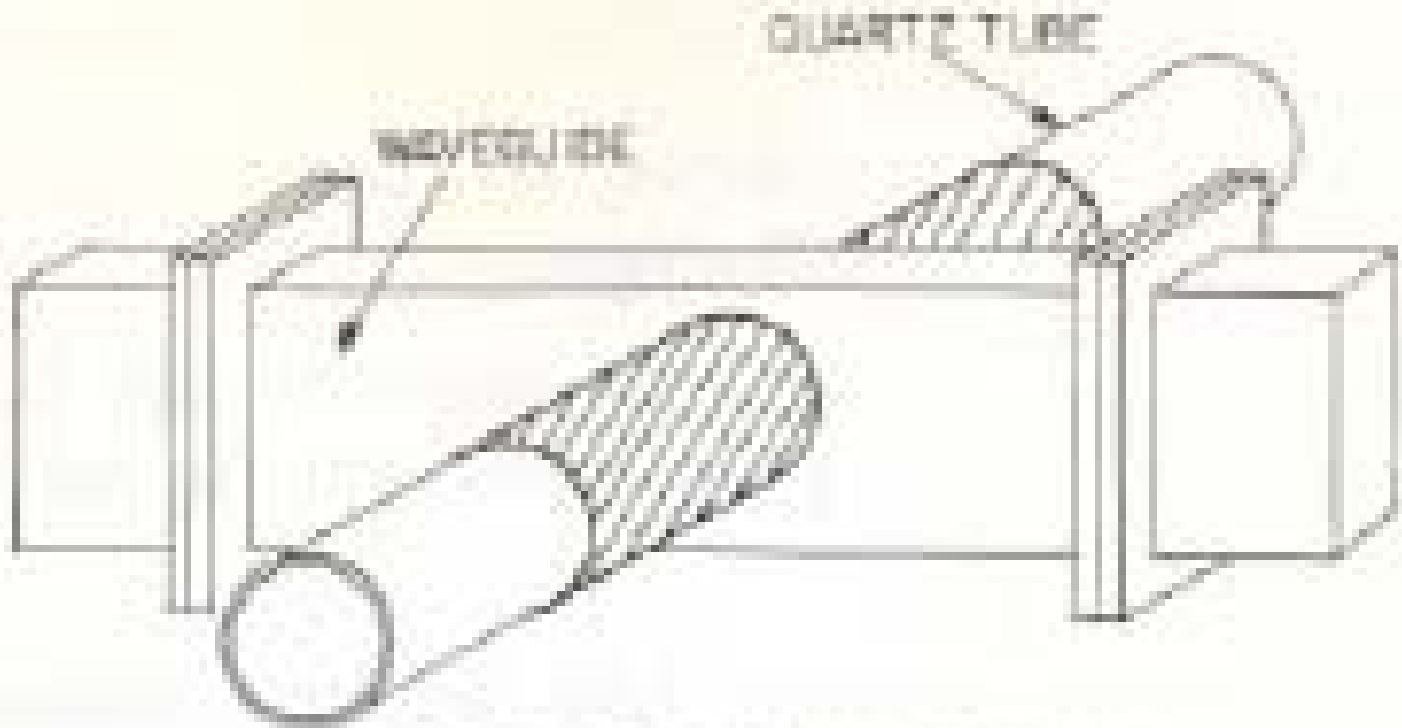
Plasmas não ressonantes

- As principais aplicações são em ionização de materiais para análises químicas, principalmente em reações ativadas por ultra-violeta, reatores de fluxo contínuo são os maiores empregados destes sistemas e podem ser usados em espectroscopia de fase gasosa ou em tochas de plasma.

Sistema de microondas de flujo continuo

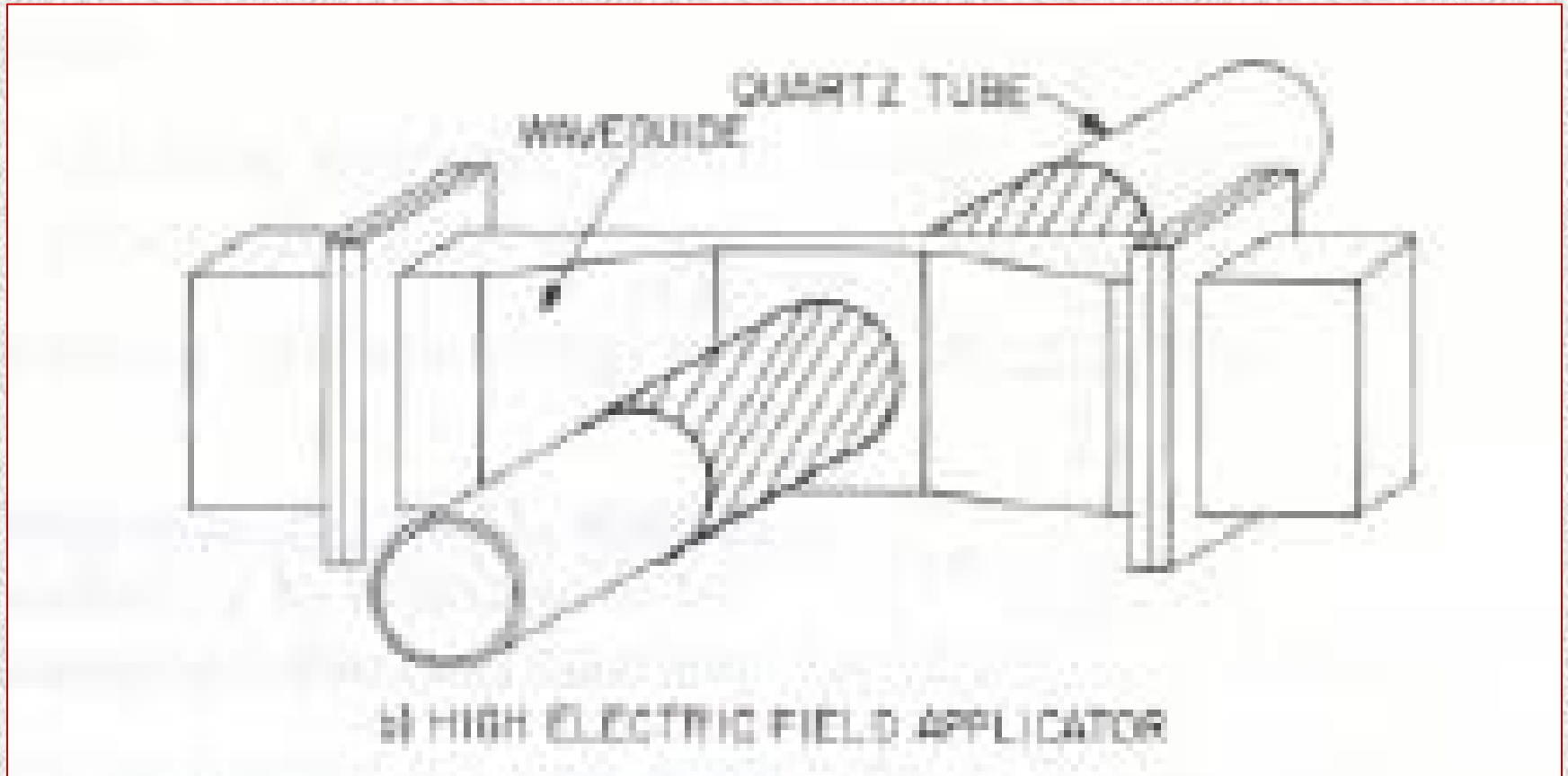


Aplicador de plasma para fluxo contínuo



(c) STANDARD PLASMA APPLICATOR

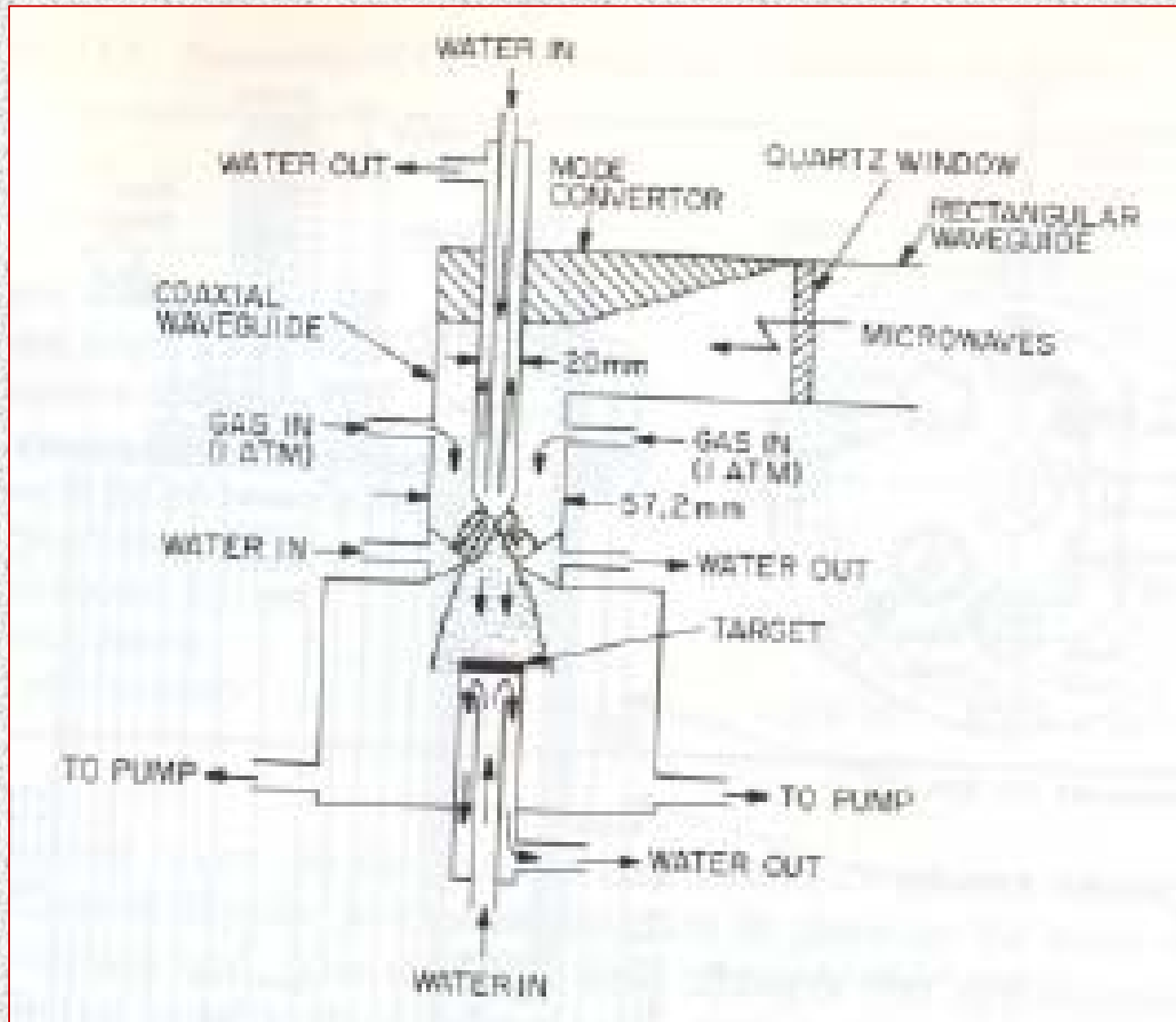
Versão com cavidade do aplicador de plasma



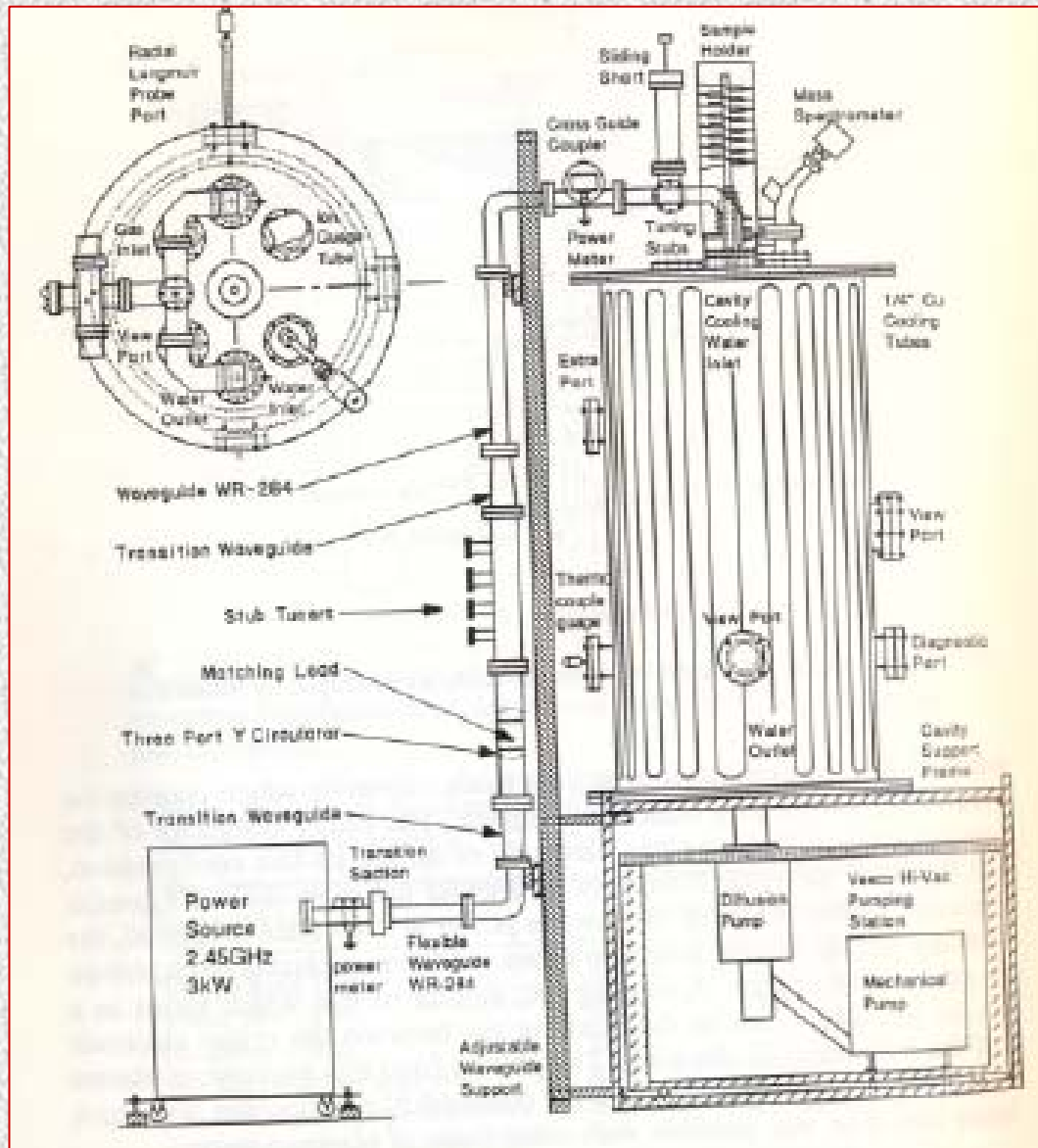
Características dos sistemas de fluxo contínuo

Parameter	Low value	High value
Gas pressure (Torr)	10	760
Power level (kW)	0.20	50
Frequency (GHz)	0.915	2.45
Gas kinetic temperature (eV)	0.10	≈ 1.0
Electron kinetic temperature (eV)	0.50	6.0
Electron density, n_e (electrons/m ³)	10^{15}	10^{18}

Tocha de plasma com microondas



Sistema não ressonante distribuído



Característica do sistema distribuído não ressonante

Parameter	High value	Low value	Typical value
Plasma diameter (cm)	—	—	50
Plasma length (cm)	—	—	100
Microwave frequency GHz	—	—	2.45
Microwave power (W)	2500	500	1500
Nitrogen gas pressure (mTorr)	120	10	20
Electron kinetic temperature, T_e (eV)	12	6	8
Electron density, n_e (electrons/m ³)	6.7×10^{18}	1.0×10^{18}	4.0×10^{18}

Comparação dos sistemas do tipo ECR e não ressonante

Parameter	ECR microwave plasmas			RF sources
	High value	Low value	Typical value	Typical value
Plasma diameter (cm)	30	5	10	10
Plasma length (cm)	100	10	20	5
Frequency (GHz)	10	0.9	2.45	13.56 MHz
Power (W)	2000	200	500	200
Neutral gas pressure (mTorr)	100	0.02	0.40	75
Electron kinetic temperature, T_e (eV)	15	5	10	5
Electron density, n_e (electrons/m ³)	5×10^{18}	10^{14}	10^{17}	10^{16}
Ion bombardment energy (eV)	50	10	30	100

Parameter	High value	Low value	Typical value
Plasma diameter (cm)	—	—	50
Plasma length (cm)	—	—	100
Microwave frequency GHz	—	—	2.45
Microwave power (W)	2500	500	1500
Nitrogen gas pressure (mTorr)	120	10	20
Electron kinetic temperature, T_e (eV)	12	6	8
Electron density, n_e (electrons/m ³)	6.7×10^{18}	1.0×10^{16}	4.0×10^{16}