

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE SEMICONDUTORES
INSTRUMENTAÇÃO E FOTÔNICA

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por ANTONIO CELSO SARAGOSSA
RAMOS e aprovada pela Comissão
Julgadora em 22 / 12 / 93.
Jacobus W. Swart
Orientador

CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE
CORROSÃO IÔNICA REATIVA E SUA APLICAÇÃO NA
CORROSÃO DE TUNGSTÊNIO E FOTORRESISTE

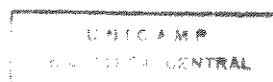
ANTONIO CELSO SARAGOSSA RAMOS 147

Bacharel em Análise de Sistema - PUCCAMP - 1985

Orientador: Prof. Dr. Jacobus W. Swart †

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia Elétrica da UNICAMP como parte dos
requisitos exigidos para obtenção do título
de "MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA".

Campinas, Dezembro de 1993



A minha querida esposa
Catarina Neusa de Almeida Ramos

e

Aos meus queridos filhos
Isis Maria de Almeida Ramos e
Antonio Celso S. Ramos Filho,
motivos deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jacobus W. Swart, pela orientação, apoio, amizade e estímulo no desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Dr. Francisco Carlos de Prince pela confiança em mim depositada na construção de nosso laboratório, pela sugestão do tema apresentado, e também pela aquisição dos equipamentos que facilitaram o seu desenvolvimento.

Ao Prof. Dr. Peter Jungen Tatsch, pela colaboração tanto na caracterização das amostras, quanto na análise dos resultados.

Ao Prof. Dr. Patrick Verdonck pela imensa colaboração quando de suas visitas ao laboratório, permitindo um avanço muito grande no trabalho através do empréstimo de equipamento.

Ao amigo Márlio Bonfim, pelo projeto e montagem do gerador de RF.

A amiga Cristiane, pelo auxílio na caracterização.

Ao Carlos Pinelli e a seção de vácuo do Instituto de Física, que também permitiram a apresentação deste trabalho no que diz respeito a vácuo.

Aos técnicos das oficinas mecânicas: Laerte, Pedro e Vanderley, pela confecção das peças para a câmara.

À minha irmã Milda, pelas fotos tiradas.

À Catarina minha esposa, a maior incentivadora, que com muito amor me auxiliou, em tudo que foi possível.

Aos meus filhos Isis Maria e Antonio Celso, por muitas vezes não terem a presença física do pai em seus trabalhos.

Ao amigo Xandão, pela sua amizade, estímulo e conselhos.

Aos meus pais, Manfredo e Genny que sempre tentaram, de toda forma, me incentivar.

Ao Laboratório de Pesquisa em Dispositivos (LPD), Laboratório de Eletrônica e Dispositivos (LED), Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) da USP e CPqD-Telebrás, pelos equipamentos utilizados e pelas análises para a caracterização das corrosões.

À todos os amigos do laboratório 49 do LPD, pela convivência alegre e amiga.

À todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho e involuntariamente foram omitidos

RESUMO

Este trabalho foi concebido da necessidade que se tinha de corroer amostras que requerem características específicas, como é o caso de circuitos integrados com tecnologias avançadas. Com este objetivo, projetou-se e construiu-se um sistema de Corrosão Iônica Reativa (RIE). Foi montado para isto, um gerador de RF de 300W e frequência de 500KHz, frequência esta escolhida pela alta taxa de corrosão em filmes de fotorresiste e tungstênio, facilidade na instalação, dispensando grandes cuidados, pela disponibilidade de peças no mercado e pelo baixo custo.

O sistema de vácuo é composto por uma bomba mecânica e um soprador de ar industrial operando em sentido inverso. Caracterizamo-lo comparando-o com equipamentos comerciais usados para sistemas de corrosão por plasma. Esta caracterização constou da determinação da velocidade de bombeamento do sistema de vácuo. Este comportou-se razoavelmente bem, melhorando a velocidade de bombeamento da bomba mecânica.

Para se ter controle de um processo, necessita-se saber quando se termina a corrosão do filme desejado. Para isto, fizemos estudos com espectrometria óptica que mostra o espectro com os picos característicos da luz do plasma e detecção do ponto final da corrosão. Obtivemos uma boa sensibilidade do método, que foi capaz de detetar o final da corrosão do filme de W em uma amostra com área de 1cm^2 e fotografada.

Para estudarmos a taxa de corrosão de W e fotorresiste, primeiramente estudamos a tensão de auto-polarização, parâmetros muito importantes na taxa da corrosão, variando-se a pressão e a potência, para os gases disponíveis (SF_6 e $\text{CF}_4 + \text{O}_2$). Estes dados ajudaram a interpretar o comportamento das taxas de corrosões, variando-se a potência e pressão, cujos resultados são comparáveis e muitas vezes melhores que os reportados para equipamentos comerciais com 13,56MHz. Medimos também a anisotropia da corrosão de W em um dos pontos (75mTorr, 50W e 25sccm de SF_6) e conseguimos um valor estimado de 5. A melhor seletividade para W/fotorresiste conseguida foi 4,6, com um processo de SF_6 , a 100mTorr, 50W com fluxo de 25sccm, resultado este melhor que os publicados na literatura.

Para avaliarmos os danos causados em substratos de GaAs após as corrosões, foi feito um estudo destes através de análise por espalhamento de luz, espectroscopia Raman, espalhamento de fotoluminescência e microscopia eletrônica de varredura. Este estudo permitiu determinar as melhores condições para o processo de corrosão de W/GaAs.

ABSTRACT

This work has as objective the development of a Reactive Ion Etching (RIE) System, motivated by the need of this technique for the fabrication of devices and integrated circuits with advanced technologies. The RIE equipment has been designed, constructed and characterized. An RF generator of up to 300W at a fixed frequency has been designed and built.

This relatively low frequency was adapted because it

- a) produces a higher etch rate of Tungsten and Photoresist,
- b) facilitates the installation by avoiding special precautions needed when dealing with high frequency RF signals,
- c) facilitates the acquisition of the needed parts and devices, resulting in a very cost effective solution.

The vacuum system is composed of a mechanical pump in series with an industrial air blower which operates in reverse. The system is characterized in terms of pumping speed and compared with commercial vacuum systems for plasma etching. The obtained pumping speed values are very reasonable, improving considerably the characteristics compared to a single mechanical pump.

A good process control requires a detection of the end point of the etching. The light emission spectrum of the plasma was recorded and the sensibility of the end point detection with the area of samples with W films was analyzed. Samples with area of 1cm^2 still presented a good sensibility of the end point detection.

In order to study the etch rates of W and photoresist, first the induced DC bias was measured versus pressure and power of plasma of SF_6 and $\text{CF}_4 + \text{O}_2$. These data were used afterwards to help in the interpretation of the etch rate variation with these plasma variables. The etch rate data are qualitatively very similar to the ones reported in the literature for a frequency of 13.56MHz. The anisotropy of W etching was measured for one process condition (75mTorr, 50W and 25sccm of SF_6) resulting in an estimated value of 5. The highest selectivity of W/Photoresist obtained was 4.6 for a plasma of SF_6 at 100mTorr, 50W and 25sccm. This is higher than the values found in the literature.

Plasma etching induced damage on GaAs substrates was analysed by means of laser light back-scattering, Raman spectroscopy, photoluminescence and scanning electron microscopy. This study has lead to the establishment of the best process conditions of reactive ion etching of W/GaAs.

1 - ESTUDO SOBRE SISTEMAS DE CORROSÃO

1.1 - INTRODUÇÃO

1.2 - DECAPAGEM ÚMIDA E SÊCA

1.3 - APLICAÇÃO DO PLASMA NA MICROELETRÔNICA

1.4 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

1.4.1 - Formação do plasma

1.4.1.1 - Processos ocorridos no plasma

1.4.2 - Funcionamento Elétrico

1.4.3 - Frequência de RF

1.5 - TIPOS DE SISTEMAS DE CORROSÃO POR PLASMA

1.5.1 - Tubular

1.5.2 - Planar

1.5.3 - RIE

1.5.4 - RIBE

1.5.5 - IM

1.5.6 - Sumário

1.5.7 - Escolha da configuração do sistema.

1.6 - MECANISMO DE REAÇÃO DURANTE A CORROSÃO

1.6.1 - De Fotorresiste

1.6.1.1 - Usando O_2

1.6.1.2 - Usando CF_4

1.6.2 - De tungstênio

1.7 - OBJETIVOS DO TRABALHO

1.8 - REFERÊNCIAS

2 - DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA RIE

2.1 - INTRODUÇÃO

2.2 - PROJETO DO SISTEMA

2.2.1 - Mecânico

2.2.1.1 - Camara

2.2.1.2 - Sistema de gases

2.2.1.3 - Sistema de bombeamento

2.2.1.4 - Medidor de temperatura

2.2.1.5 - Sistema de refrigeração

2.2.2 - Elétrica

2.2.2.1 - Circuito de medida de temperatura

2.2.2.2 - Medidor de pressão

2.2.2.3 - Gerador de RF

2.2.2.4 - Medidor de potência, tensão e corrente

2.3 - MONTAGEM DO SISTEMA

2.4 - CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

2.4.1 - Velocidade de bombeamento

2.4.2 - Pressão final

2.4.3 - Fluxo de Gases

2.4.4 - Espectroscopia de Emissão Óptica

2.4.5 - Teste de Vazamento da Câmara

2.4.6 - Medida da Evolução da Temperatura na Amostra

2.4.7 - Tensão de Auto-polarização DC.

2.5 - CONCLUSÕES

2.6 - REFERÊNCIAS

3 - ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO DE CORROSÃO DE FOTORRESISTE E TUNGSTÊNIO

3.1 - INTRODUÇÃO

3.2 - MEDIDAS DAS TAXAS DE CORROSÃO

3.2.1 - Para fotorresiste

3.2.1.1 - Variando a potência

3.2.1.2 - Variando a pressão

3.2.2 - Para tungstênio

3.2.2.1 - Variando a potência

3.2.2.2 - Variando a pressão

3.3 - MEDIDA DE UNIFORMIDADE

3.4 - ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE GaAs APÓS CORROSÃO DE TUNGSTÊNIO

3.5 - MEDIDAS DE ANISOTROPIA

3.6 - MEDIDA DE SELETIVIDADE

3.7 - CONCLUSÕES

3.8 - REFERÊNCIAS

4 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

CAPÍTULO 1

ESTUDO SOBRE SISTEMAS DE CORROSÃO

1.1 - INTRODUÇÃO

Atualmente grande parte dos processos de fabricação de circuitos integrados usam comumente plasmas reativos, em linha de produção de semicondutores.

O termo plasma reativo refere-se a uma descarga, na qual, ocorre a ionização e fragmentação das moléculas dos gases, os quais, produzem espécies químicas ativas, frequentemente oxidantes e/ou agentes de redução. Quando estas espécies ativas reagem com o material de uma superfície e formam produtos voláteis, o material é removido ou corroído nas regiões da superfície que não estão mascaradas por processo litográfico.

Quando os plasmas reativos eram usados em fábricas de semicondutores, na década de 70, pouco se conhecia sobre a química e a física destas descargas. Hoje, há uma larga base de conhecimentos empíricos, alguns entendimentos qualitativos de mecanismos ativos, e mesmo, detalhes de fenômenos isolados. Esta compreensão agora permite que sejam feitas medidas de processos de plasma, e atender os requisitos rigorosos dos dispositivos submicrons confeccionados hoje.

1.2 - DECAPAGEM ÚMIDA E SÊCA

São utilizadas normalmente dois tipos de processos de corrosão. O primeiro que é o mais antigo e portanto mais simples, é o chamado de processo de corrosão úmida, e utiliza uma solução líquida (geralmente ácida) onde é mergulhada a amostra, que será corroída pela solução. Este processo apresenta como sua principal característica a simplicidade e facilidade de sua realização. As decapagens úmidas são geralmente isotrópicas (taxa de corrosão igual em qualquer direção), o que é uma desvantagem, já que uma corrosão direcional pode levar a uma melhor definição da forma do material a ser corroído, o que significa por sua vez um aumento da resolução do processo de corrosão (diminuição das mínimas larguras do material a ser corroído).

O processo úmido, devido à tensão superficial do líquido, apresenta dificuldade na corrosão de áreas de pequenas dimensões, limitando sua aplicação

em circuitos de alta integração.

O segundo tipo é o chamado corrosão à seco ou corrosão por plasma. Neste tipo de corrosão é usado um plasma em baixa pressão como agente de corrosão ao invés de solução líquida. Esta característica do processo significa uma menor contaminação da amostra, já que durante o processo ela fica em um ambiente evacuado e sem contato com soluções líquidas, o que pode resultar em um processo de corrosão muito mais "limpo".

Outra vantagem do processo é que ele pode ser anisotrópico (corrosão direcional), bastando que os íons do plasma (agentes de corrosão) incidam na amostra com uma direção preferencial de sua velocidade. Isso pode ser feito em um grande número de tipos diferentes de corrosão a seco. Outra vantagem deste é a possibilidade de se controlar precisamente a taxa de corrosão, basicamente a partir de um controle sobre a potência, o fluxo de gás para a corrosão que é fornecida ao sistema e da pressão do gás no interior do mesmo. Uma das desvantagem da corrosão a seco é a necessidade de um sofisticado equipamento para a sua realização, equipamento este que possui um custo elevado. Outras possíveis desvantagens são geração de danos na superfície produzido pelo bombardeio de íons e a deposição de contaminantes por efeito de "sputtering" de materiais do eletrodo.

1.3 - APLICAÇÃO DO PLASMA NA MICROELETRÔNICA

A corrosão anisotrópica por plasma é um importante processo para a fabricação de circuitos integrados. Como ilustração, descrevemos a sua aplicação na fabricação de MESFET's de porta refratária auto-alinhada. Neste tipo de MESFET a formação do terminal de porta é feita com a deposição e a posterior corrosão de um metal refratário sobre o canal do transistor. Após a formação do terminal de porta, o transistor recebe uma implantação de íons de alta dose, que tem a função de produzir uma região de alta dopagem no transistor, formando as regiões de dreno e fonte. Nesta etapa de implantação iônica, o próprio metal de porta funciona como máscara, de onde vem o nome de porta auto-alinhada para este MESFET. A fig.1.1 ilustra melhor este processo de formação de porta.

É importante observar que a corrosão do filme metálico de porta deve ser bastante anisotrópico, para que uma vez terminada, resulte uma parede vertical no filme metálico corroído. Essa parede vertical é necessária para evitar o implante de íons sob a porta, que aconteceria caso a parede não fosse verti-

cal, como mostra a fig.1.2. Esta implantação sob a porta, piora as características elétricas do transistor, uma vez que a região com alta dopagem sob a porta, reduz a tensão de ruptura do diodo Schottky porta-canal e aumenta a capacitância porta-fonte e porta-dreno, o que resulta em menor impedância de entrada e frequência de transição do transistor.

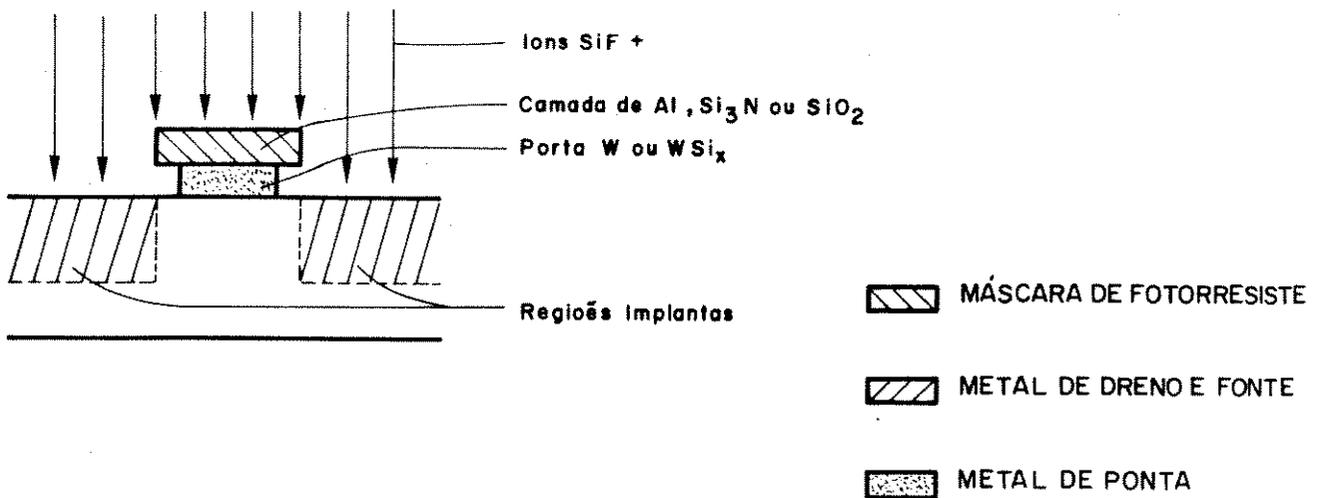


Fig. 1.1 - Processo de formação de porta.

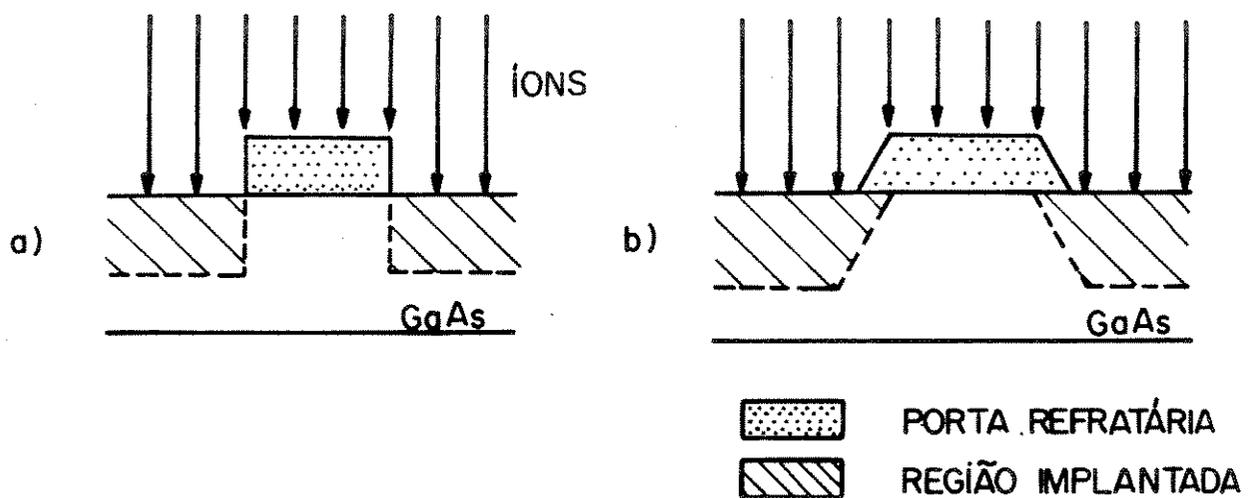


Fig.1.2 - Formação de Porta com paredes verticais

A corrosão por plasma do tipo RIE (Reactive Ion Etching) ou RIBE (Reactive Ion Beam Etching) descritos no item 1.5, atendem aos requisitos para a formação do terminal de porta dos MESFET's, sendo por isso bastante empregados na fabricação destes transistores.

O uso do RIE ou RIBE tem ainda a vantagem de melhorar a definição da porta, produzindo num mesmo cristal transistores com menor dispersão dos comprimentos de porta, o que significa uma maior uniformidade das características dos transistores.

Uma forma mais eficiente de se evitar o implante lateral sob a porta é o uso de uma forma "T" para ela ("T-shape gate"), como ilustrado na figura 1.1. Nesse caso antes da corrosão do material refratário de porta, este é coberto com um outro filme, como por exemplo alumínio, nitreto de silício ou óxido de silício. Este material é corroido antes do material refratário, servindo como máscara para a corrosão deste último. Devido à existência de uma pequena taxa de corrosão lateral, mesmo nos processos quase anisotrópicos, o metal refratário, depois de corroido, fica ligeiramente mais estreito do que o material que está sobre ele, formando o "T". Neste caso, a implantação de íons é feita mais longe da porta do que no processo anterior (sem o uso da segunda camada), o que diminui a corrente de fuga da porta e diminui a capacitância porta-fonte e porta-fonte, o que é altamente desejável. A desvantagem deste processo é o uso de mais uma etapa de deposição de filme fino (segunda camada) e mais uma etapa de corrosão.

Neste processo ainda é necessário o uso de uma corrosão anisotrópica, pois queremos pequena dispersão do comprimento de porta nas duas etapas de corrosão que são necessárias aqui.

Uma opção alternativa em relação à porta tipo T, é o emprego de espaçadores de óxido.(fig.1.3). O desenvolvimento desta estrutura requer também o uso de corrosão por plasma do tipo RIE.

Para a formação destes espaçadores cresce-se uma camada de SiO_2 ou Si_3Ni_4 sobre o cristal de GaAs após a fotogração da porta de tungstênio. Em seguida realiza-se uma corrosão da camada isolante por RIE de CF_4/O_2 ou CF_4/H_2 , até que as superfícies do tungstênio e do GaAs fiquem expostas. Como o RIE apresenta uma maior taxa de corrosão na vertical do que na horizontal, formar-se-á um espaçador dos lados da porta de tungstênio. Este espaçador tem como função a proteção da região durante a implantação de dopante tipo N, para a confecção da região de dreno e fonte.

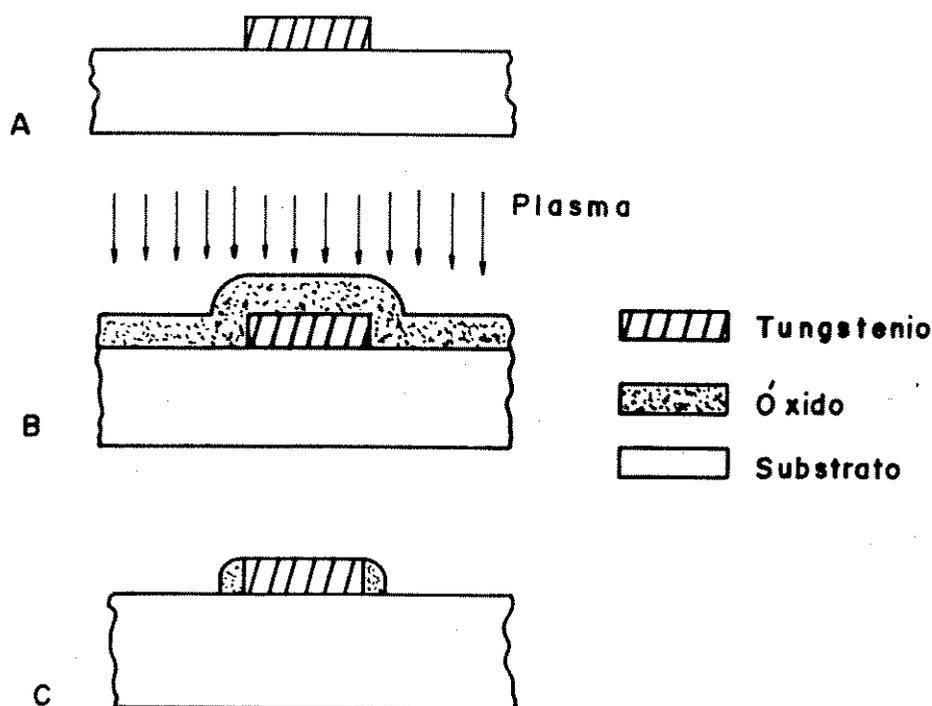


Fig.1.3 - Formação de espaçadores de óxido, a) após definição da porta, b) deposição de filme de SiO_2 e c) após corrosão anisotrópica do óxido.

O uso de corrosão por plasma (RIE ou RIBE) ainda tem a vantagem de permitir a determinação do instante de tempo em que se chega ao fim a corrosão das camadas (sistema de detecção de ponto final). Isso permite controlar de uma forma precisa e reprodutível o comprimento da região corroida lateralmente, o que é um ponto a favor do uso destes processos na formação da porta, já que podemos ter maior controle e reprodutibilidade de seu comprimento.

Pelo que foi exposto acima, os processos de corrosão por plasma são extremamente importantes na fabricação dos MESFET's de porta refratária auto-alinhada, quer sejam de portas em forma de "T" ou do tipo normal, com ou sem espaçadores de óxido.

1.4 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

1.4.1 - Formação do plasma

O plasma é formado por elétrons, íons e partículas neutras. Uma peque-

na parte do gás do ambiente é ionizado, cerca de 0.01% a 0.0001% das moléculas, as restantes permanecem neutras.

As espécies ionizadas, ou carregadas possuem concentração suficiente, tal que, interagem significativamente através de interações Coloumbianas [1.1].

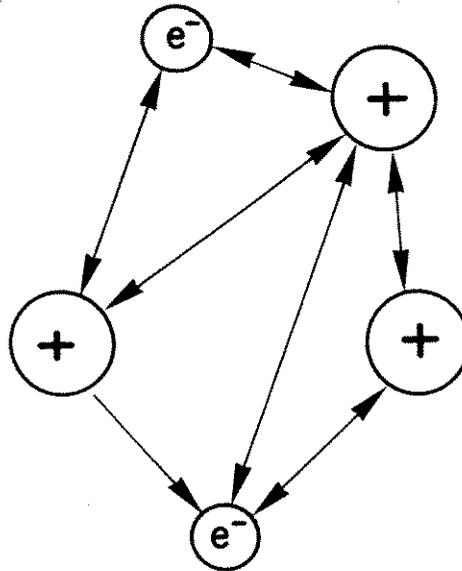


Fig.1.4 - Interações coulombianas [1.1]

Na formação do plasma criam-se espécies reativas (átomos, radicais e íons) geradas pela descarga luminescente em gases, mesmo inicialmente inertes. É no entanto necessário que se faça a escolha correta dos gases a usar, de tal maneira que na descarga sejam geradas espécies que reajam quimicamente e/ ou fisicamente, com a superfície da amostra que se pretenda corroer, e que os produtos da reação sejam voláteis.

As espécies excitadas possuem uma barreira de energia de ativação menor para as reações químicas do que as espécies neutras, para uma determinada temperatura [1.2]. Usando esta observação consegue-se fazer com que essas espécies geradas reajam com maior facilidade a temperaturas menores. Como exemplo deste processo, temos o CF_4 , que é praticamente inerte, assim sendo, não reage espontaneamente com o silício, a não ser que a temperatura seja superior a $1412^\circ C$, que é a temperatura de fusão do silício. Entretanto, no plasma, usando-se o CF_4 , são geradas muitas espécies como íons e radicais livres. Um produto desta descarga é o flúor atômico, que reage espontaneamente com o silício à temperatura ambiente, formando SiF_4 , que é volátil [1.3].

1.4.1.1 - Processos ocorridos no plasma

A descarga de plasma é um estado de não equilíbrio no qual os elétrons tem energia média maior do que a dos íons e das partículas neutras. Para manter esta descarga é necessário fornecer energia ao sistema. Esta energia é transferida aos elétrons livres, e estes, por sua vez, irão colidir com as moléculas dos gases. Como a relação de massas entre elétron/molécula é muito pequena, a energia adquirida pelos elétrons é perdida por colisões inelásticas com as partículas neutras. Esta energia é transformada em aquecimento, excitação e dissociação das moléculas do gás, e também na emissão de fótons pela relaxação [1.1].

Os processos que ocorrem no plasma e que facilitam a corrosão de filmes são mostrados a seguir.

Tabela 1.1 - Processos presentes em ambiente de plasma [1.7]

Processos	Equações
1- Ionização	$e^- + A \longrightarrow 2e^- + A^+$
2- Dissociação	$e^- + A_2 \longrightarrow e^- + 2A$ $e^- + A_2B_2 \longrightarrow A_2 + B_2 + e^-$
3- Excitação	$e^- + A \longrightarrow e^- + A^*$
4- Relaxação	$A^* \longrightarrow A + h\nu$
5- Captura Eletrônica	$e^- + A_2 \longrightarrow A_2^-$
6- Captura Dissociativa	$e^- + A_2 \longrightarrow A + A^-$
7- Abstração	$A + B_2 \longrightarrow B + AB$
8- Recombinação	$e^- + A^+ \longrightarrow A$ $e^- + A + A^+ \longrightarrow e^- + 2A$ $2A + A_2 \longrightarrow 2A_2$

Na tabela acima : e^- representa um elétron,
 A representa um átomo,
 A^+ representa um íon,
 A^* representa um átomo excitado,
 A_2 e B_2 representam as moléculas e
 $h\nu$ é a energia dos fótons.

1.4.2 - Funcionamento Elétrico

O modelo simplificado de um sistema de plasma é do tipo diodo, como mostrado na fig.1.5 e foi proposto primeiramente por Koenig e Maissel [1.4]. Ele é baseado na representação, de cada região de bainha por um capacitor (que representa a carga espacial) em paralelo com um diodo (que representa a assimetria da corrente de íons e elétrons através da bainha) e um resistor (que representa as perdas por colisão na região de bainha). O diodo acarreta o alto fluxo de corrente eletrônica, durante a excursão positiva do sinal de alimentação, o resistor representa a energia consumida pelo íon caindo através do limite de potencial, e o capacitor representa o armazenamento de carga nesta região em resposta à diferença de tensão de RF.

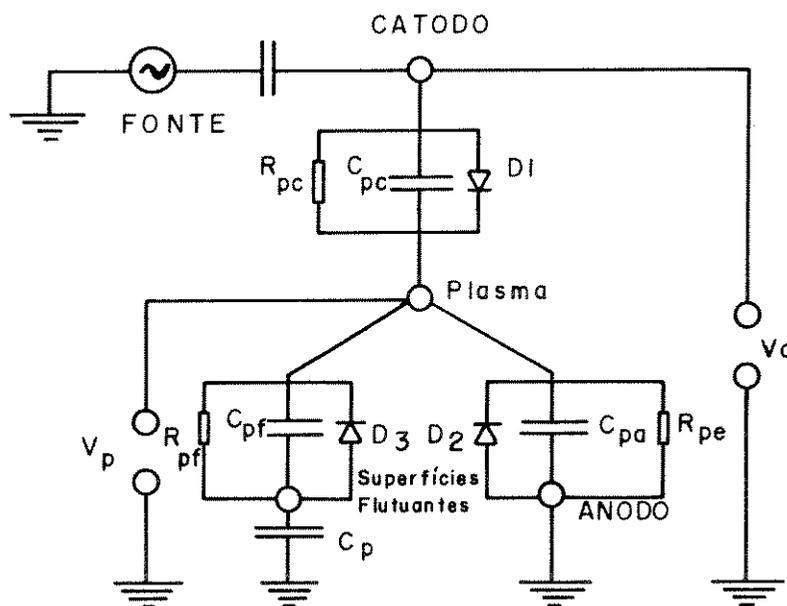


Fig.1.5 - Modelo simplificado de um sistema tipo Diodo [1.8].

Esta representação do comportamento de diodo é válida para frequências suficientemente elevadas de tal forma que os íons não possam seguir as rápidas variações do campo elétrico. Como isto ocorre na faixa de centenas de Khz a alguns Mhz, costuma-se identificá-las como RF (Rádio-Frequência).[1.7]

O alto fluxo de corrente de RF é a componente capacitiva. A componente resistiva é usualmente menor que 20% da componente capacitiva, exeto para gases eletronegativos, onde o plasma pode tornar-se quase resistivo, com pequena bainha armazenando carga.

Koenig estimou o valor da capacitância usando a equação de Child Langmuir para uma bainha DC [1.6]. Para calcular a espessura da bainha, ele assumiu como valor de capacitância o mesmo de um capacitor a vácuo com a espessura e a área da bainha. Este modelo simples foi usado para mostrar que a taxa de tensão DC entre a bainha do catodo e do substrato era inversamente proporcional à taxa de área do catodo para o anodo, com fator de 4 em um sistema diodo simples, como vemos abaixo [1.3]:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left[\frac{A_2}{A_1} \right]^4$$

Assim, a bainha próxima do catodo sofrerá a maior d.d.p., e a razão entre as quedas de tensão é fortemente dependente da razão de áreas entre os eletrodos (na prática verifica-se que o fator 4 é exagerado, sendo em média menor que 2 e variando entre 1 e aproximadamente 4 [1.8 e 1.9]). É importante notar que para se aumentar a tensão DC entre o catodo e o plasma deve-se diminuir a área deste.

1.4.3 - Frequência de RF

O efeito de frequência de RF no plasma etching não é totalmente explorado. Características diferentes de corrosão podem ser obtidas em usando-se alta frequências (13,56Mhz, que é a frequência mais usada, até 27MHz) ou baixa frequência (na faixa de 10-400Khz).

A frequência afeta a energia de bombardeamento dos íons, a pressão mínima na qual o plasma pode ser mantido e o processo reativo quimicamente envolvido, principalmente nas taxas de polimerização.[1.10]

A energia de bombardeamento do íon é afetada pela frequência de excitação de 2 maneiras: a primeira é a tensão de plasma V_p que aumenta com a diminuição da frequência [1.4]. Segunda, em frequências abaixo da frequência de transição (ITF), o íon atravessa a bainha rapidamente, dentro de um ciclo de oscilação, conseguindo inclusive adquirir a máxima energia correspondendo ao máximo de pico da tensão, ou seja, $E_{máx} = qV_p$ [1.4]. Em altas frequências, a energia de bombardeamento de íons é quase constante o tempo todo, ao passo que em baixas frequências, esta energia flutua instantaneamente entre zero e uma

energia equivalente a aproximadamente duas vezes a tensão de polarização do catodo [1.10] (fig.1.6). Para frequências acima da ITF, os íons atravessam a bainha vagorosamente comparando-se ao período de oscilação e assim chegam ao catodo com uma energia igual, com um valor médio de um potencial de bainha (aproximadamente V_p/π).

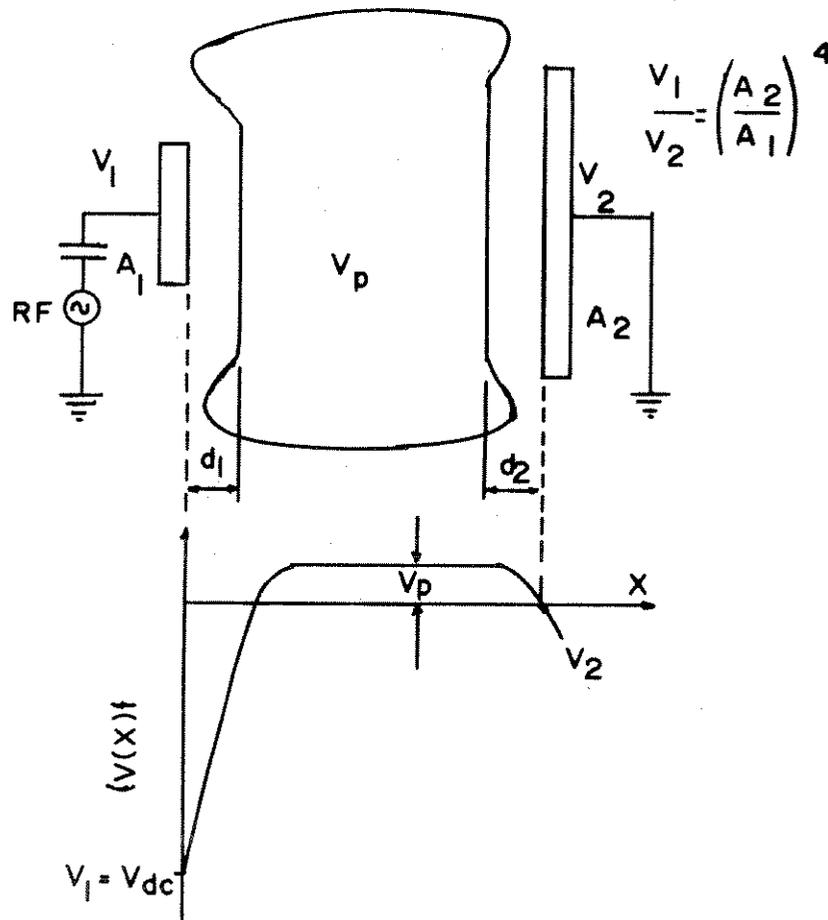


Fig. 1.6 - Ilustração potencial aplicado

Consequentemente, sob condições similares, a energia de bombardeamento de íons terá uma distribuição com energia média maior a frequências baixas do que a altas frequências, como é mostrado na fig.1.7 para íons produzidos com um plasma de Cl_2 [1.4]. Para processos na qual a taxa de corrosão é proporcional à energia de bombardeamento de íons, como é visto no corrosão de Si com um plasma de Cl_2 , isto pode resultar numa maior taxa de corrosão em baixa frequência (fig.1.8).

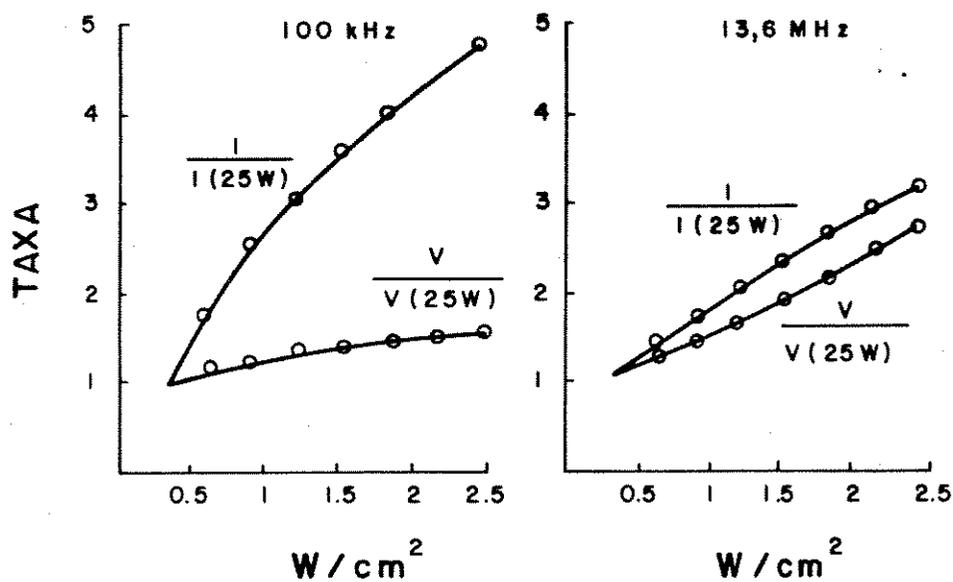


Fig. 1.7 - Taxa de Ataque de Silício com plasma de Cl_2 [1.4].

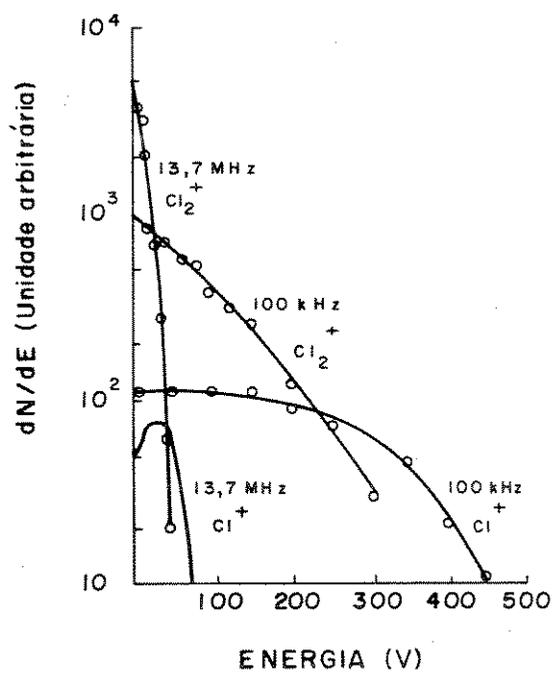


Fig. 1.8 - Distribuição de energia de bombardeamento para plasma de Cl_2 gerado a várias frequências [1.4].

A componente oscilante da energia de bombardeamento iônico é insignificante se [1.10]:

$$2\pi s \left(\frac{4m}{e \cdot V_{dc}} \right)^{1/2} f \gg 1$$

- onde
- s - largura da bainha do catodo
 - m - massa do íon
 - e - contribuição eletrônica
 - V_{dc} - Tensão de polarização do catodo
 - f - frequência de RF

Esta relação é satisfeita normalmente para frequências acima de 5Mhz [1.10]. Para baixas frequências, as superfícies que estão sendo corroidas podem receber íons com energia correspondente ao valor de pico do ciclo de RF, aumentando a possibilidade de formação de defeitos de superfície. Por outro lado, esta alta energia dos íons pode auxiliar na obtenção de corrosão com alta anisotropia (corrosão direcional).

A anisotropia, por sua vez, pode ser auxiliada também pela formação de polímeros que são depositados seletivamente nas paredes verticais, não sujeitos ao bombardeio dos íons. Esta deposição é dependente dos gases e pressões utilizadas ou ainda do uso de fotorresiste como máscara. Nesse caso conseguem-se estes polímeros otimizando este compromisso, com uma frequência de 500Khz.

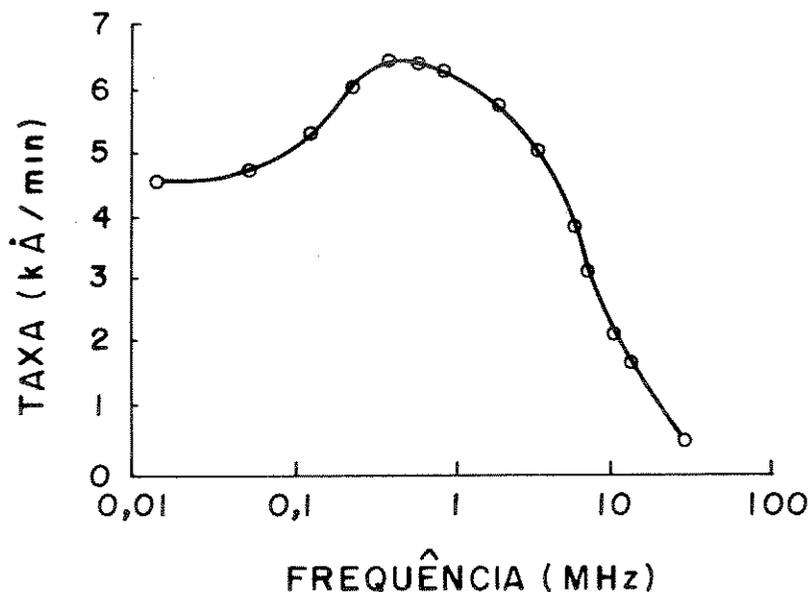


Fig.1.9 - Taxa de Ataque de Silício usando Cl₂ X Frequência de Excitação com uma potência de 0,6W/cm². Espaçamento entre eletrodos de 1 cm [1.3].

1.5 - TIPOS DE SISTEMAS DE DECAPAGEM POR PLASMA

Apresentamos neste ítem uma breve descrição de vários sistemas de corrosão por plasma com o intuito de justificar a nossa escolha de desenvolvimento de um sistema RIE.

1.5.1 - Tubular

O sistema de corrosão por plasma tipo Tubular, ou simplesmente Plasma Barril, possui eletrodos circundando sua câmara internamente, através dos quais passa o fluxo de gás, sendo ionizado ao passar. Estas espécies reativas possuem radicais livres de longa vida com baixa energia cinética. A amostra é geralmente colocada no centro da câmara onde sofre apenas uma corrosão química. Este sistema usa normalmente fonte de Rádio-Frequência de 13,54MHz para a ionização do gás. Tem como característica não danificar a amostra por meio de bombardeamento sobre a superfície e a isotropia, ou seja, a velocidade de corrosão é igual tanto na vertical, quanto na horizontal (fig.1.10).

O acoplamento da fonte de RF com o sistema pode ser feito de duas maneiras: por placas capacitivas ou por indução, como é visto na figura 1.10a e b.

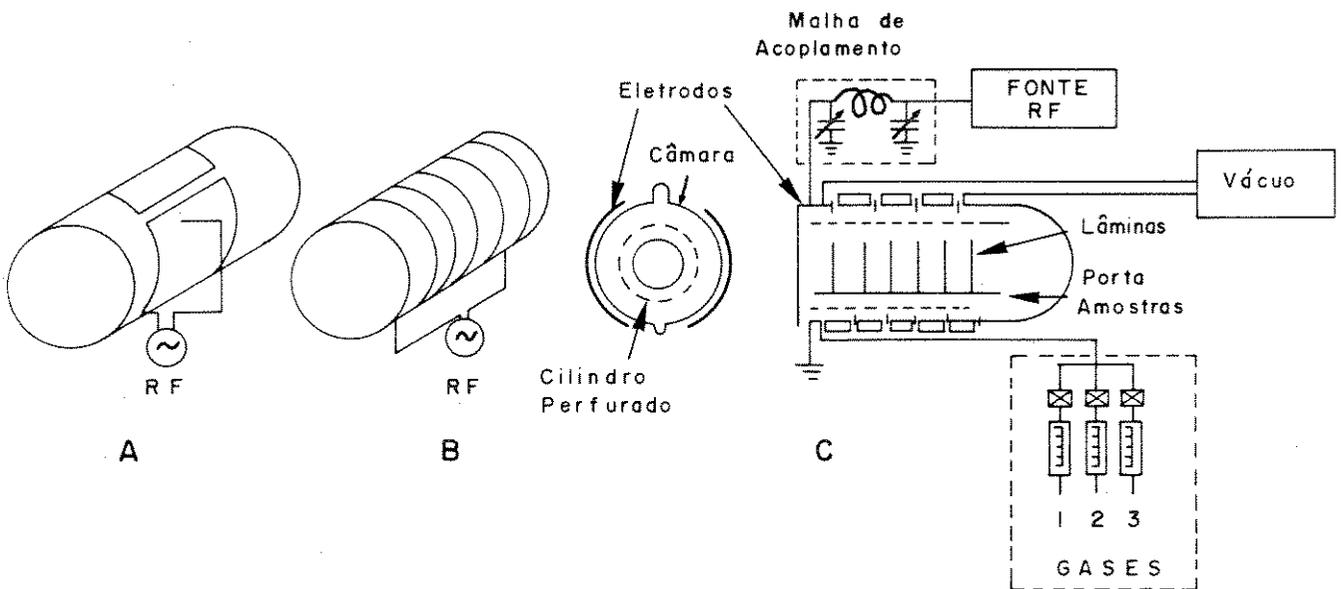


Fig.1.10 - A- Câmara com acoplamento capacitivo B- Câmara com acoplamento indutivo. C-Sistema de Ataque por Plasma com câmara tubular.[1.7]

1.5.2 - Planar

O sistema de corrosão por plasma tipo Planar, ou simplesmente PE (Plasma Etching) é contituido por uma câmara de reações de configuração planar, com eletrodos simétricos ou seja, com placas paralelas, entre as quais se forma o plasma. A amostra é colocada sobre o eletrodo aterrado. Este sistema trabalha em pressões medias (0.1 à 10 Torr), e usa uma fonte de rádio-frequência (20KHz à 13.56MHz) para ionizar o gás, gerando o plasma (fig.1.11). Neste sistema a corrosão é isotrópica, conseguindo-se alguma anisotropia apenas com o SiO_2 . A seletividade é boa, mas apenas regular para SiO_2/Si .(Fig.1.11) [1.16].

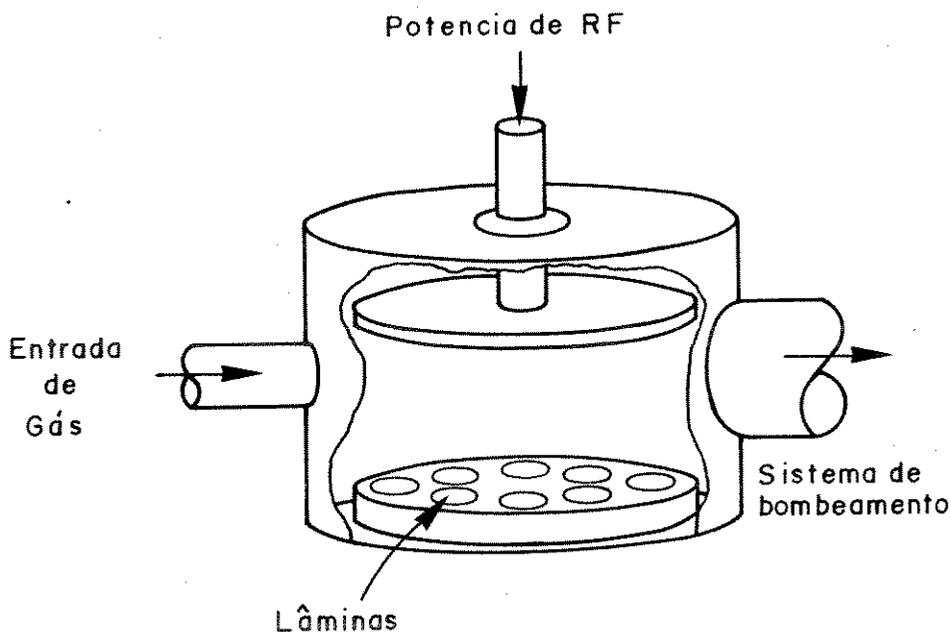


Fig.1.11 - Sistema de corrosão por plasma com câmara planar [1.16].

1.5.3 - RIE

O sistema RIE (Reactive Ion Etching) é a combinação entre PE e sistema IM (Ion Milling), descrito abaixo. Como o PE de configuração planar, ele usa um reator de placas paralelas, entre as quais se forma o plasma. A amostra é colocada sobre o eletrodo menor, onde é aplicado a potência de RF (entre 20kHz e 13.54 Mhz). Este sistema trabalha com baixas pressões (entre 0.001 e 0.1 Torr) para garantir a anisotropia, e usa um gás reativo (os íons do plasma reagem qui-

micamente com o material a ser corroído) ao invés de um gás não reativo como no IM. É interessante notar que em ambos os tipos de sistemas, PE e RIE, a amostra é colocada na região da câmara que recebe a radiação ionizante, o que pode significar um certo dano à amostra. As principais características deste processo são: os eletrodos são assimétricos; as amostras ficam no eletrodo menor, onde é aplicada a potência; consegue-se boa anisotropia e excelente seletividade com SiO_2/Si ; ocorrem corrosões químicas e físicos (Fig.1.12).

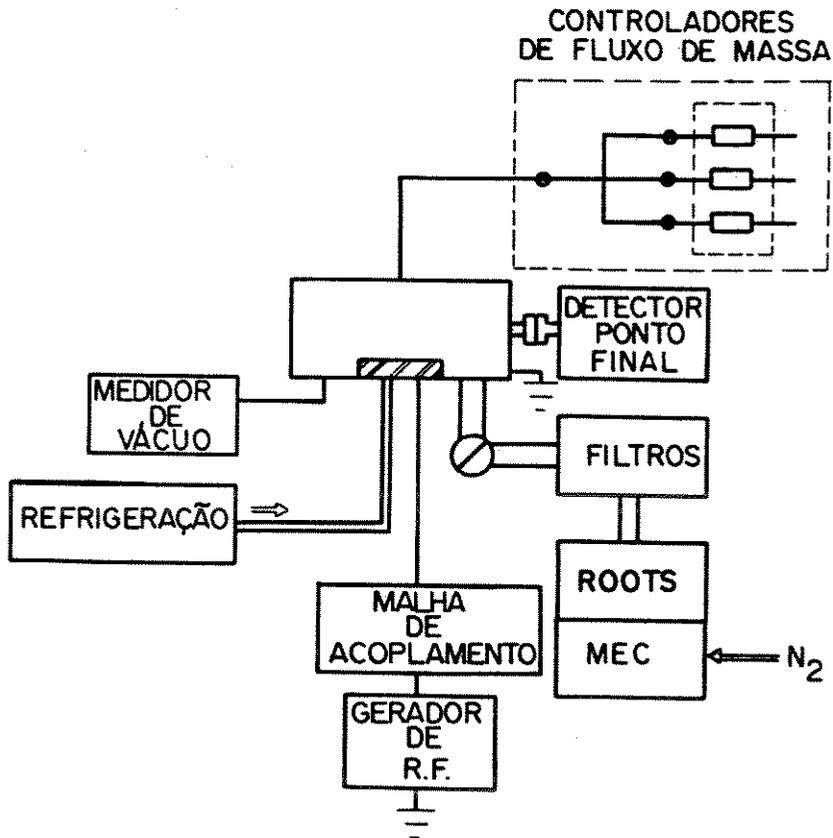


Fig.1.12 - Sistema de Ataque Iônico Reativo.[1.15]

1.5.4 - RIBE

O sistema RIBE (Reactive Ion Beam Etching) por sua vez reúne as características do RIE, como por exemplo anisotropia, e uso de gás reativo, com a vantagem de que a amostra não é colocada na região de radiação, não sofrendo, portanto, danos devido à sua exposição. A colocação da amostra fora da região de radiação exige o uso de um sistema para acelerar os íons, formando um feixe (de onde vem o nome do processo, Ataque Reativo por Feixe Iônico) que irá atingir a

amostra, e uso de uma grade neutralizadora do feixe, para que ele atinja a amostra neutra, não causando dano devido à radiação. A desvantagem desse sistema é sua complexidade, quando comparado ao RIE ou PE. (Fig.1.13)

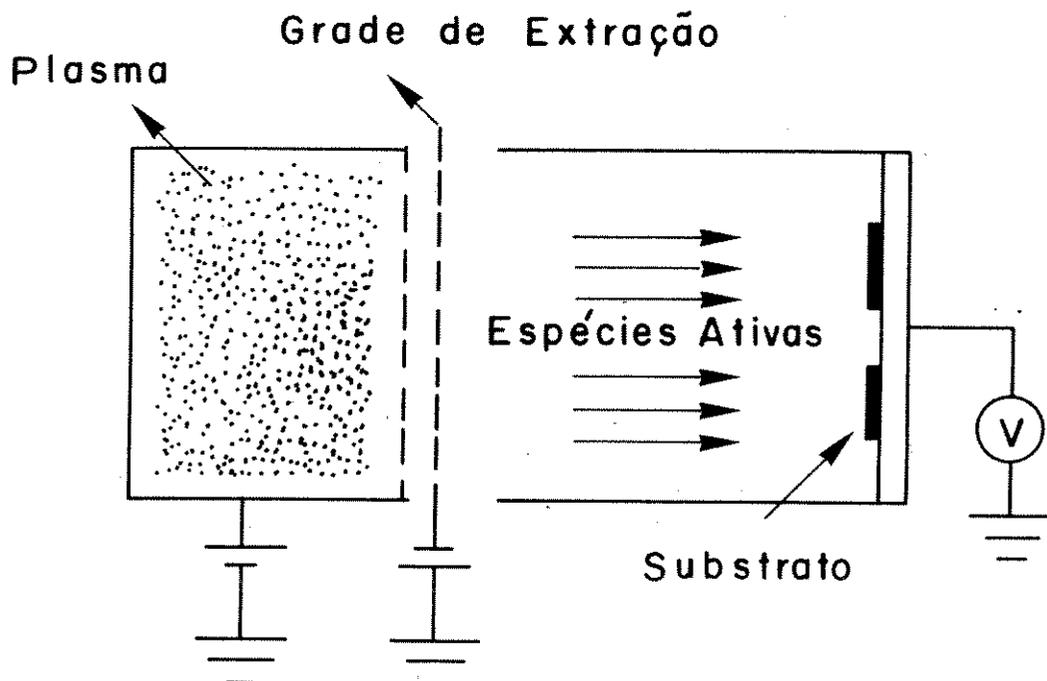


Fig.1.13 - Sistema de Ataque Reativo por Feixe Iônico [1.16].

1.5.5 - IM

No sistema IM (Ion Milling), também chamado moagem por feixe iônico, o processo de corrosão é totalmente físico. Neste processo a corrosão é feita pelo bombardeamento da amostra por íons inertes, no caso Argônio, que transferem momentum aos átomos da amostra arrancando-os dela (Fig.1.14). A principal desvantagem deste sistema é o grau de danos que a superfície da amostra recebe devido ao bombardeamento dos íons. A anisotropia no IM é maior do que no RIE ou RIBE, devido à menor pressão do gás que é usada na corrosão. A seletividade neste processo também é muito pobre.(Fig.1.14)

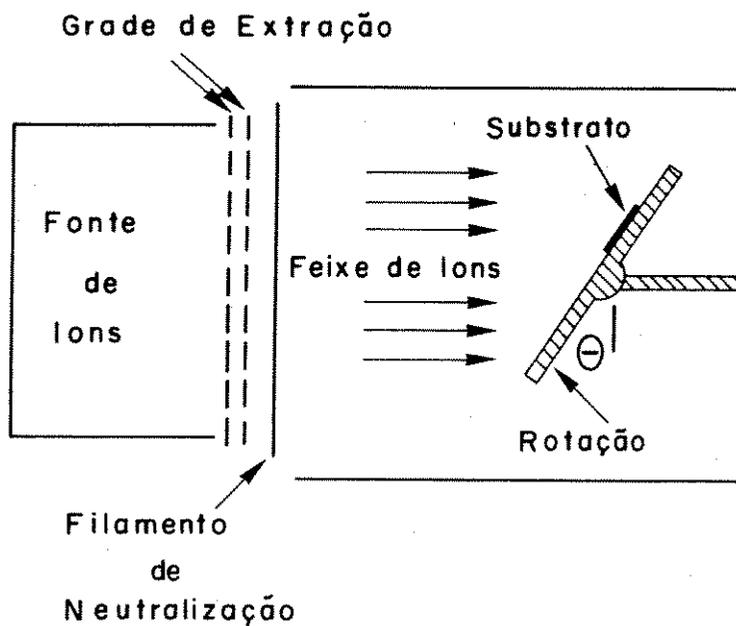


Fig.1.14 - Sistema IM [1.16].

1.5.6 - Sumário

No quadro a seguir mostramos as características principais de cada equipamento, localização da amostra e características de cada processo.[1.5]

	Reator Tubular	Reator Planar	RIE	RIBE	Ion Milling
Local da Amostra	Fora do Plasma	no plasma sobre o eletrodo aterrado	no plasma sobre o eletrodo c/ pot.		
Pressão (Torr)	$n \times 10^{-1}$	$n \times 10^{-1}$	$n \times 10^{-2}$	1×10^{-2}	1×10^{-4}
Fluxo de Gás (SCCM)	$n \times 10^2$	$n \times 10^2$	$n \times 10$	$n \times 1$	$n \times 1$
Energia dos ions (eV)	0	$n \times 1 - n \times 10^2$	$n \times 10^2$	$n \times 10^2$	$n \times 10^2$
Espécies Ativas	Átomos, Radicais	Átomos, Radicais, Ions Reativos	Radicais, Ions Reativos	Ions Reativos	Ions de Ar ⁺
Produtos	Voláteis	Voláteis	Voláteis	Voláteis	não Voláteis
Mecanismo	Químico	Químico Físico / Químico	Físico / Químico	Físico / Químico	Físico
Seletividade	Muito boa, insignificante p/ SiO ₂ /Si	Boa, regular para SiO ₂ /Si	Exelente, boa para SiO ₂ /Si	Boa p/ SiO ₂	Insignificante
Perfil	Isotrópico	Isotrópico Anisotrópico p/ SiO ₂	Anisotrópico, também p/ SiO ₂	Anisotrópico	Anisotrópico

1.5.7 - Escolha da configuração do sistema

Para o processamento de circuitos integrados digitais de GaAs de alta velocidade, que é o objetivo do laboratório, são necessários portas de 2µm de comprimento e menos. Para isto, é necessário que se tenha um sistema para corrosão que nos dê boa anisotropia para a litografia dos contatos, boa seletividade ao transferir os padrões da máscara para a amostra e uma uniformidade na cor-

rosão, compatível com o processo.

Tendo em vista estas exigências, poderíamos optar por dois tipos de sistemas : o RIBE, que possui ótimos resultados, cujo projeto é delicado e dispendioso, ou o RIE, que possui bons resultados e simplicidade.

Baseados nestas características nos optamos pelo sistema RIE.

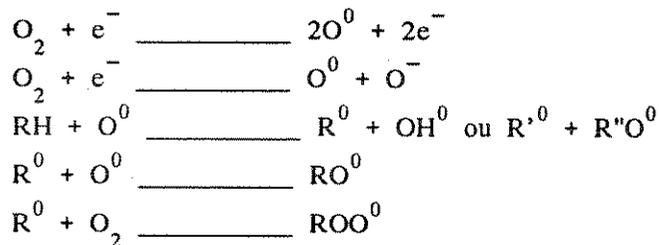
1.6 - MECANISMO DE REAÇÃO DURANTE A CORROSÃO

Listamos a seguir várias reações reportadas em processos de corrosão por plasma de fotorresiste e de tungstênio, objetos de estudo nesta dissertação.

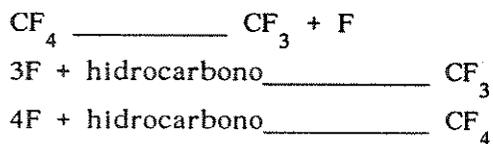
1.6.1 - De Fotorresiste

O mecanismo que ocorre neste processo e os produtos resultantes são mostrados a seguir:

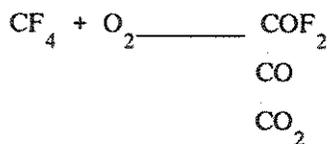
1.6.1.1 - Usando O_2 [1.17]:



1.6.1.2 - Usando CF_4 [1.17]:



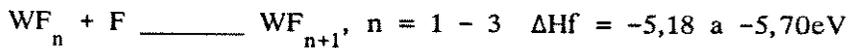
1.6.1.3 - Usando $CF_4 + O_2$ [1.17]:



1.6.2 - De Tungstênio usando gases fluorados [1.14]:

Usando dados da termodinâmica de Hidenbrand [1.12] mostra a seguinte sequência para produtos gasosos:

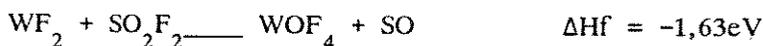
(i) Formação de fluoretos de Tungstênio:



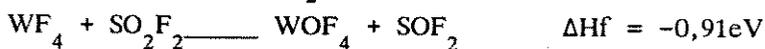
(ii) Fluorização ou oxidação de WF_4 , estimulada por bombardeamento iônico:



(iii) Fase gasosa ou reações de superfície para produtos secundários :



seguido por



Onde ΔH_f é a variação da entalpia, que são tiradas da literatura para produtos gasosos.

Estes resultados foram confirmados por espectroscopia de massa. A otimização da taxa de corrosão é obtida usando-se misturas de gases ricas em oxigênio (O, O^+ e O_2^+) [1.11].

1.8 - OBJETIVOS

Como objetivo deste trabalho temos o desenvolvimento de um sistema de corrosão por plasma tipo RIE e aplicá-lo à corrosão de dois tipos de filmes, fotorresiste e tungstênio. Isto faz parte de um objetivo maior, quer seja, o desenvolvimento de tecnologia de circuitos integrados em semicondutores compostos como o GaAs.

1.9 - REFERÊNCIAS

- 1.1- Herbert Sawin - Chemical Engineering and L.Rafael Reif - Electrical Engineering. "Plasma Processing for Microelectronic Fabrication: Plasma Deposition, Etching and Sputtering of Thin Films for VLSI" - Special Summer Program - M.I.T (U.S.A).
- 1.2- Contribuição ao Estudo dos Processos de corrosão de Fotorresiste por plasma Iônico e Íons Reativos. Tese de Mestrado : Autor- Costa, C.F.F. - UNICAMP - Julho de 1985.
- 1.3- S.M. Sze - "VLSI Technology" - Mc Graw Hill Book Company. Cap. 8 "Dry Etching" C.J.Mogab pag.303-345.
- 1.4- R.H.BRUCE - "Anisotropy Control in Dry Etching"- - Solid State Technology/ October 1981 - pag. 64-68.
- 1.5- Barbara A. Heath - Solid State Tech. - October 1981 - pág.75.
- 1.6- H.R. Koenig and L.I. Maissel - "Application of RF Discharges to Sputtering"- IBM J.Res. Dev. 14 pág. 168-171 (1970).
- 1.7- A.C. Seabra - "Construção e caracterização de um equipamento de corrosão por plasma e sua aplicação na corrosão de SiO₂"- Dissertação de Mestrado apresentada na Poli-USP - 1990- pág.2.41.
- 1.8- Coburn, J.W. and Kay, E. - "Positive-Ion Bombardment of Substrate in RF Diode Glow Discharge Sputtering"- Journal of Applied physics, 43(12):4965-71, dec., 1972.
- 1.9- Horwitz, C.M. "RF Sputtering-Voltage Division Between Two Electrodes". Journal of Vacuum Science and Technology, A1(1):60-8, jan-march, 1983
- 1.10- Bollinger, D.; Iida, S.; Matsumoto, O.- "Reactive Ion Etching: Its Basis and Future", Solid State Technology, June 1984.
- 1.11- Picard, A.; Turban, G. - "Plasma Etching of Refractory Metals (W,Mo,Ta) and Silicon in SF₆ and SF₆-O₂. An Analysis of the Reaction Products." - Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 5, Nº 4, 1985.
- 1.12- Hildenbrand, D.L. - "....." - J. Chem. Phys. (62), 3076, 1975.

- 1.13- Kushner, M.J. -"....." - J.Appl.Phys.(53), 2923, 1982.
- 1.14- Gorowitz B., Saia R.J. and Balch E.W. - "Methods of Metal Patterning and Etching - Cap IV - ULSI Eletronics Microstructure Science, Vol.15.
- 1.15- Ramos, A.C.S.; Swart, J.W.; Tatsch, P.J.; Santos F.,S. G.; Ribeiro, E. e Prince, F.C. - "Projeto e Caracterização de um sistema RIE e sua aplicação na corrosão de tungstênio sobre GaAs", SBmicro 1993.
- 1.16- Williams, R.E. - "Gallium Arsenide processing Technics".
- 1.17- Hansen, R.H.; Pascale, J.H.; De Benedictis, T. and Rentzepis, P.M. - " photoresist Processing" - J. Polym. Sci. A3, 2205 (1965).

CAPÍTULO 2

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA RIE

2.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo detalharemos o projeto mecânico e elétrico, bem como a montagem e os testes feitos com o sistema, para comparação com os sistemas vistos ou apresentados em literatura.

2.2 - PROJETO DO SISTEMA

2.2.1 - Mecânico

O sistema consta de uma câmara de reações, medidor de temperatura do catodo, sistemas de gases, de bombeamento e refrigeração.

Neste ítem descreveremos os blocos acima, com detalhes e ilustração dos mesmos.

2.3.1.1 - Câmara de Reações:

Para a execução deste projeto o material escolhido foi aço inox 304, por possuir boas características em contato com o vácuo e a facilidade de soldar suas peças com solda de argônio, além de boa resistência contra gases reativos.

Esta câmara é composta por:

A- Eletrodo superior confeccionado em alumínio, com o diâmetro da ordem de três vezes o eletrodo inferior ou catodo. Possui a entrada de gás em seu centro, através de uma matriz de furos de 0,3mm de diâmetro, para a melhor distribuição do gás. Sua altura é ajustável, mudando assim as características do plasma, se assim quisermos.

B- Possui dois visores de 90mm de diâmetro, o primeiro para acoplarmos um detetor de ponto final ou um espectrômetro, para caracterização

da luz emitida pelo plasma. O segundo para a passagem de um termopar até o catodo, e para a observação. Ambas as janelas são de Borossilicato.

C- Eletrodo inferior possui 125mm de diâmetro e é confeccionado em cobre, devido à sua melhor dissipação de calor, possuindo em sua parte inferior uma entrada e uma saída de água gelada para sua refrigeração, bem como um plug para contato elétrico. Em seu centro existe um difusor, para forçar a circulação da água. A isolamento elétrica em relação ao resto da câmara foi confeccionado em teflon. Foi adicionado uma blindagem de proteção para este material, pois este material, se exposto às espécies reagentes do plasma, poderia sofrer uma corrosão química deste. Esta blindagem serve também para confinar o plasma somente na parte superior do catodo, evitando assim perda desnecessária de potência. A distância entre o catodo e esta blindagem deve ser pouco inferior à largura da bainha criada pelo plasma, para evitar fuga de potência de RF. Na parte superior do catodo existe uma capa em alumínio de 3mm de espessura para evitar a oxidação do cobre pelo uso de gases ricos em oxigênio. O contato térmico e elétrico entre esta capa e o corpo do catodo é feito por tinta prata. Na capa existe um furo para que um termopar consiga tocar o interior da peça, através de um tubo de quartzo.

D- Difusor de vácuo consta de uma placa circular com um furo central para a passagem do catodo com um folga de 10mm. Este disco é suportado por quatro pés sobre a base. Tem como função homogeneizar o fluxo de gás/vácuo em toda a câmara, mantendo assim a reação constante em todo o catodo.

E- Possui ainda quatro flanges em aço inox 304:

- 1- Acima do difusor, na parede da câmara posicionada a 45 graus dos visores, com o objetivo de suportar o medidor de pressão (com um diâmetro de 25mm).
- 2- Na base da câmara, tendo como função a admissão de Nitrogênio para pressurização do sistema (com um diâmetro de 25mm).
- 3- Duas flanges grandes (2") na base, simétricos em relação ao centro, para acoplamento do sistema de vácuo.

O desenho desta câmara, com todos os detalhes, é mostrada na Fig.2.1

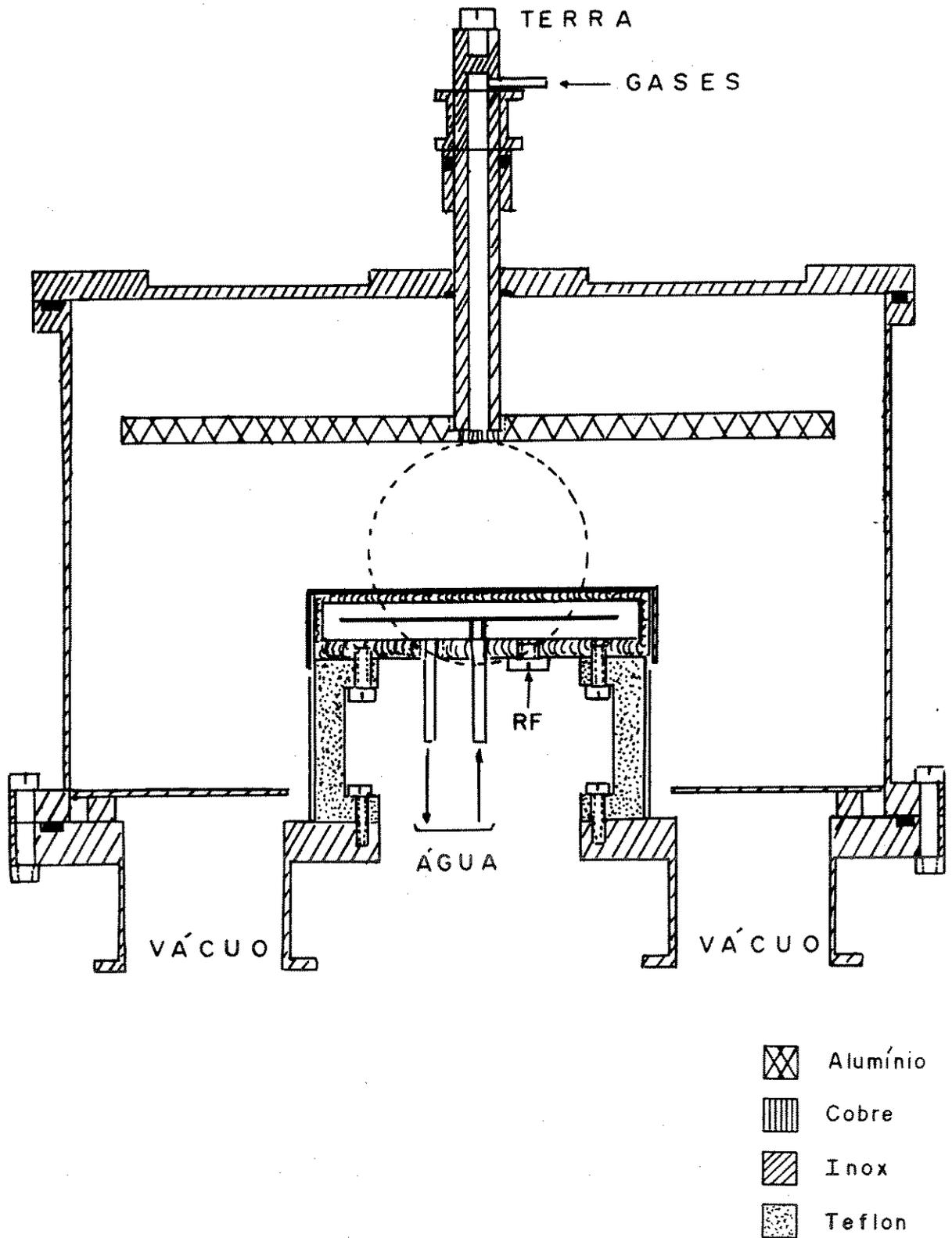


Fig.2.1 - Câmara de Reações

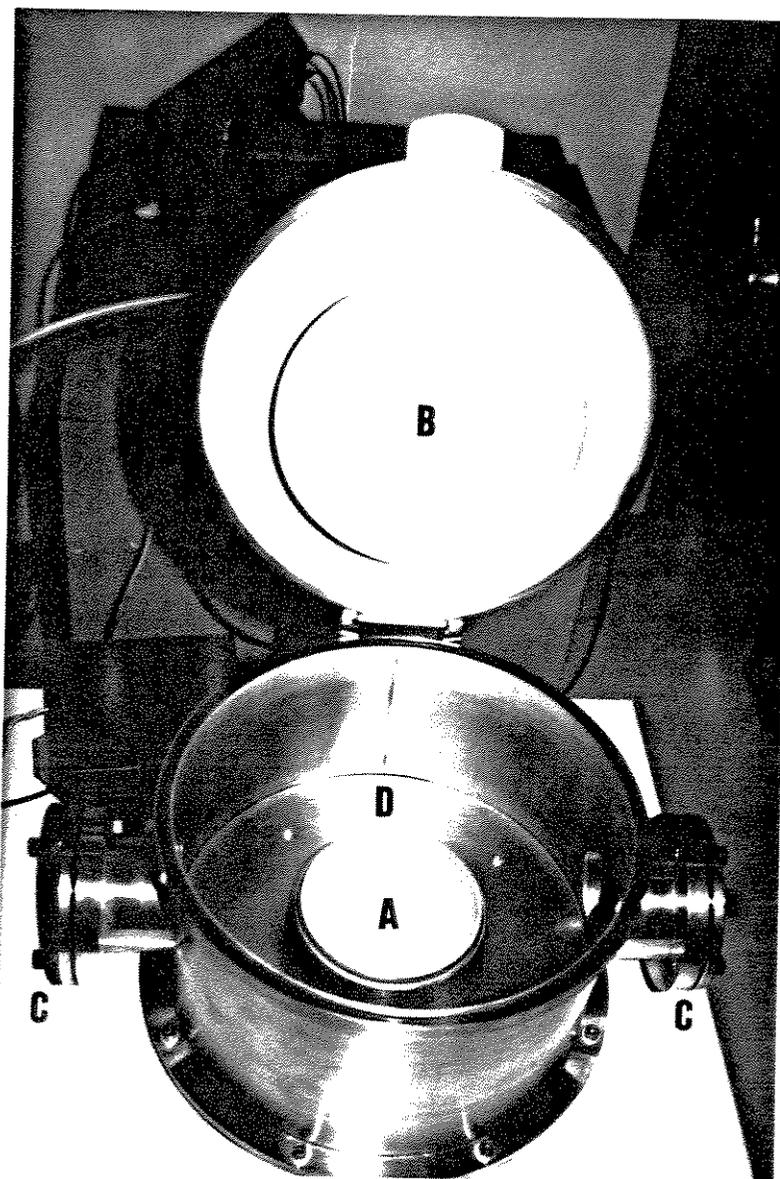


Figura 2.2 : Fotografia da câmara de reações

A- Eletrodo inferior

B- Eletrodo superior

C- Janelas

D- Difusor

2.2.1.2 - Sistema de gases:

Inicialmente usamos um sistema sendo controlado rusticamente e sem muita sensibilidade, pois usamos apenas válvulas agulhas, uma para cada gás, e um fluxômetro eletrônico marca "Matheson" com fundo de escala de 3000 sccm de ar, que foi modificado, de tal maneira que o fundo de escala fosse 300sccm. Esta modificação constou da substituição do orifício de passagem para um de cerca de 0.5mm de diâmetro.

Numa segunda fase este sistema foi substituído por um sistema de controladores de fluxo de massa, com fundo de escala de no máximo de 500 sccm, pois os fluxos usados estão entre 10 e 300 sccm. Utilizamos um sistema de controladores de fluxo de massa da MKS, modelo 1259C-0500SD.

As ligações estão feitas com tubos de 1/4" e conexões tipo "poly-flo".

2.2.1.3 - Sistema de Bombeamento:

O sistema de bombeamento conta com uma bomba mecânica com velocidade nominal de bombeamento de $38 \text{ m}^3/\text{h}$ e pressão final nominal de 1×10^{-4} Torr da firma "Leybold-Heraeus" modelo D30A e uma bomba Roots, esta da firma "Omell S.A." modelo Maxival SKV-0173 que aumenta a velocidade nominal de bombeamento do sistema para $250 \text{ m}^3/\text{h}$, sendo necessário para a rápida retirada dos gases residuais da câmara. Esta bomba na verdade é um soprador de ar industrial operando em sentido inverso. Ela possui verdação adequada para funcionamento em um sistema de vácuo e resulta num sistema bem economico. Uma válvula borboleta controla a pressão e isola a câmara do sistema de vácuo. Esta válvula borboleta é da firma "Niágara S.A." modelo 7901187 com a isolação de nitrílica. Posteriormente ela foi substituída por uma válvula da MKS modelo 253A-3-2-1 com controle eletrônico automático. O sistema conta ainda com uma entrada controlada de N_2 entre uma bomba e outra tendo a função de forçar a limpeza do óleo da bomba mecânica, evitando que o O_2 presente nas reações fique na mesma e para evitar o refluxo de óleo para a câmara. Esta entrada conta com um rotâmetro para controlar o fluxo.

Na bomba de vácuo mecânica foi usado óleo TALPA-30 fabricado pela SHELL recomendado por especialistas em vácuo, por não ter detergente, e sua viscosidade estar de acordo com o projeto da bomba [2.9]. A troca de óleo deve ser feita a cada 40h de uso aproximadamente [2.10].

Na bomba roots é usado para a lubrificação dos eixos o óleo TELOS-C220, fabricado pela SHELL, que deve ser apenas completado até o nível, sempre que estiver abaixo [2.7].

A limpeza deste sistema deve ser feita anualmente, onde deve ser limpa a bomba de vácuo mecânica, a bomba roots e a tubulação. Estas condições de troca de óleo e limpeza são válidas apenas para quando se utiliza gases como CF_4 , $CF_4 + O_2$, SF_6 e O_2 .

A tubulação que liga o sistema de vácuo à câmara foi feita com tubos e tubos sanfonados (bellows) de cobre por estarem disponível, esperando uma futura substituição por peças de aço inox, próprias para sistemas de vácuo.

2.2.1.4 - Medidor de temperatura do Catodo:

A medida de temperatura é feita por meio de um termopar blindado introduzido através de uma janela, envolto em um tubo de quartzo com a extremidade selada. Este é introduzido num furo na lateral da capa de alumínio do eletrodo, com profundidade de 5mm. A vedação na janela é feita com resina para alto vácuo (Torr Seal).

A interface entre o tubo, onde está o termopar e capa do catodo foi preenchida com tinta prata, pois ela dá uma boa condução térmica. Entre o tubo e o termopar foi colocada pasta condutora térmica (usada em transistores e dissipadores).

2.2.1.5 - Sistema de Refrigeração :

Este item é constituído por apenas um filtro conectado ao sistema de água gelada do prédio, e uma válvula solenóide que é acionada logo que o gerador de RF é ligado. A tubulação usada é toda de tubo de PVC de 1/4" e conexões do tipo "Polyflo". A temperatura da água é de aproximadamente 12°C.

2.3.2 - Elétrico

2.3.2.2 - Circuitos de medida de temperatura

O termômetro é constituído de um compensador de junção fria, para que uma variação na temperatura do ambiente não seja motivo de erro na medida. Ele é projetado com o circuito integrado AD590 que é uma fonte de corrente, um estágio amplificador usando o amplificador operacional OP 07, que é um elemento com baixo ruído de entrada, ligado em uma configuração não inversora e tendo como referência de tensão o circuito integrado ICL 8069 (fig.2.3), e um milivoltímetro simples, (circuito este que foi usado como base para todos os medidores do equipamento, e como este, todos foram construídos no laboratório) usando o circuito integrado Intersil 7107 de 3 1/2 dígitos (fig 2.4) com uma fonte de +12,-12 e -5V para a sua alimentação.

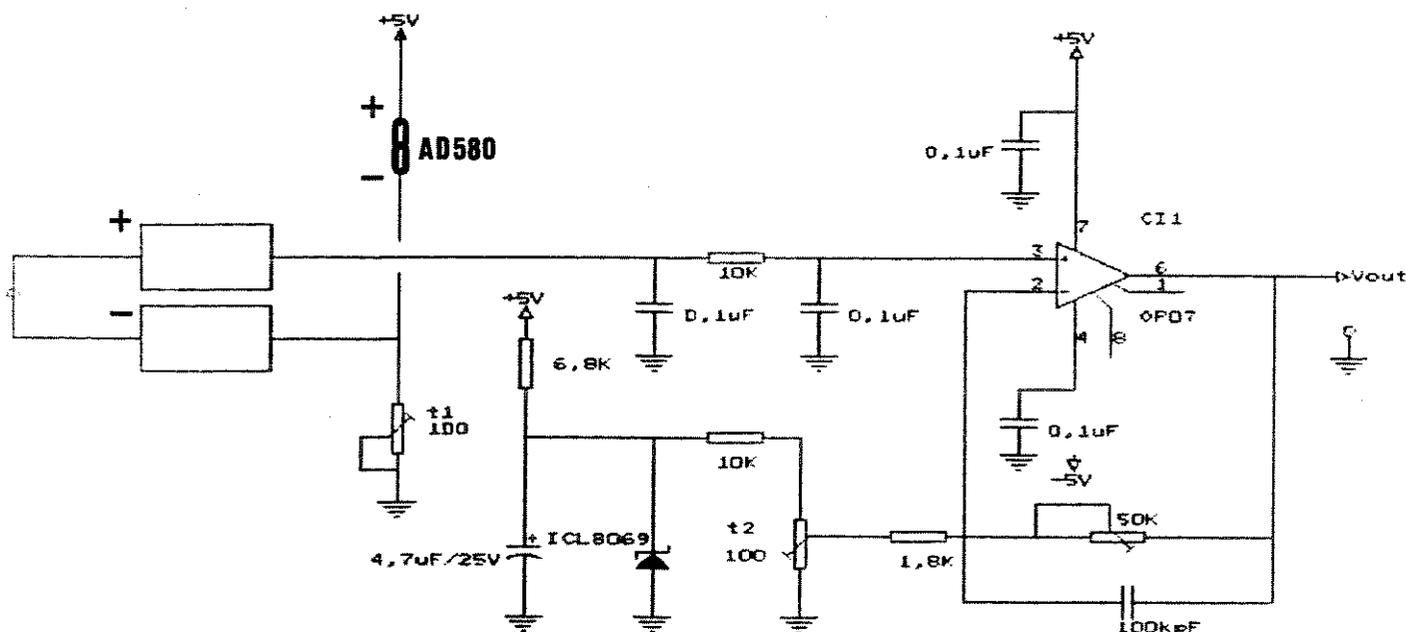


Fig.2.3 - Esquema do termômetro usado

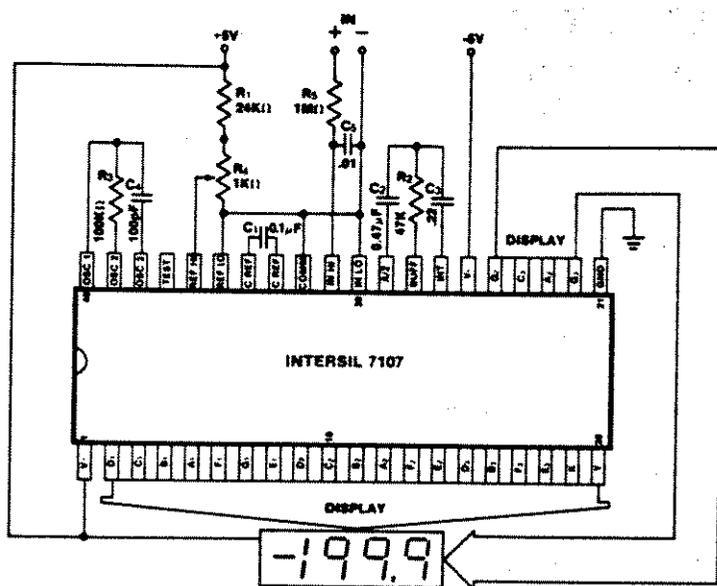


Fig.2.4 - Esquema elétrico do milivoltímetro usado no medidor de temperatura.

2.2.2.2 - Medidor de pressão:

Está sendo usado um medidor de membrana capacitiva, tipo Baratron, marca "MKS", modelo 127AA, que permite medidas na faixa de até 10Torr, à uma temperatura de 15 - 40°C. A temperatura de controle deste equipamento é de 45°C, que se estabilizará em aproximadamente 15 minutos após ser ligado. Para a leitura deste sensor confeccionamos um milivoltímetro igual ao visto acima, com o circuito integrado Intersil 7107(fig.2.4).

2.2.2.3 - Gerador de Rádio Frequência:

Parâmetros considerados para a determinação do tipo de gerador de potência a ser usado, foi a determinação da taxa de corrosão com a frequência e

a facilidade de se encontrar peças no mercado, para se construir o gerador.

Como mostra o gráfico da fig.1.9, feito para corrosão de silício usando como gás reagente Cl_2 , com uma pressão de 40 Pa ou 300mTorr com uma potência de $0,6 \text{ W/cm}^2$ e o espaçamento entre os eletrodos em torno de 1 cm, obtem-se uma taxa de corrosão máxima para a frequências em torno de 500KHz [2.11].

Nesta faixa de frequência é também fácil a obtenção de peças no mercado nacional para a confecção do gerador. Adicionalmente, o uso de gerador de 500KHz ao invés do tradicional 13,56MHz, também reduz o custo do gerador e reduz problemas de blindagens e instalações.

Assim, optamos pela frequência de 500kHz. Para isto, realizamos um projeto utilizando circuitos integrados e um estágio de saída de RF com transistores.

Quanto à potência deste equipamento, não se necessita mais que 300W, ou seja, $2,44 \text{ W/cm}^2$, para o nosso sistema.

O circuito projetado permite que a frequência possa ser abaixada, mudando-se o cristal do oscilador que atualmente esta com 1MHz, dando assim maior versatilidade ao equipamento.

O gerador é ligado à câmara através de uma malha de acoplamento, com detetor de sintonia.

Este circuito é protegido contra picos de tensão refletidos.

O funcionamento do circuito deste gerador é a seguinte:

Gera-se uma frequência de 1 Mhz em um oscilador simples constituído por um conjunto de inversores. Este sinal quadrado segue para um bloco divisor de frequência formado por um circuito integrado 74LS74, que divide a frequência pela metade garantindo-se simetria nos tempos de subida e descida, e conseguindo-se assim a frequência de 500 KHz , escolhida para o RIE .

Este sinal resultante é aplicado a dois estágios de atraso assimétricos formados por inversores e redes RC . Este estágio torna-se importante quando utiliza-se estágio final de saída com transistores de forma complementar, pois evita a condução simultânea dos dois elementos, o que aumentaria em muito a dissipação de potência nos mesmos, devido à alta corrente na transição do sinal.

O estágio seguinte atua como amplificador do sinal (em tensão e corrente) adequando-o ao chaveamento dos transistores MOS de saída. Este estágio fornece uma saída de $\pm 12V$ com tempo de subida e descida de aproximadamente 150 ns, para carga capacitiva em torno de 700pf (capacitância de porta do MOS).

O acoplamento do estágio anterior (drive) aos transistores de saída é feito através de transformadores de pulso, tendo em vista que a tensão de alimentação dos mesmos é variável em função da potência desejada. Assim torna-se necessária a isolação DC entre os dois estágios.

O estágio de saída é implementado com dois transistores MOS complementares da RCA tipo RFP10N15 e RFP10P15 com capacidade de corrente de 10 A, tensão máxima $V_{ds} = 150 V$ e tempo de chaveamento em torno de 100ns . A configuração utilizada é de fonte comum tomando-se a saída nos drenos dos transistores. Esse sinal quadrado é aplicado a um transformador elevador de tensão , com relação de espiras de 1:4 , em série com um filtro LC sintonizado em 500KHz.

É tomada uma amostragem de corrente nos transistores, desativando sua excitação para correntes superiores a 6 A.

A variação de potência é conseguida ajustando-se a tensão de alimentação dos transistores de saída até um máximo de 140 Vdc.

A saída final do gerador é tomada diretamente do secundário do transformador, fornecendo um sinal aproximadamente senoidal, com amplitude e corrente máximas em torno de $250 V_{rms}$ e $1,2 A_{rms}$ respectivamente.

O sinal é então aplicado ao catodo na câmara de plasma através de uma malha de acoplamento composta de indutor e capacitores variáveis, que possibilitam o casamento de impedâncias gerador/carga garantindo boa eficiência do sistema.

O esquema elétrico deste circuito pode ser observado na fig.2.5.

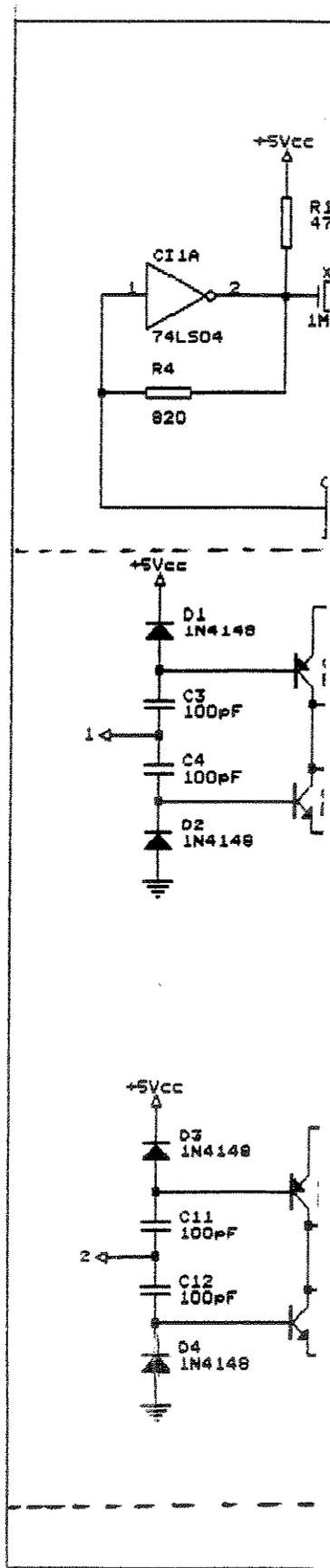


Fig.2.5a - Esquema elétrico do Gerador de RF

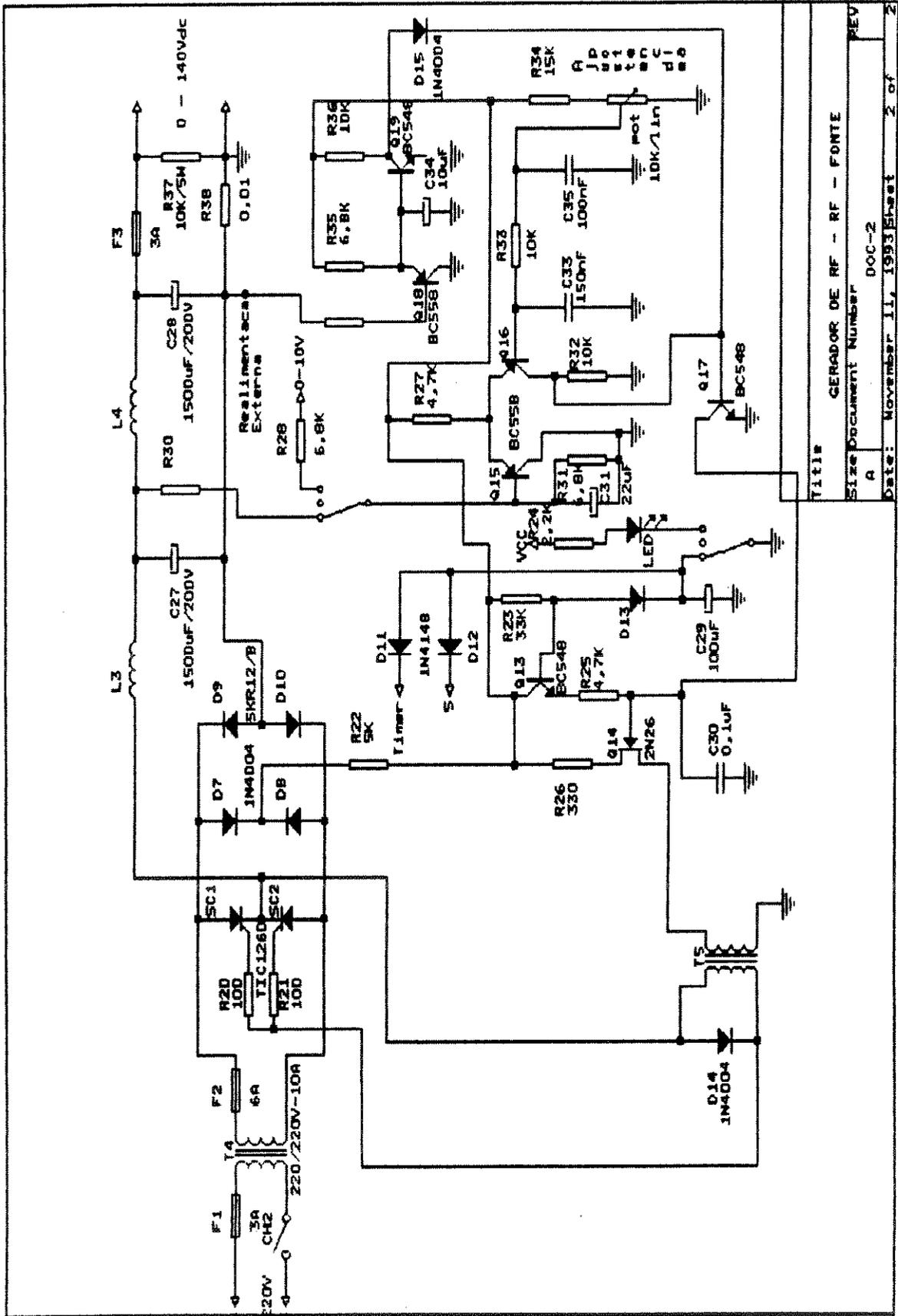


Fig. 2.5b - Fonte do gerador de RF

Title	GERADOR DE RF - RF - FONTE
Size	Document Number
REV	A
Date:	November 11, 1993
Sheet	2 of 2

2.2.2.4 - Medidores de Potência, Tensão e Corrente:

Este circuito tem como entradas: a)- uma amostragem da tensão que é retirada do aparelho por meio de um divisor de tensão, passando por um capacitor, e logo após retificado, b)- uma amostragem de corrente, que é coletada através de um transformador de corrente enrolado em um núcleo de ferrite toroidal é igualmente retificado. Estes sinais entram em um circuito multiplicador de quatro quadrantes, multiplicando-os e obtendo-se a potência.

Para a leitura da tensão de auto-polarização o sinal é retirado do mesmo divisor, da qual se retirou a tensão e o submete a um filtro passa-baixo, deixando que só passe a tensão contínua, cortando-se o sinal senoidal do gerador (fig.2.6).

Estes sinais são mostrados em milivoltímetros confeccionados com circuito integrado 7107 da Intersil (fig.2.4).

2.3 - MONTAGEM DO SISTEMA

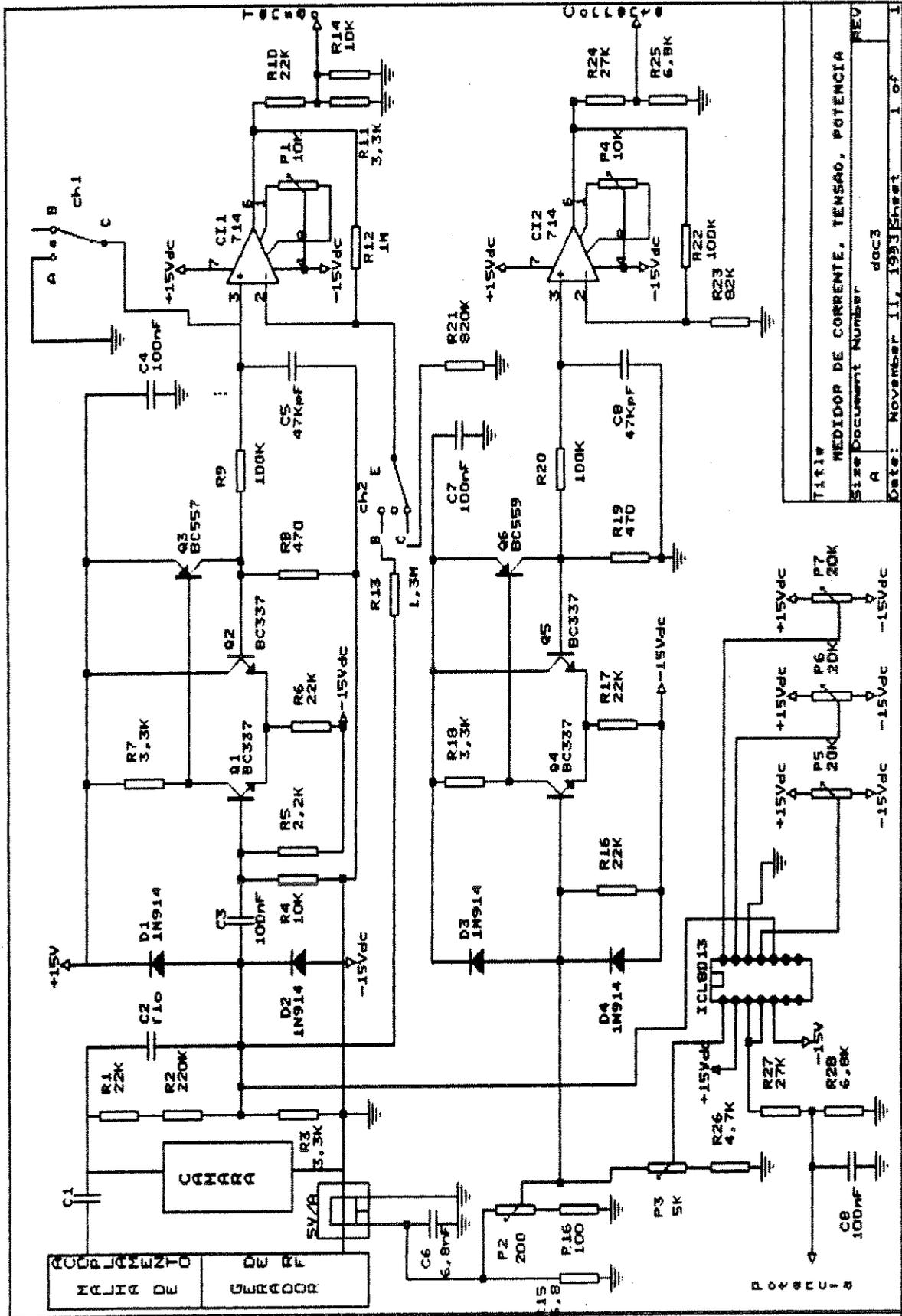
O sistema foi montado em um rack modelo 24570M da firma Gralmetal, pois este tem como característica a fácil abertura das suas laterais, com isto facilitando o acesso para a montagem e manutenção do mesmo.

Na tampa superior do rack foi feito um furo no diâmetro exato da flange inferior da câmara de reações. Para suportar esta câmara foram colocados perfilados de ferro em forma de "L", pousados e fixos na estrutura superior do rack.

Como suporte dos equipamentos foram usados perfilados de alumínio, por serem mais leves, e o próprio painel frontal. No painel estão fixos também as válvulas de entrada de gases, chaves interruptoras e a botoeira da chave magnética.

O transformador que isola o gerador de RF da rede é fixo na estrutura, na base do rack, devido seu tamanho e peso.

A chave magnética está dentro de uma caixa metálica para proteção, e fixada numa coluna posterior do rack, facilitando a passagem dos fios, por dentro desta.



TITULO	MEDIDOR DE CORRENTE, TENSÃO, POTENCIA
Size	Document Number
A	doc3
Date:	November 11, 1993
Sheet	1 of 1

Fig.2.6- Esquema elétrico do medidor de Potência, Corrente e Tensão.

As entradas dos gases, da água gelada para a refrigeração do sistema e a tubulação de vácuo são feitas pelo painel traseiro à meia altura. As conexões de passagem de gases e a válvula solenóide de entrada da água são fixadas no mesmo painel traseiro.

No painel dianteiro foram feitos furos para a fixação dos medidores de potência, tensão pico a pico do gerador, tensão de polarização, corrente, pressão. Na primeira versão tinha também um fluxometro eletrônico e o cursor da válvula borboleta, hoje substituído pelo controle dos controladores de fluxo de massa e pelo controle da válvula borboleta.

2.4 - CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

2.4.1 - Velocidade de bombeamento

Uma das características mais importantes de um sistema de vácuo é aquela que chamamos de velocidade de bombeamento, S , que é o volume de gás que o sistema de vácuo é capaz de remover, a uma determinada pressão, por unidade de tempo, de uma dada câmara.[2.1] Podemos expressar S pela relação

$$S = \frac{v}{t}$$

onde : v = volume do gás bombeado

t = intervalo de tempo

As unidades de S mais frequentemente usadas são litros/segundo, metros cúbicos/hora e pés cúbicos/minuto. Para um dado sistema de vácuo, S não é em geral constante, mas depende da pressão do gás no interior da câmara. S também depende do gás que está sendo bombeado. Portanto, para cada sistema de bombeamento, poderemos ter um gráfico de S em função da pressão P , que é característico do mesmo.

Variamos o fluxo, através do controlador de fluxo de massa e lemos o valor de pressão correspondente.

Sabemos que:

$$Q = P S \quad (1)$$

$$Q = \frac{sV}{t} \quad (2)$$

Substituído (2) em (1) temos

$$S = \frac{Q}{P}$$

onde: Q = velocidade de bombeamento(standard) a pressão ambiente (sccm)

S = velocidade de bombeamento (cm³/min)

Na figura 2.8 mostramos as curvas de velocidade de bombeamento obtida. A título de comparação também apresentamos no mesmo gráfico as curvas de velocidade de bombeamento de sistemas comerciais: de uma bomba mecânica de 40m³/h e um

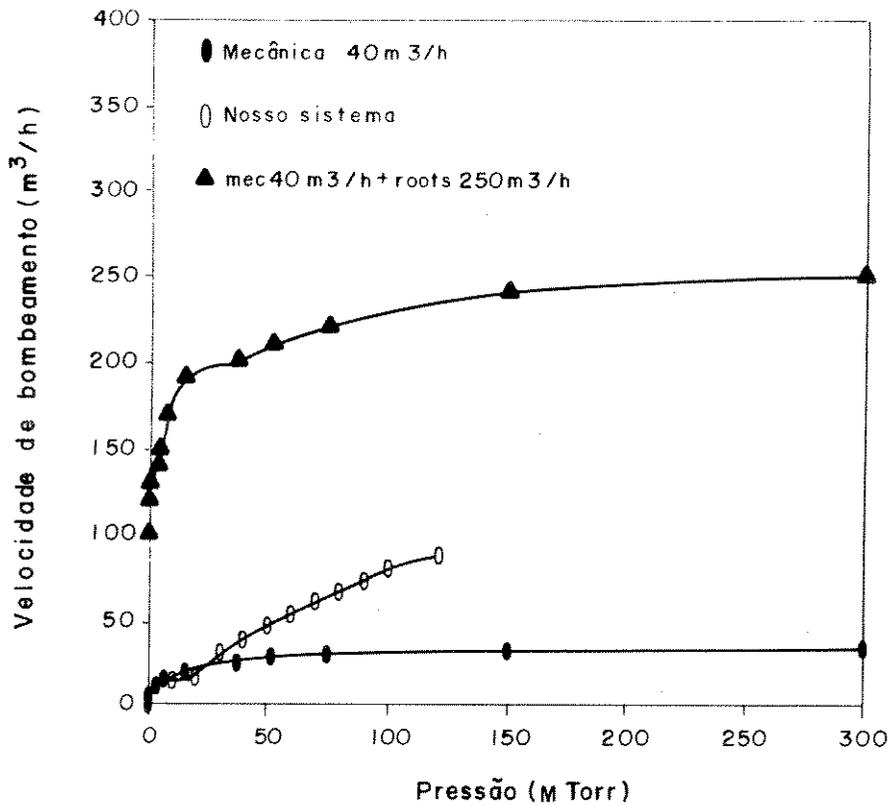


Fig.2.8 - Valores experimentais de velocidade de bombeamento versus pressão na câmara e dados de sistemas de vácuo comerciais [2.13].

conjunto mecânica de 40m³/h + roots de 250m³/h. Notamos uma considerável diferença entre nossos dados e os do sistema comercial composto de bomba mecânica e "roots blower". Esta diferença pode ser atribuída primeiramente devido à impedância da tubulação série entre bombas e câmara e segundo ao fato da nossa segunda bomba ser um soprador de ar industrial projetada para operar em pressão atmosférica. Mesmo assim, obtivemos o aumento da velocidade de bombeamento promovido pelo soprador de ar. E mesmo não alcançando a velocidade de bombeamento oferecido pelo sistema comercial, ela atende os requisitos, como veremos no capítulo 3.

2.4.2 - Pressão Final

A calibração da pressão do aparelho foi feita indiretamente, devido à dificuldade em montar o equipamento de aferição ao lado do RIE. Para isto, retiramos o nosso medidor de pressão e levamos até o equipamento de aferição.

Esta montagem é constituída de um sistema de vácuo semelhante ao nosso, uma válvula agulha para a entrada de ar e controle da pressão e um medidor do tipo McLeod "Vacustat".

Estes manômetros são medidores absolutos sendo, portanto, muito úteis na calibração de outros medidores de pressão não absolutos. Este tem como característica, que o difere dos demais, uma articulação, em torno da qual ele pode girar. Na fig.2.9, o ponto 1 é o centro de rotação, conectado ao sistema de vácuo por meio de uma tubulação flexível. O número 2 representa o mercúrio.

Para se fazer uma medida de pressão coloca-se o Vacustat inicialmente na posição da fig.2.9a. A seguir gira-se o manômetro cautelosamente de modo a que o mercúrio venha a encher o bulbo, comprimindo o gás no capilar (fig.2.9b). A pressão é determinada pela equação

$$P_s = \frac{\rho g A}{V} h^2$$

onde:

- ρ - densidade do mercúrio
- A- área da secção reta do capilar
- V- volume do bulbo com o capilar
- h- diferença dos níveis

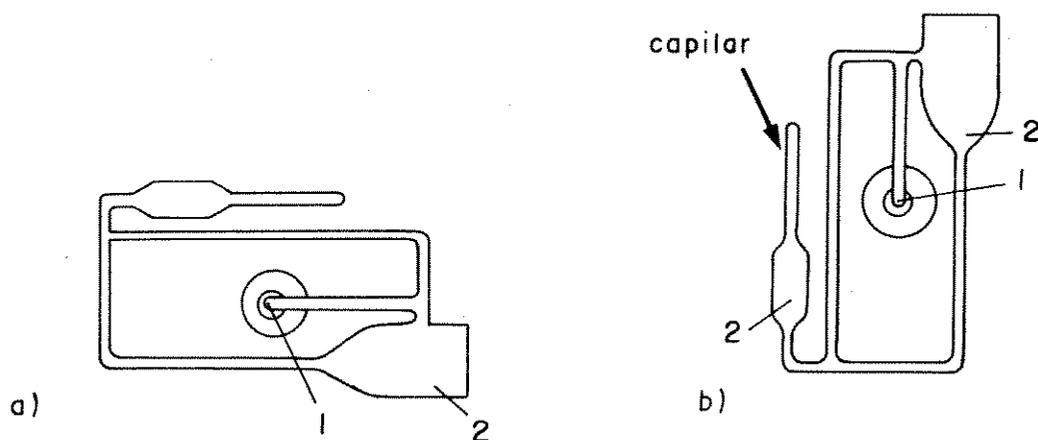


Fig.2.9 - Medidor de pressão do tipo Vacustart. A-posição inicial, B - Posição de medida.

O fator ($\rho g A/V$) é uma constante para cada equipamento.

É preciso ter cuidado especial quando se trabalha com vapores em manômetros de McLeod. Durante o estágio de compressão do capilar os vapores podem se condensar, o que resulta em valores errôneos na leitura da pressão.

Com esta calibração feita para muitos pontos, levamos o nosso medidor para o RIE.

A curva de calibração obtida (fig.2.10) é coerente com os resultados de corrosões feitas, dada a alta taxa de corrosão obtida.

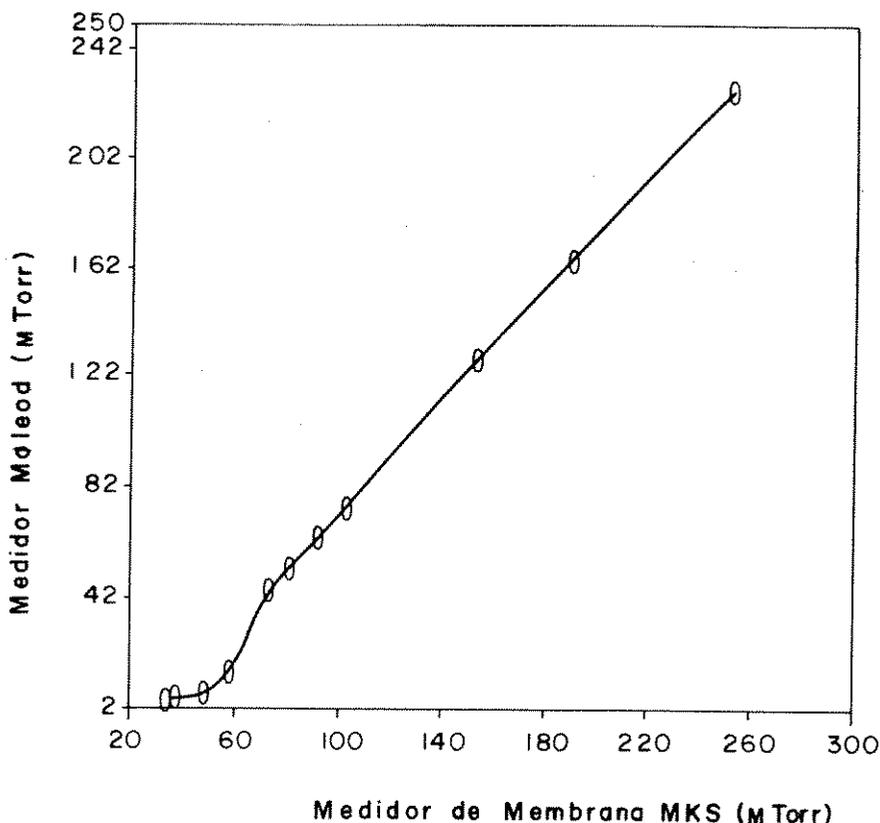


Fig. 2.10- Curva de calibração do medidor de pressão(Medidor McLeod X Medidor de Membrana)

2.4.3 - Fluxo de Gases

a)- No sistema original com fluxômetro eletrônico da Matheson:

O teste foi feito para aferir as medidas obtidas pelo fluxômetro usado, tendo em vista que ele tem um escala linear, cujo fundo de escala é de 2000sccm e a menor divisão é de 50sccm.

A fim de torná-lo mais sensível substituímos o orifício de passagem do gás por um de aproximadamente 0,5mm, o que pelos nossos calculos reduz em 10 vezes a área de passagem.

Para esta calibração usou-se uma fórmula muito conhecida dos gases, $PV=N_0 nKT$, ou seja

$$n = \frac{P V}{N_0 k T}$$



onde: P- Pressão
 V- Volume da câmara
 N_0 - Número de Avogrado
 k- Constante
 T- Tempo
 n- Número de moles

A primeira teste foi feito para o Oxigênio.

$K = 1.03 \times 10^{-22}$ Torr.l/ K. (constante)
 T= 297 K (temperatura)
 P1= 87 mTorr (primeira pressão)
 P2= 2 Torr (segunda pressão)
 t= 17.5 seg (tempo)
 V= 13 l (volume da câmara)
 $N_0 = 6 \times 10^{23}$ (N de Avogrado)
 n= (N de moles)

Massa atômica do Oxigênio = 32g

Densidade do $O_2 = 1,429$ g/l

Fluxo medido= 100 sccm

$$n_1 = \frac{P_1 V}{N_0 k T} \quad n_1 = 6.162 \times 10^{-5}$$

Em seguida achamos m_1 e v_1 com régra de três simples:

$$1 \text{ Mol} \frac{\quad\quad\quad}{\quad\quad\quad} 32 \text{ g } (O_2)$$

$$6.162 \times 10^{-5} \frac{\quad\quad\quad}{\quad\quad\quad} m_1$$

$$m_1 = 1.972 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$1,429 \text{ g} \frac{\quad\quad\quad}{\quad\quad\quad} 1000 \text{ cm}^3$$

$$1.972 \times 10^{-3} \text{ g} \frac{\quad\quad\quad}{\quad\quad\quad} v_1$$

$$v_1 = 1,38 \text{ cm}^3$$

$$n_2 = \frac{P_2 V}{N_0 k T} \quad n_2 = 1.4165 \times 10^{-3}$$

Com o mesmo processo tiramos m_2 e v_2

$$m_2 = 0,0453 \text{ g}$$

$$v_2 = 31,7 \text{ cm}^3$$

$$\text{FLUXO} = 1.7326 \text{ cm}^3 / \text{seg}$$

$$\text{FLUXO} = \frac{v_2 - v_1}{t}$$

ou 103,9 sccm

Fazendo as mesmas contas para o SF_6 , obtivemos:

$$\text{Massa atômica do } \text{SF}_6 = 146 \text{ g}$$

$$\text{Densidade do } \text{SF}_6 = 6,516 \text{ g/l}$$

$$m_1 = 8,9965 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$m_2 = 2,0681 \times 10^{-1} \text{ g}$$

$$v_1 = 1,3807 \text{ cm}^3$$

$$v_2 = 31,739 \text{ cm}^3$$

$$\text{FLUXO} = 1.7348 \text{ cm}^3 / \text{seg}$$

ou 104,08 sccm

Notamos com isto que a diferença obtida é bastante aceitável.

Para se achar o fator de correção do gás, visto que o fluxômetro está calibrado para N_2 foi preciso usar a fórmula [2.7]:

$$C_x = \frac{.3106 S}{P_x C_{p_x}}$$

Onde:

C_x = Fator de correção do gás x

P_x = Densidade do gás x para 0°C g/litro

Cp_x = Calor específico do gás x, cal/g°C

.3106 = PCp para N₂ à 0°C

S = Fator de correção de estrutura molecular

Estrutura Molecular	S
Gases Monoatomicos	1.030
Gases Diatomicos	1.000
Gases Triatomicos	0.941
Gases Polyatomicos	0.880

Usando esta fórmula montamos uma tabela de correção de fluxo para diversos gases de processo (Tabela 2.1).

Tabela 2.5.3 - Equivalencia dos fluxos

Ar(1.37)	O ₂ (1)	H ₂ (1)	CF ₄ (.42)	SF ₆ (.26)	CCl ₂ F ₂ (.35)	CH ₄ (.72)
6,85	5	5	2,1	1,3	1,75	3,6
13,7	10	10	4,2	2,6	3,5	7,2
27,4	20	20	8,4	5,2	7	14,4
41,1	30	30	12,6	7,8	10,5	21,6
54,8	40	40	16,8	10,8	14	28,8
68,5	50	50	21	13	17,5	36
82,2	60	60	25,2	15,6	21	43,2
95,9	70	70	29,4	18,2	24,5	50,4
109,6	80	80	33,6	20,8	28	57,6
123,3	90	90	37,8	23,4	31,5	64,8
137	100	100	42	26	35	72
150,7	110	110	46,2	28,6	38,5	79,2
164,4	120	120	50,4	31,2	42	86,4
178,1	130	130	54,6	33,8	45,5	93,6
191,8	140	140	58,8	36,4	49	100,8
205,5	150	150	63	39	52,5	108
219,3	160	160	67,2	41,6	56	115,2
232,9	170	170	71,4	44,2	59,6	122,4
246,6	180	180	75,6	46,8	63	129,6
260,3	190	190	79,8	49,4	66,5	136,8
274	200	200	84	52	70	144
287,7	210	210	88,2	54,2	73,5	151,2
301,4	220	220	92,4	57,2	77	158,4
315,1	230	230	96,6	59,8	80,5	165,6
328,8	240	240	100,8	62,4	84	172,8

Ar(1.37)	O ₂ (1)	H ₂ (1)	CF ₄ (.42)	SF ₆ (.26)	CCl ₂ F ₂ (.35)	CH ₄ (.72)
342,5	250	250	105	65	87,5	180
356,2	260	260	109,8	67,6	91	187,2
369,9	270	270	113,4	70,2	94,5	194,4
383,6	280	280	117,6	72,8	98	201,6
397,3	290	290	121,8	75,4	101,5	208,8
411	300	300	126	78	105	216

b- No sistema com controladores de fluxo de massa, melhorou bastante a precisão, pois desta forma cada gás tem um controle individual, calibrado para ele mesmo.

2.4.4 - Espectroscopia de Emissão Óptica

A espectroscopia de emissão óptica é uma técnica largamente usada para a caracterização de um sistema, que emite luz característica, provinda de gases conhecidos ou de materiais sendo atacados por feixe de íons. Esta técnica é muito usada também para detecção de ponto final da corrosão por plasma, onde se fixa um comprimento de onda (geralmente de um radical produzido pelo sistema) e se monitora as variações ocorridas. Pode ser usado também a emissão de alguns sub-produtos da corrosão, e se monitora as variações ocorridas. No caso de se usar CF₄ ou SF₆ para corrosão de silício ou tungstênio, monitora-se o aumento, dos radicais de fluor livres no plasma.

A sensibilidade deste método depende de quanto reagente é consumido ou quanto material do filme é atacado por unidade de tempo.

Esta técnica não poderá ser utilizada, se a taxa de corrosão for muito baixa ou se a quantidade de material a ser atacado for muito pequena, pois não teremos sensibilidade suficiente para detetar o ponto final.

Uma tabela mostrando os materiais, os gases, os materiais monitorados e o comprimento de onda na qual se fixa o espectrômetro é mostrada na tabela 2.2 [2.3].

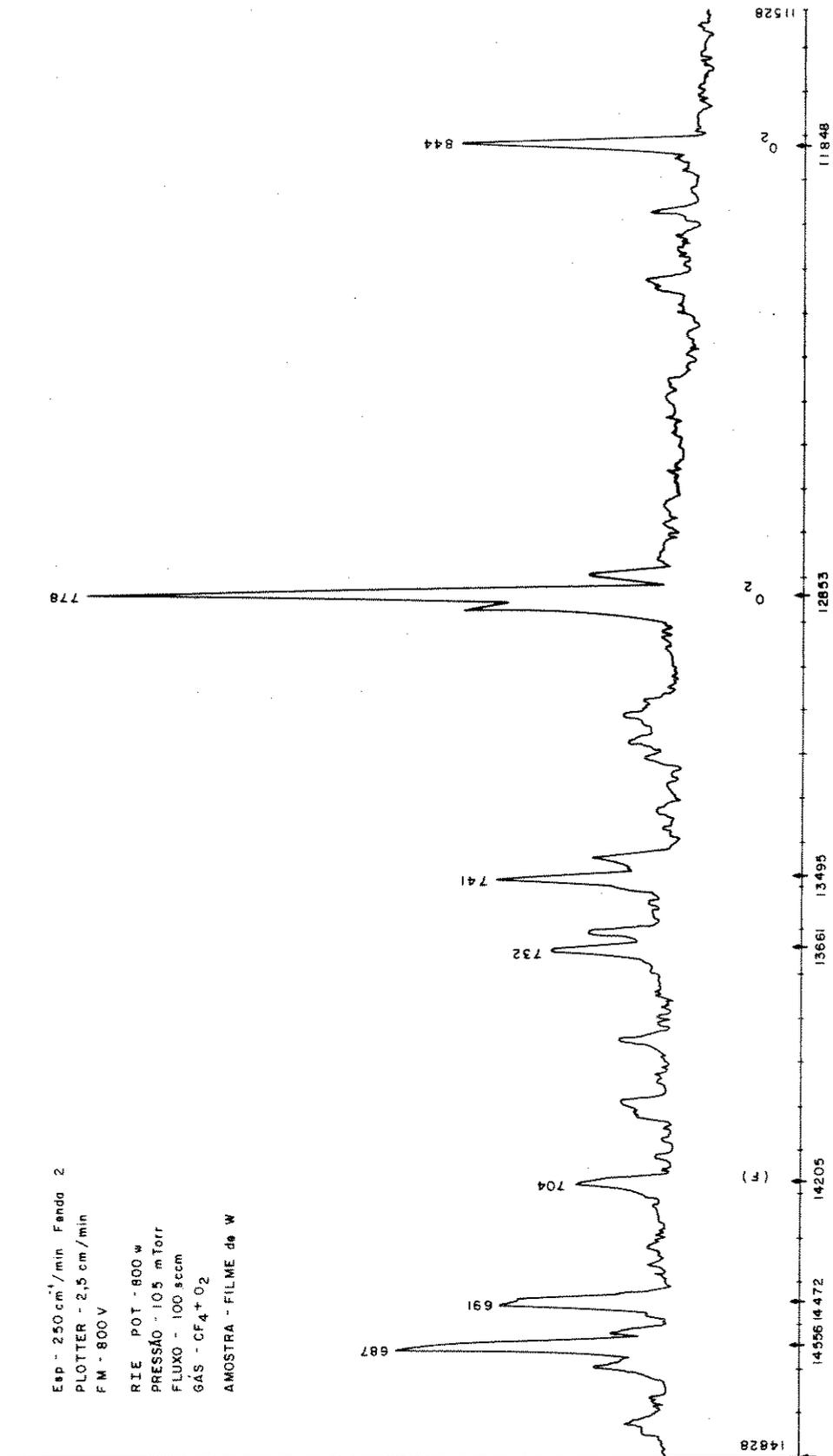


Fig.2.11- Espectro de emissão obtido de um plasma de CF₄+O₂(8%)(Os comprimentos de onda indicados já incluem a correção de desvio de calibração do sistema).

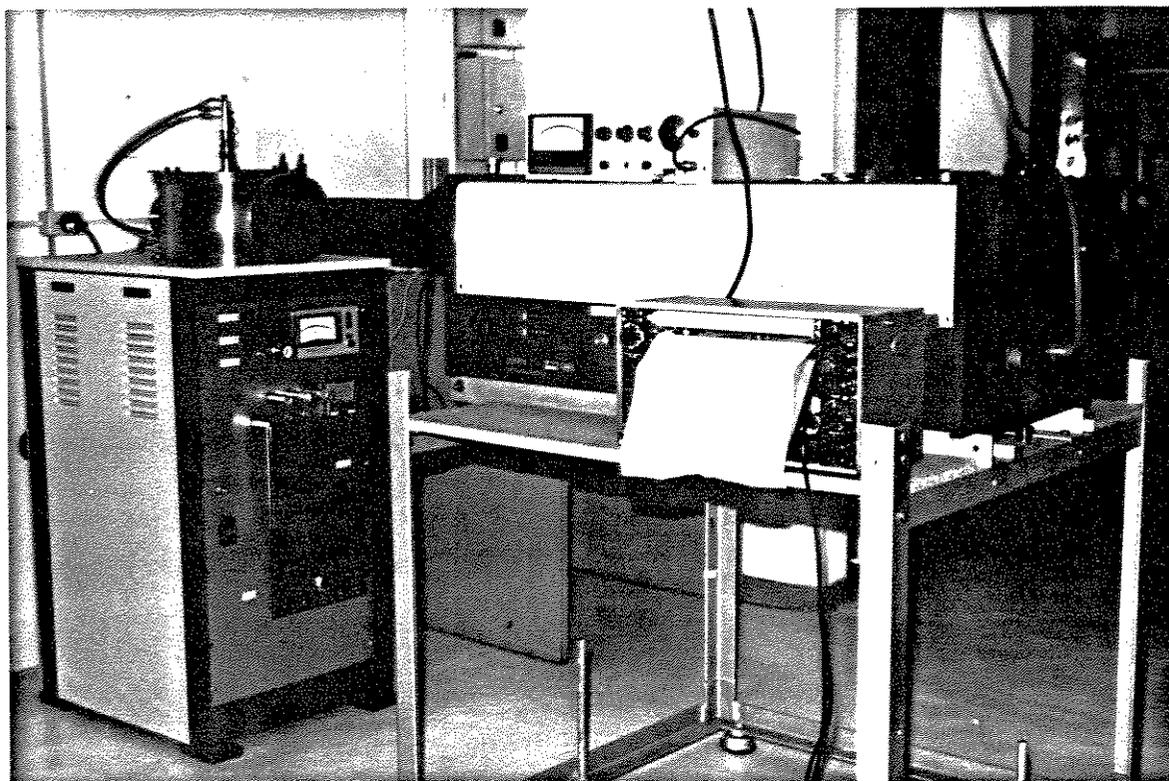


Fig.2.12- Fotografia da montagem para a espectroscopia óptica

Nós utilizamos um espectrômetro "SPEX" modelo 1701, com grade de 1200 linhas/polegada, uma fotomultiplicadora da marca "RCA" modelo C31034, cuja tensão de alimentação máxima é de 1KV, uma fonte de alta tensão com controle de corrente, da marca "PHILIPS" modelo PE1533 para alimentar esta fotomultiplicadora e um eletrômetro marca "KEITHLEY INSTRUMENTS" modelo 610C. Para registrar os resultados usamos um traçador marca "HP" modelo 7100BR.

Inicialmente conferimos a calibração do espectrômetro, usando para isto uma lâmpada de Néonio, fenda de 0,5mm, escala do espectrometro $1 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-1}/\text{minuto}$ e fotomultiplicadora polarizada com 800V. Obtivemos uma diferença que varia de 19,54 a 21,38 nm a mais na leitura no espectrômetro, veja a tabela 2.3. Assim podemos concluir que o espectrofotômetro está descalibrado com um desvio médio de 20.5 nm.

Tabela 2.2 - Raias de emissão comumente monitoradas na dacapagem de diversos materiais [2.3]

Material	Gás Reativo	Produto Monitorado	Comprimento de onda(nm)
Silício	CF_4/O_2 , SF_6	F (radical)	704
	CF_4/O_2 , SF_6	SiF(produto)	440;777
	Cl_2 ; CCl_4	SiCl(produto)	287
Si_3N_4	CF_4/O_2	N_2 (produto)	337
	CF_4/O_2	CN(produto)	387
	CF_4/O_2	N (produto)	674
Resiste	O_2	O (radical)	777;843
	O_2	OH(produto)	309
	O_2	H (produto)	656
	O_2	CO(produto)	484
SiO_2	CHF_3	CO(produto)	484
W	CF_4/O_2 ; SF_6 ; CF_4	F (radical)	704
Al	CCl_4 ; Cl_2 ; BCl_3	Al (produto)	391;394;396
	CCl_4 ; Cl_2 ; BCl_3	AlCl(produto)	261

Tabela 2.3- Detecção da luz de uma lâmpada de Neônio [2.12].

Leitura no espectrômetro(nm)	L.Nêonio(nm)	Diferença
481,97	462,43	19,54
486,10	467,12	18,98
844,78	823,68	21,10
856,06	834,68	21,38
861,86	840,92	20,94
902,68	881,94	20,76

Na Fig.2.11 apresentamos o espectro de emissão obtido, usando um plasma de CF_4+O_2 . Este gráfico nos mostra a posição dos picos de fluor (F) e dos picos do O_2 , já corrigidos.

Para obter a detecção do ponto final, usamos o mesmo gás, colocando na câmara de reações, lâminas de silício com um filme de 5000\AA de tungstênio. Fixamos o espectrômetro em 704nm , ou seja 14205cm^{-1} , já corrigido. Obtivemos uma curva que cresce no primeiro instante, que significa uma alta produção de F livres, logo em seguida existe uma queda neste nível de F pois começam as reações com o filme e o bombardeamento da superfície aumentando a taxa de corrosão. Após alguns instantes novamente o nível de F começa a subir, como podemos observar na fig.2.13, isto porque está acabando o filme de tungstênio, logo começam a sobrar mais radicais (F) na câmara e com isto vai-se detetando maior sinal na fotomultiplicadora, até que estabiliza em um patamar. Este estabilizar significa o fim do tungstênio. As amostras usadas são substratos de Si, com um óxido crescido por RP/RTCVD com 2000\AA e um filme de 5000\AA de W depositado por "Sputtering". Esta experiência foi feita variando o tamanho da amostra. Na fig.2.13a, vemos o perfil de intensidade para uma amostra cujo tamanho é a metade de uma lâmina de 2" de diâmetro. Na fig.2.13b, é mostrado o perfil de intensidade para uma lâmina de 1/4 de uma lâmina de 2". Na fig.2.13c, é mostrado o perfil de intensidade para uma amostra de dimensão de 1 cm^2 , contendo um padrão de linhas de $13\mu\text{m}$, com espaçamento de $250\mu\text{m}$ entre elas. Notamos que é perfeitamente possível trabalharmos com amostras pequenas conseguindo boa definição na detecção do ponto final.

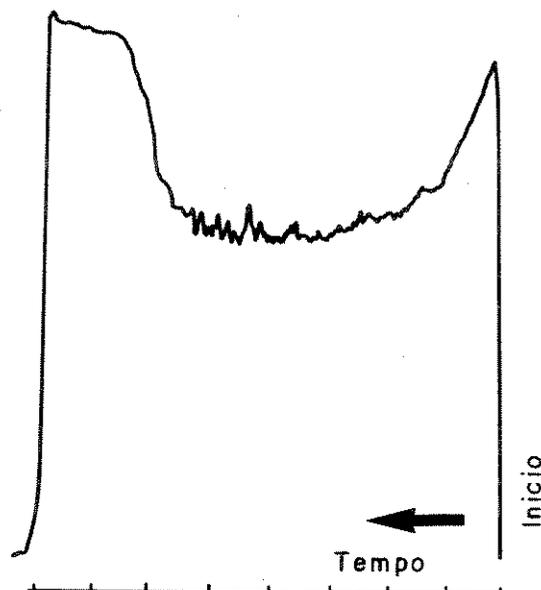


Fig.2.13a - Perfil de intensidade para amostras de 1/2 lâmina de 2", com filme de 5000\AA de tungstênio.

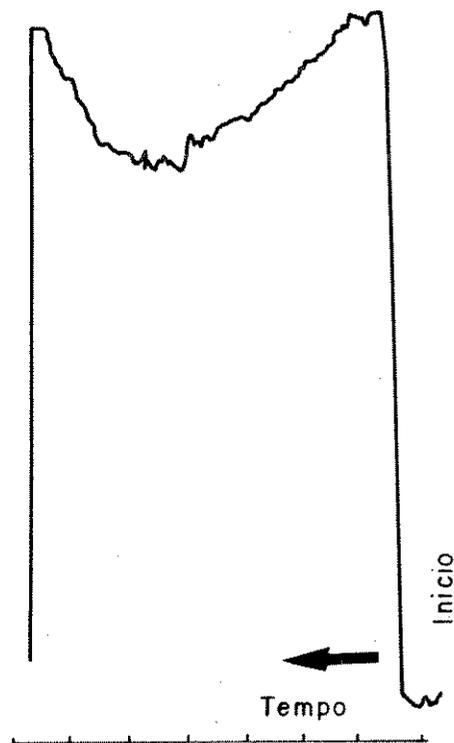


Fig.2.13b - Perfil de intensidade para amostras de 1/4 de lâmina de 2", com filme de 5000Å de tungstênio.

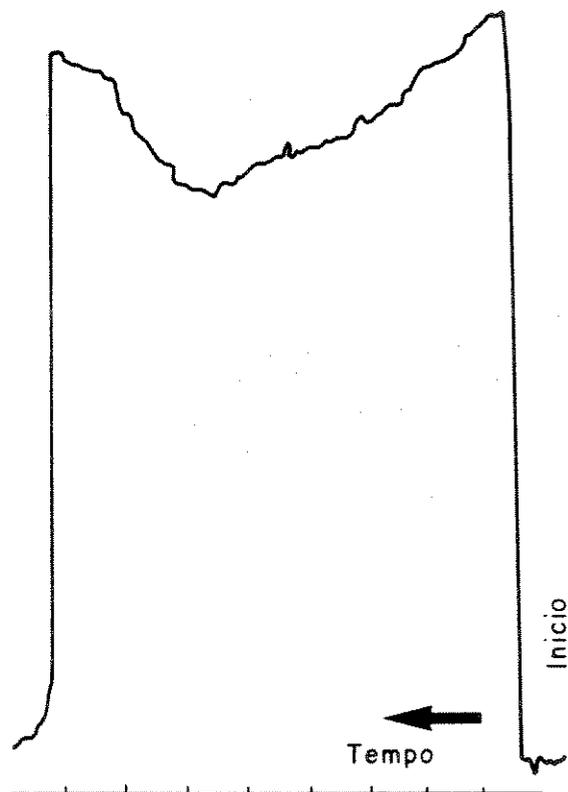


Fig.2.13c - Perfil de intensidade em lâmina de 1 cm², com linhas de 13µm X 250µm de espaçamento entre as linhas fotogravadas e filme de 5000Å de tungstênio.

2.4.5 - Teste de vazamento da câmara

Para este teste liga-se o sistema de vácuo deixando que este bombeie a câmara até atingir a pressão mínima. Em seguida fecha-se a válvula borboleta que isola a câmara do sistema, anotando a pressão mínima, pressão máxima e o tempo.

Obtivemos:

$$P_{\min.} = 6 \times 10^{-3} \text{Torr}$$

$$P_{\max.} = 109 \times 10^{-3} \text{Torr}$$

$$\Delta t = 1,30 \text{ horas} = 5400 \text{ seg}$$

$$\Delta p = 103 \times 10^{-3} \text{Torr} = 0,137 \times 10^{-3} \text{bar}$$

$$\text{Volume} = 13 \text{ l}$$

$$V_a = \frac{\Delta p \cdot \text{Volume}}{\Delta t}$$

$$V_a = \frac{13,7 \times 10^{-5} \times 13}{5400} = 0,33 \times 10^{-6} \text{ bar.l/s}$$

Repetimos este calculo para 2 e 6 horas obtendo os mesmo resultado, confirmando assim as medidas e o calculo executado.

Este resultado é bom comparado com equipamentos comerciais que é da ordem de 10^{-5} bar.l/s.[2.6]

2.4.6 - Medida da evolução da temperatura na amostra

Realizamos a corrosão de uma amostra de SiO_2/Si com gravação de linhas de fotorresiste, usando as seguintes condições: potência de 150W ($1,222\text{W}/\text{cm}^2$), pressão de 100mTorr e fluxo de O_2 de 100sccm. Na fig.2.14 apresentamos uma fotografia tirada por SEM. Esta foto mostra que houve uma forte degradação do fotorresiste. Suspeitamos que esta degradação pudesse ter origem na elevação da temperatura da amostra durante o processo. Tal fenomeno é reportado por Brausseau [2.7] para uma corrosão em RIE magnetron de 13,56MHz, com uma potência de $0,7\text{W}/\text{cm}^2$, pressão de 1mTorr e fluxo de 30sccm de Oxigênio. Neste caso uma temperatura de aproximadamente 300°C foi alcançada.

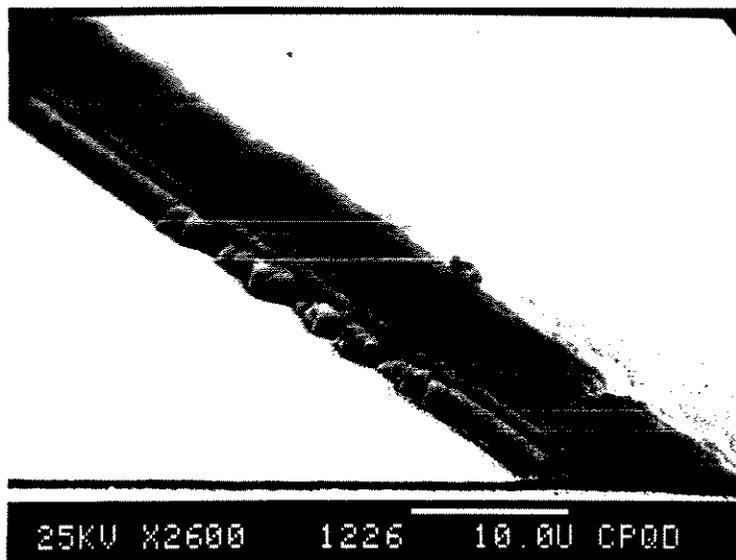


Fig.2.14 - Foto no SEM da superfície de uma amostra atacada. Condições: potência-150W, Fluxo de O_2 -100sccm e Pressão-100mTorr

Optamos então por realizar um estudo da variação da temperatura em função da potência de um plasma de Oxigênio.

Assim, para o nosso estudo usamos as mesmas condições que as reportadas em [2.7], ou seja, plasma de Oxigênio, variando-se a potência de 0,407 a $1,222W/cm^2$ e o tempo de 0 a 5 minutos. Existindo uma diferença quanto a frequência de RF, que no nosso caso é de 500KHz, além das diferenças de equipamento e uso de magnetron.

Monitoramos a temperatura da lâmina submetida ao plasma através de um termopar na sua superfície com graxa de vácuo e protegido por um papel de alumínio.

No início do processo, a temperatura do catodo está em $12^\circ C$. Usando-se a potência de $0,407 W/cm^2$ (ver tabela 2.4), a temperatura na superfície da lâmina estabiliza em 2 minutos em $98^\circ C$. Com o mesmo tempo, as temperaturas estabilizam em $140^\circ C$ para $0,815W/cm^2$ e $160^\circ C$ para $1,222W/cm^2$ (Fig.2.15, pontos vazios).

Tabela 2.4 - Equivalência de potência nominal e potência por área

Potência (W)	Potência/área (W/cm ²)
25	0,2037
50	0,407
75	0,611
100	0,815
125	1,019
150	1,222
175	1,426
200	1,63

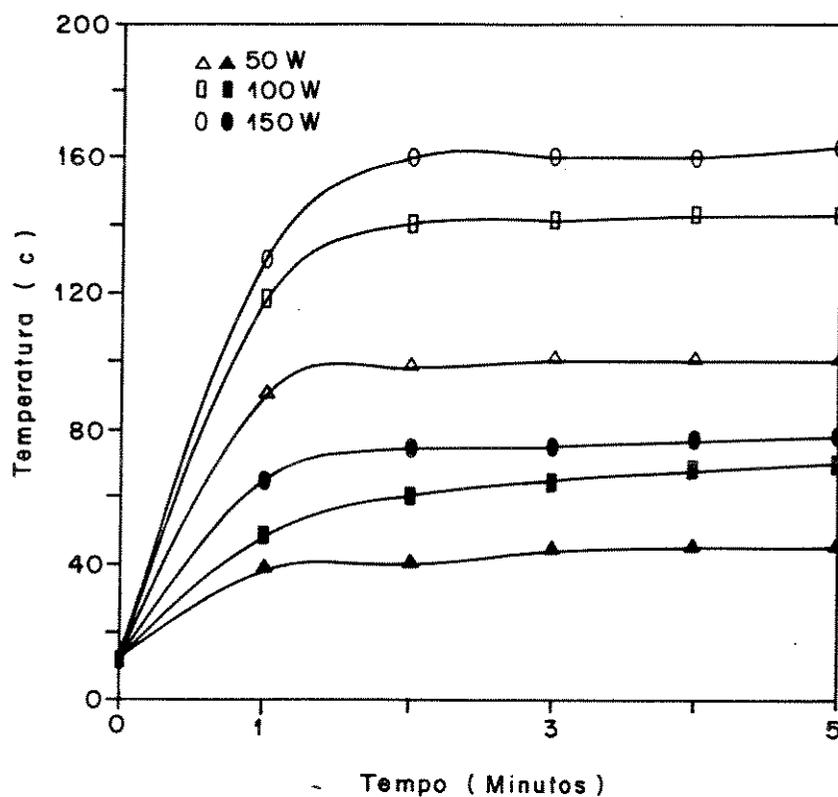


Fig.2.15- Curva da evolução da temperatura em lâmina de Si, submetida a plasma de O₂, 100mTorr, 30sccm e 3 níveis de potência indicada, Pontos vazios- lâmina limpa, Pontos cheios- lâmina com pasta de vácuo .

Este problema pode ser contornado se melhorarmos o contato térmico entre a amostra e o eletrodo. Mostramos isto pelo uso de pasta de vácuo na

interface entre a lâmina e o catodo. Esta pasta é removida facilmente com solventes orgânicos, especialmente com acetona. Desta maneira repetimos o experimento, obtendo como temperatura máxima em 150W ou $1,222\text{W}/\text{cm}^2$ de aproximadamente 70°C . (Fig.2.15, pontos cheios).

Concluímos que a melhora do contato térmico entre a lâmina e o eletrodo é importante para limitar o aumento da temperatura da lâmina. Uma alternativa relativamente simples é o uso de graxa de vácuo. Este por sua vez pode ser uma fonte adicional de formação de polímero durante o processo de corrosão por plasma (foi observado este efeito). Uma solução mais limpa pode ser o uso de grampos eletrostáticos [2.7 e 2.13]. Esta última solução tem, no entanto uma confecção mais complexa devido às tensões extras necessárias e que devem estar isoladas do sinal de RF do plasma.

2.4.7 - Tensão de auto-polarização DC

Como citamos no item 1.4.2, cria-se uma tensão de auto-polarização no catodo. Ela se ajusta de tal forma que durante cada ciclo do sinal RF haja um equilíbrio entre as cargas negativas (elétrons) e positivas (íons) chegando ao catodo. Seu valor dependerá dos parâmetros macroscópicos do plasma, como a potência RF e a pressão do gás. Ela depende no entanto também dos gases utilizados. Por exemplo, um gás mais eletronegativo reduz o número de elétrons livres no sistema, reduzindo a corrente de elétrons. Conseqüentemente teremos uma tensão de auto-polarização menor em módulo, para reduzir também a corrente de íons positivos.

Nas figuras 2.16 e 2.17 apresentamos os valores de tensão DC no catodo obtido para plasmas de SF_6 e $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ (8%) versus potência de RF e pressão, respectivamente. Os fluxos dos gases foram de 100sccm. Não detectamos variação da tensão com os fluxos, na faixa em torno dos valores usados (25sccm para SF_6 e 40sccm para $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ (8%)). A menor tensão de auto-polarização obtida para o gás SF_6 é atribuído ao fato da molécula SF_6 ser mais eletronegativa que a CF_4 [2.14]. A queda da tensão com a pressão deve-se à redução do livre caminho médio das espécies, reduzindo a energia média das mesmas. Adicionalmente, o número de elétrons é reduzido devido ao aumento dos processos de recombinação de elétrons a alta pressão. Estes 2 fatos fazem com que a tensão de auto-polarização menor em módulo seja suficiente para repelir os elétrons, ou em outras palavras, para igualar a corrente de elétrons e de íons durante o ciclo do sinal RF.

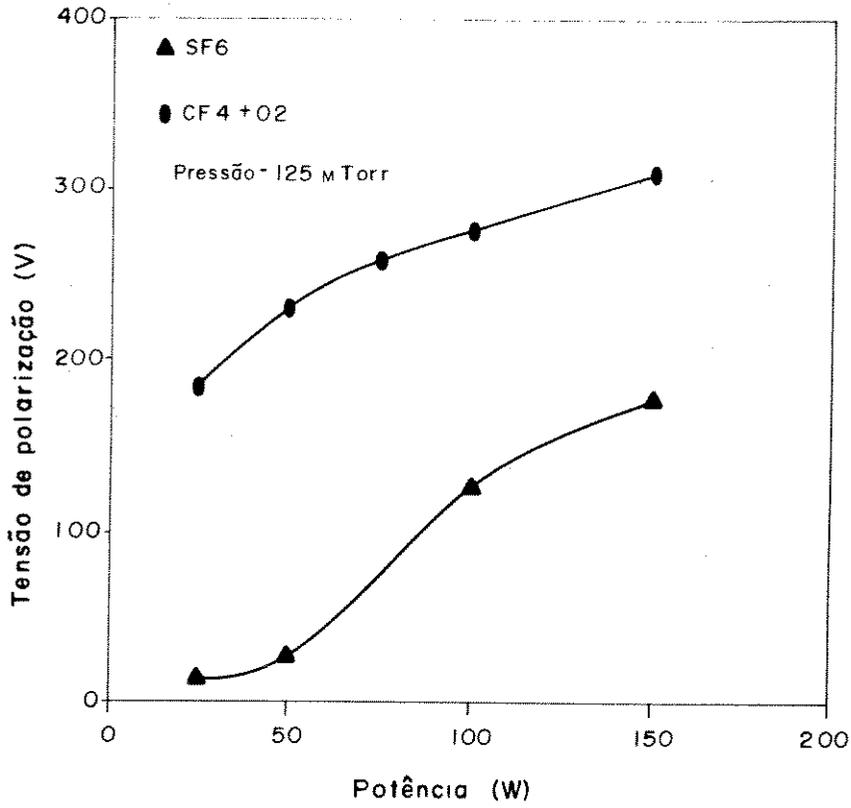


Figura 2.16- Tensão de auto-polarização DC X Potência

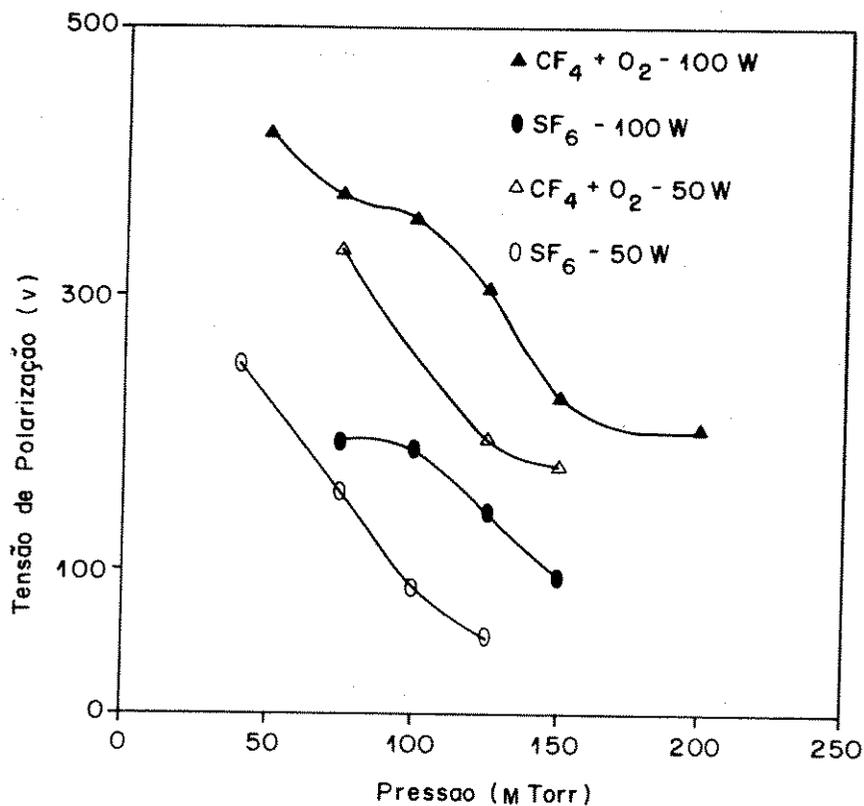


Figura 2.17- Tensão de auto-polarização DC X Pressão

2.6 - CONCLUSÕES

Neste capítulo descrevemos detalhadamente as partes mecânicas e elétricas que compõe o sistema RIE.

Nosso sistema foi montado de maneira econômica, tendo em vista que grande parte dos componentes deste sistema é nacional e sendo muitos fabricados para outros fins, como por exemplo a válvula borboleta que é feita para altas pressões e a bomba de vácuo "Roots" que na verdade é um soprador industrial e não uma bomba de vácuo. Na parte elétrica, o gerador de potência de RF foi montado com sucesso, com o qual obtivemos ótimas características no plasma. Os instrumentos de medida, como o medidor de tensão, corrente e potência e o medidor de pressão também foram montados e calibrados.

O valor conseguido nos testes de vazamento da câmara foram muito bons, melhores que equipamentos de alto vácuo usados para deposição por "Sputtering".

Nos testes com o sistema vimos que seu funcionamento é compatível com sistemas do tipo RIE comercial, na qual se usa potência de RF com alta frequência.

Montamos um sistema da detecção de ponto final de corrosões, como sensibilidade suficiente para trabalharmos com amostras fotogravadas de até 1cm^2 .

2.7 - REFERÊNCIAS

- 2.1 - Notas de Aula do Curso "Tecnologia de Vácuo" - SBV - 1991.
- 2.2 - Apostila "Ciência e tecnologia de Vácuo" - IFGW-UNICAMP- M.A. BICA de Moraes, G.M. Gualberto e R.A.Douglas.
- 2.3 - Manual de Sopradores Industriais - O'mell do Brasil S.A.
- 2.4 - Handbook of Processing Technology - Cap.8- "Reactive Ion Etching" - G.S. Oehrlein - pag. 196.
- 2.5 - Edward High Vacuum International- manual "SPUTTER COATER MODEL ESM100".
- 2.6 - Manual dos Controladores de Fluxo de Massa da MKS.
- 2.7 - Comunicação privada Dr.Guy Brasseur - IMEC - Belgica - SBMICRO-92.
- 2.8 - Manual Leybold-Heraus "bombas mecânicas".
- 2.9 - A.C. Seabra - "Construção e caracterização de um equipamento de corrosão por plasma e sua aplicação na corrosão de SiO_2 "- Dissertação de Mestrado apresentada na Poli- USP - 1990.
- 2.10 - M. Bonfim e A.C.S. Ramos-"Construção de um gerador de RF para um plasma RIE"- SBmicro-1991.
- 2.11 - R. Toshinori Yoshioka- "Decapagem de fotorresiste por plasma de O_2 e SF_6 e a sua aplicação de "air bridges"- Tese de Mestrado apresentada na FEE- UNICAMP- 1992.

- 2.12 - M.J.C. Bonfim, J.W. Swart, C.E.M. Velasco, J.H. Okura- "A Low Frequency Remote Plasma Rapid Thermal CVD System with Face Down Electrostatic Clamp Wafer Holder" - Materials Research Society - Symposium Proceedings - Vol 303 - April 1993.
- 2.13 - Edward High Vacuum International - Manual-"Superpump Vacuum System"

CAPÍTULO 3

DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO DE CORROSÃO DE FOTORRESISTE E TUNGSTÊNIO

3.1 - INTRODUÇÃO

Metais refratários como W, Mo e Ti estão tendo uma aplicação cada vez mais freqüente na fabricação de circuitos integrados, como materiais de interconexões, preenchimento de vias de contato e portas de transistores de efeito de campo, devido às suas características de alta condutividade, baixa resistência de contato, alto ponto de fusão e alta resistência à eletromigração. Particularmente o W tem se destacado pela possibilidade da sua deposição por técnica de CVD, incluindo de forma seletiva [3.1 - 3.3].

Por outro lado, o processo de corrosão de filmes finos por íon reativo (RIE) tornou-se indispensável na medida em que as dimensões horizontais e verticais dos dispositivos diminuíram. Foi demonstrado que o W pode ser atacado por átomos de F produzidos em plasmas de gases fluorados [3.4 - 3.6].

Neste capítulo, mostraremos a caracterização do nosso sistema RIE, que opera em frequência de 500KHz, pela sua aplicação na corrosão de filmes de W e de Fotorresiste depositados sobre substratos de Si e GaAs. São apresentados os resultados da taxa de corrosão de W e fotorresiste em plasma de SF_6 e $CF_4+8\%O_2$ em função da pressão e potência de RF e análise dos defeitos de superfície dos substratos de GaAs causados pela corrosão, realizada pelas técnicas SEM, espectroscopia Raman e espalhamento de luz.

3.2 - MEDIDAS DE TAXAS DE ATAQUE

3.2.1- Para fotorresiste

Com o objetivo de padronizar o processo de corrosão decidimos preparar um lote grande de amostras, de uma só vez, evitando que houvesse diferença entre uma preparação e outra devido a umidade do ar e temperatura no processo de cura do fotorresiste.

3.2.1.1 - Preparação das amostras

As amostras usadas para a obtenção da taxa de corrosão de fotorresiste, foram lâminas de silício de 2 polegadas, com um filme de fotorresiste AZ1350J de $1,5\mu\text{m}$, logo após, um tratamento térmico de 30 minutos à 90°C . Para medidas da espessura deste filme usamos um aparelho chamado "Rudolph/FTM", que mede esta por interferometria, sem destruir a amostra, usando o índice de refração do filme, fornecido ao aparelho, e padrões de medidas internos. O campo medido é de aproximadamente $2 \times 4 \text{ mm}$. Foram medidos 8 pontos em cada lâmina.

3.2.1.2- Variando a potência

Em primeiro lugar foi caracterizada a taxa de corrosão do fotorresiste, com os gases disponíveis, que são SF_6 e $\text{CF}_4 + 8\%$ de O_2 . A pressão escolhida foi 125mTorr e fluxo 25sccm, para o SF_6 e 40sccm, para o $\text{CF}_4 + \text{O}_2$. A potência foi variada entre 50 e 150W. As curvas de taxa de corrosão obtidas podem ser vistas na fig. 3.1, onde podemos observar um crescimento com o aumento da potência para ambos os gases. Este crescimento é igual até 100W e acima disto o $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ continua um crescimento linear, enquanto para SF_6 a taxa começa a crescer muito mais. Isto pode ser atribuído à maior produção de fluor livre para o gás SF_6 e ao aumento da tensão de autopolarização com a potência (este já é significativo para toda a faixa de potência no caso de $\text{CF}_4 + \text{O}_2$, ver Fig. 2.16)

3.2.1.3 - Variando a pressão

Para esta caracterização usamos a mesma preparação de amostras do item 3.2.1.1. Os fluxos usados foram os mesmos do item acima, a potência de RF foi fixada em 50W e variamos a pressão entre 50 e 150mTorr. Nesta faixa de pressão não houve grandes variações na taxa de corrosão, de 100 à 200nm/min. Os resultados são mostrados na figura 3.2. As curvas de ambos os gases passaram por um ponto de máximo, no caso do SF_6 este máximo está por volta de 75mTorr e no caso do $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ esta por volta de 125mTorr.

Em baixas pressões a tensão de auto-polarização é alta, facilitando a fragmentação dos gases e o bombardeamento iônico, aumentando assim a taxa de corrosão com o aumento da densidade das espécies (ou pressão). Para pressões maiores, ocorre uma redução na taxa de geração de fluor livre [3.6] e adicional-

mente ocorre uma redução da tensão de auto-polarização (fig.2.17). Estes dois fatores causam a redução da taxa de corrosão para altas pressões. No caso do gás CF_4+O_2 temos que a tensão de auto-polarização é bem maior (fig. 2.17). Isto pode explicar porque o máximo da taxa de corrosão ocorre a uma pressão maior comparado ao caso SF_6 .

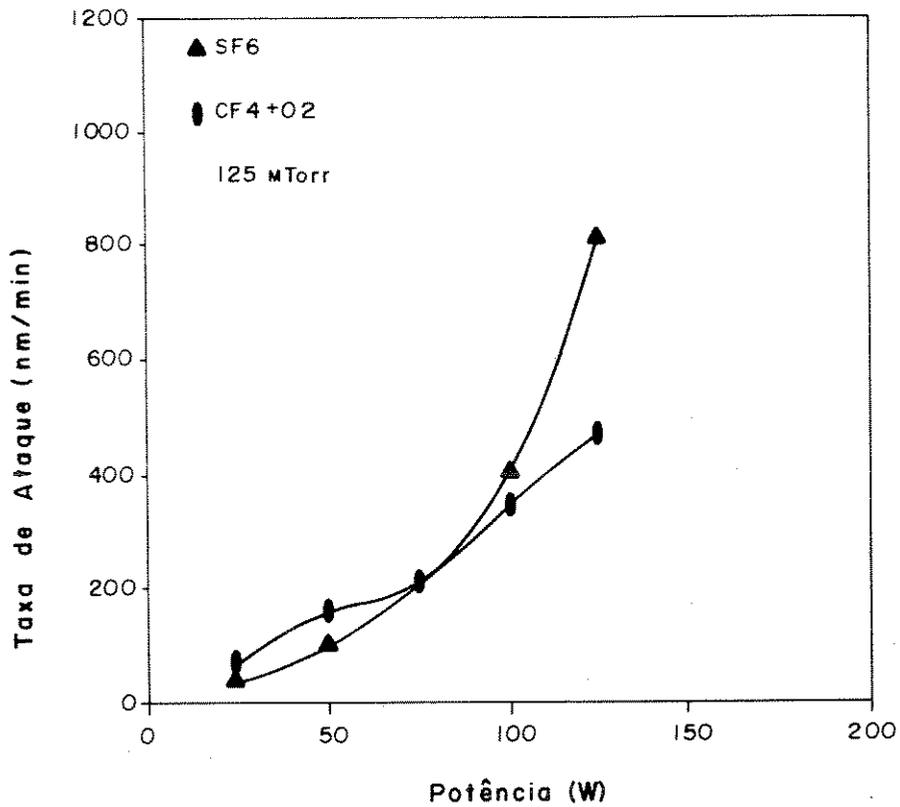


Fig. 3.1 - Taxa de corrosão de Fotorresiste variando-se a potência entre 25 e 125W, mantendo-se constante a pressão 125mTorr e o fluxo de 25sccm para o SF_6 e 40sccm para o CF_4+O_2 .

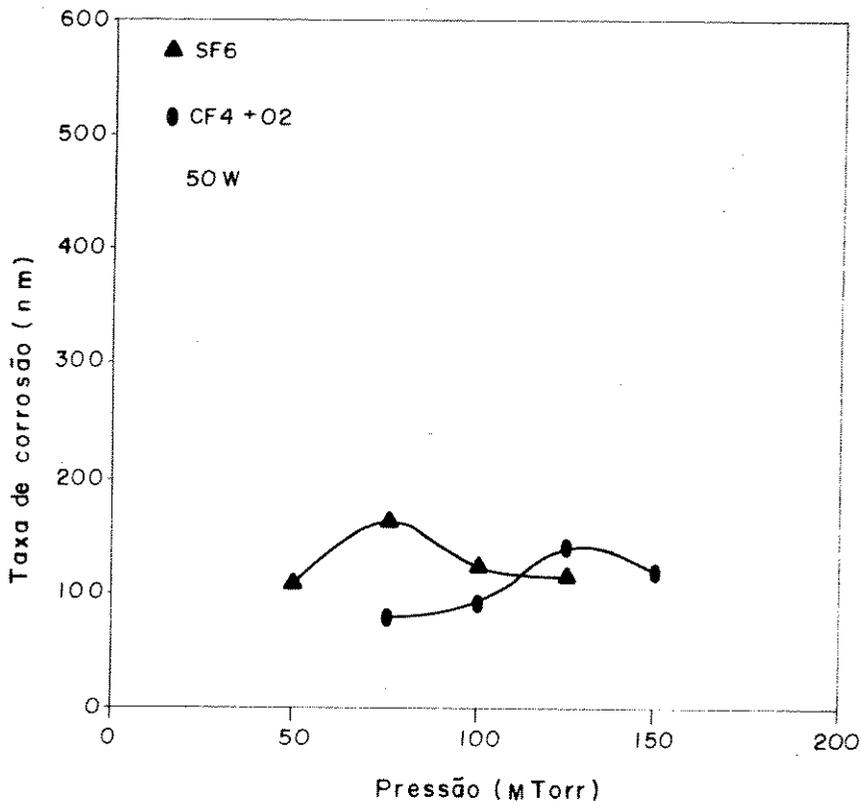


Fig. 3.2 - Taxa de corrosão de fotorresiste, variando-se a pressão entre 50 e 150mTorr, potência de 50W e fluxo de 25sccm para o SF₆ e 40sccm para o CF₄+O₂.

3.2.2 - Para tungstênio

3.2.2.1 - Preparação das amostras

As amostras usadas para a obtenção das taxas de corrosão de tungstênio, foram lâminas de silício de 2 polegadas, por serem de bom tamanho e fácil fotogração com nossa fotoalinhadora.

A limpeza foi a tradicional, com solventes orgânicos (Tricloro, Acetona, Metanol, Isopropanol e Água deionizada) e secagem com Nitrogênio.

Continuando o processo, foi crescido um filme de tungstênio, por sputtering, de 1100nm de espessura. Para isto foi usado um "Sputtering DC magnetron" marca Edward modelo ESM100. As condições deste crescimento foram : potência: 600W, pressão: 2×10^{-2} mbar e tempo: 20 minutos.

Para termos um dado de caracterização deste filme fizemos medidas de resistência de folha, pelo método de 4 pontas, na qual, obtivemos uma resistividade de $45\mu\Omega\cdot\text{cm}$.

Em seguida depositamos uma camada de $1.5\mu\text{m}$ de fotorresiste AZ1350J e fizemos um "pre-bake" de 20 minutos a 90°C .

Dando continuidade, fotografamos um padrão de linhas de larguras de 2,5 a $25\mu\text{m}$. Em seguida realizamos um "pos-bake" de 30 minutos a 120°C .

Para finalizar a preparação, clivamos estas amostras em pedaços de $5\times 5\text{mm}$, tamanho suficiente para todos os teste a fazer.

3.2.2.1 - Variando a potência

Para a obtenção da taxa de corrosão de tungstênio usou-se uma pressão fixa de 125mTorr, fluxo de 40sccm para o CF_4+O_2 e 25sccm para SF_6 . A potência foi variada de 25 a 150W. O gráfico da taxa de corrosão com a potência está mostrado, na fig. 3.3. Observou-se um aumento monotônico da taxa com a potência no caso do SF_6 . Isto explica-se pelo aumento da tensão de aceleração dos íons acelerando as reações e também pelo aumento da geração de radicais livres de flúor com a potência de RF. Este comportamento é também observado no caso do CF_4+O_2 , porém de forma menos intensa. Para potências maiores, ocorre até uma saturação da taxa. Isto pode estar associada à formação de polímero, oriundo de radicais CF_2 do gás e do carbono oriundo do fotorresiste [3.8]. Este é fortemente atacado nestas condições, devido à alta temperatura da amostra (fig.2.14) e alta tensão de polarização (fig.2.16)

3.2.2.2 - Variando a pressão

Estes resultados são mostrados nas curvas da fig. 3.4, onde variamos a pressão de 50 a 150 mTorr e mantivemos fixos a potência em 50W e os fluxos em 25sccm para SF_6 e 40sccm para CF_4+O_2 .

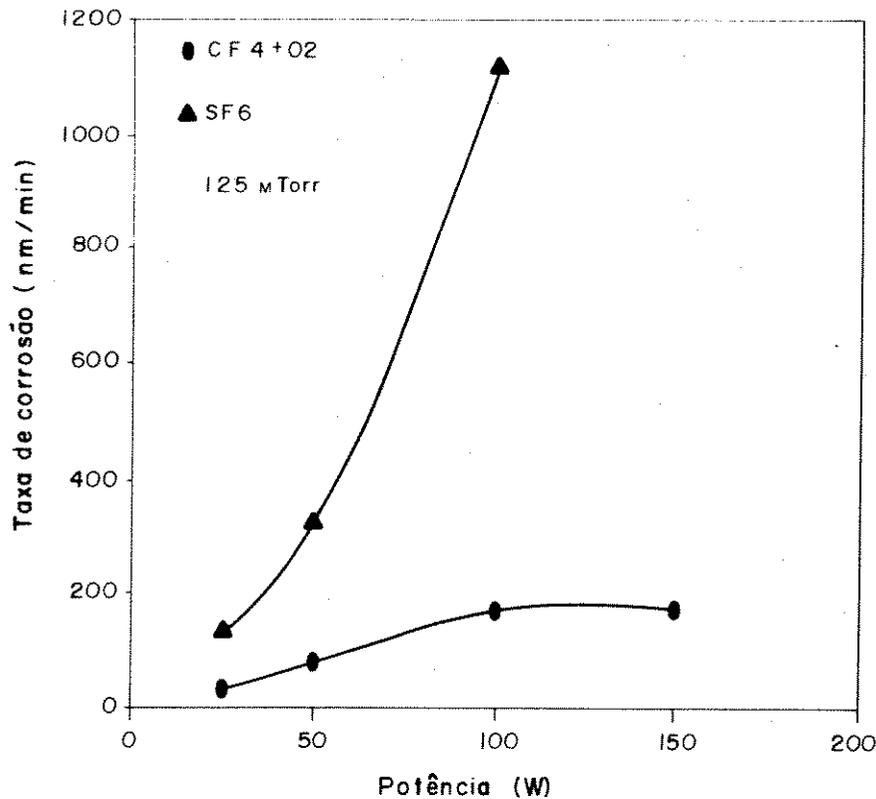


Fig. 3.3- a- Taxa de corrosão de Tungstênio variando-se a potência, mantendo-se contante a pressão em 125 mTorr e o fluxo do SF₆ em 25sccm e CF₄+O₂ em 40sccm.

Para o CF₄+O₂, as taxas neste intervalo oscilam entre 70 e 110nm/min sendo quase constantes e havendo bastante polimerização (observação visual e através de microscópio óptico). Para o SF₆, as taxas são muito maiores, devido à maior facilidade de fragmentação das moléculas do gás (menor energia de ligação) [3.11], produzindo assim mais fluor livre. Aumentando-se a pressão na câmara de 50 para 100mTorr, observa-se um aumento de taxa de 200 para 580nm/min. Isto se dá devido ao aumento da densidade de radicais livres de fluor. No entanto, como vemos na fig.2.17, a tensão de polarização é bem menor em módulo no caso do SF₆ e diminui consideravelmente com a pressão. Esta redução de tensão de aceleração de íons e a redução da taxa de corrosão para altas pressões de SF₆, de 100 a 125 mtorr, com taxas de 580nm/min para 300nm/min, respectivamente, indicam que nesta região há uma limitação do mecanismo de reação. Os nossos resultados de variação

da taxa de corrosão com a pressão são similares qualitativamente aos reportados por Tang e Hess [3.6] usando frequência de 4.5Mhz. Eles argumentam, no caso SF_6 , sobre a redução do mecanismo de reação devido à redução da energia dos íons, porém em adição, eles mostram por actinometria, que com o aumento da pressão há uma forte queda na geração de fluor livre, o que também limitará a taxa de corrosão nesta faixa de pressão. De forma qualitativa, as nossas taxas de corrosão em plasma de SF_6 são bem maiores aos reportados por Tang e Hess, confirmando a relação inversa da taxa com a frequência como citamos no capítulo 1.4.3. Outra diferença é quanto à pressão onde ocorre a máxima taxa. Esta é menor no nosso caso, provavelmente pela redução da geração de fluor livre a frequências mais baixas.

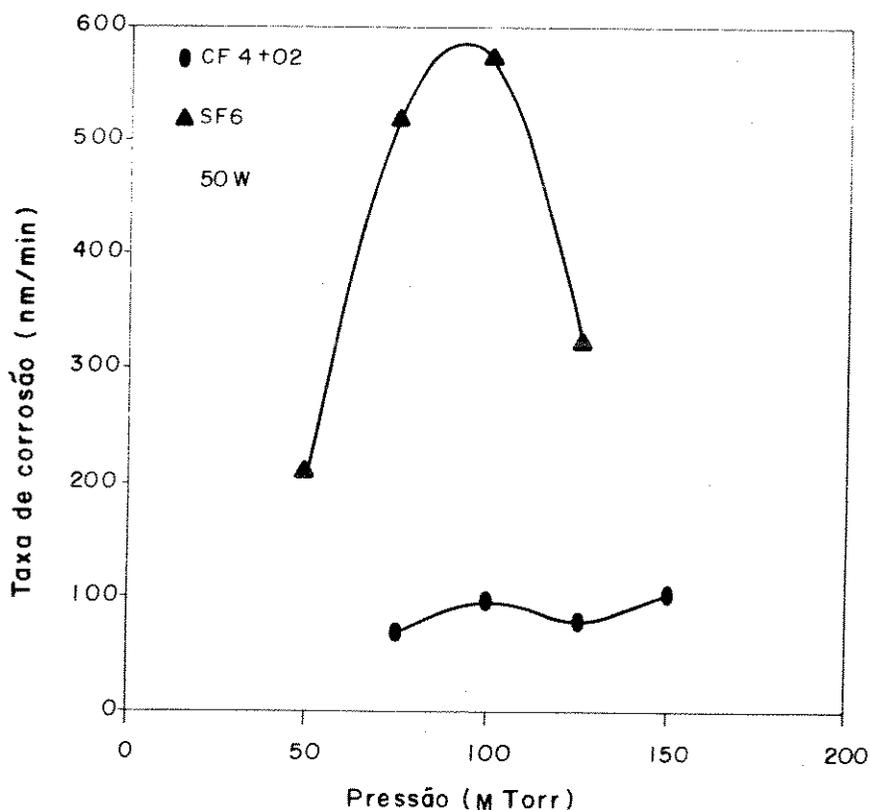


Fig. 3.4- a- Taxa de corrosão de Tungstênio variando-se a pressão, mantendo-se constante a potência em 50W e o fluxo para o SF_6 25sccm e para o $CF_4 + O_2$ 40sccm.

3.3 - MEDIDA DE UNIFORMIDADE

A uniformidade de uma corrosão está relacionado com a variação da taxa de corrosão ocorrido no filme ao longo da amostra.

A fórmula para se avaliar esta variação será [3.8]:

$$U\% = \frac{Tc \text{ máx} - Tc \text{ min}}{2 Tc \text{ méd}} \times 100\%$$

Onde :

$$Tc \text{ méd} = \frac{Tc1 + Tc2 + \dots + Tcn}{n}$$

Tc máx - Taxa de corrosão máxima

Tc min - Taxa de corrosão mínima

Tc med - Taxa de corrosão média

Obs.: Esta fórmula é válida para n maior que 5 pontos. Sendo que fica mais preciso com um maior número de pontos.

Realizamos a caracterização da uniformidade para um processo específico de corrosão de fotorresiste. Para esta teste preparamos uma amostras, com 7,5 cm (3") de diâmetro, da mesma maneira das amostras do ítem 3.2.1.1.

Para esta amostra foram medidos espessuras do fotorresiste em 20 pontos, antes e depois da corrosão, medidas estas, feitas nos mesmos pontos usando-se como referência o chanfro de orientação.

As condições para a corrosão destas lâminas foram :

Potência- 100W (0,8 W/cm²)

Fluxo de O₂ - 100sccm

Pressão- 100mTorr

Tempo- 4 min.

Podemos observar na fig 3.5, o gráfico de distribuição das taxas de corrosão ao longo da amostra. Esta distribuição é típica em corrosão por plasma, sendo chamado de formato olho de boi.

Comparando a variação da uniformidade com a reportada na literatura [3.18, 3.19 e 3.20], encontra-se dentro do esperado, pois a maioria dos catálo-

gos de fabricantes garantem valores de $\pm 3\%$ a $\pm 5\%$, para lâminas de 75 a 150mm, Seabra [3.8] conseguiu para lâmina de 50mm uma variação de $\pm 3\%$, no nosso caso para lâmina de 75mm a variação foi de $\pm 6\%$, mas se dispresarmos 12mm da borda, isto cai para $\pm 1,2\%$.

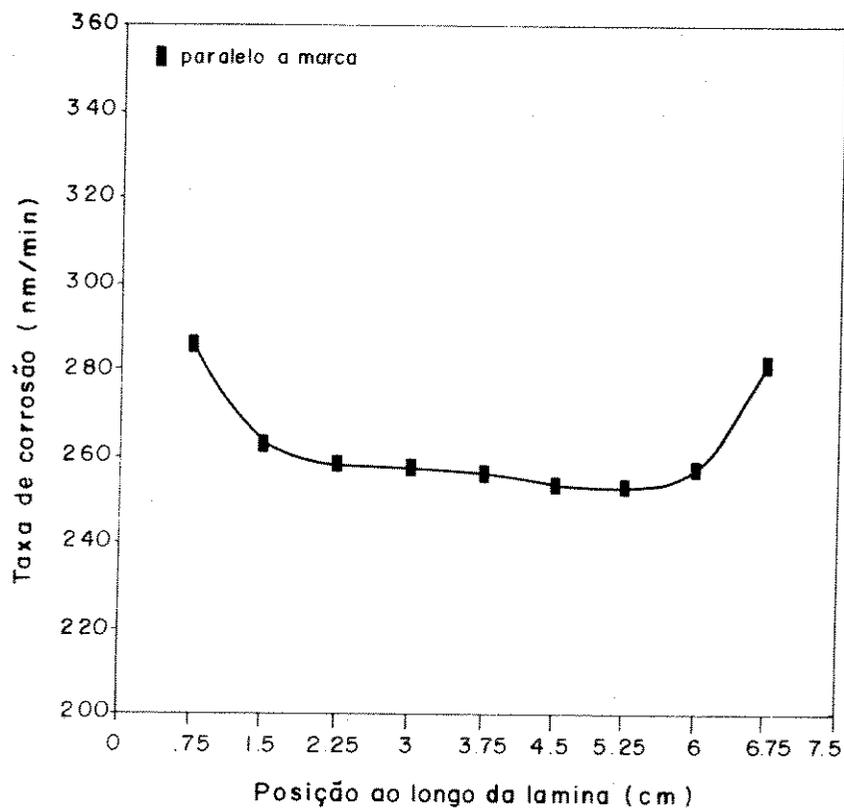


Fig. 3.5 - Gráfico da Uniformidade da corrosão numa lâmina de Si com filme de fotorresiste.

3.4 - ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE GAAS APÓS A CORROSÃO DE TUNGSTÊNIO

Foram preparadas também amostras de GaAs semi-isolante, com filme de 2000Å de W, para análise da superfície, após a etapa de corrosão por RIE. As técnicas de análise foram:

- a- Microscopia Eletrônica de Varredura
- b- Espalhamento de Luz
- c- Espectroscopia RAMAN
- d- Espalhamento de fotoluminescencia.

Por microscopia eletrônica não se observou diferença significativa da superfície das amostras corroídas em plasma de SF_6 nas faixas de pressão e potência mencionadas anteriormente (não analisamos amostras corroídas em plasma de CF_4+O_2 por SEM).

Na tabela 3.2 são apresentados valores do sinal obtido pela medida de rugosidade por espalhamento de luz. Este sinal é proporcional ao quadrado do valor da rugosidade média quadrática [3.13]. Observa-se uma rugosidade maior no caso do CF_4+O_2 comparado ao caso do SF_6 . Isto é coerente com a diferença na tensão de autopolarização, ou bombardeamento dos íons sobre as amostras (Fig.2.17). Ainda para o caso do CF_4+O_2 , observa-se uma tendência geral de aumento da rugosidade com aumento da potência e redução da pressão, também em concordância com as tensões da Fig.2.17. Excetua-se no entanto, de forma mais marcante, a amostra corroída a 25W. No caso de SF_6 , a variação da rugosidade é muito pequena, excetuando-se novamente a amostra corroída a 25W.

As medidas de espalhamento Raman foram feitas na configuração de retroespalhamento (backscattering) utilizando 100mW de potência da linha 5145\AA de um laser de Argônio. Para uma amostra com orientação (100), esta configuração deveria produzir apenas uma linha no espectro Raman, correspondente ao fonon LO (292cm^{-1}). Isto de fato acontece com amostras não processadas ou processadas em condições sem geração de danos (Fig. 3.6a). Amostras com danos de superfície com profundidade da ordem de ou maior que a profundidade de penetração da luz do laser ($\sim 550\text{\AA}$) ocasionam o aparecimento de mais um pico, correspondente ao fonon TO (266cm^{-1}), o qual é proibido em material cristalinamente perfeito (Fig.3.6b). Assim, de modo geral, a razão entre as intensidades das linhas (I_{TO}/I_{LO}) fornece uma idéia qualitativa dos danos de superfície do GaAs. Na tabela 3.2 apresentamos estas razões entre as intensidades das duas linhas, de amostras processadas em diferentes condições de corrosão do filme de W sobre GaAs. Embora tenhamos analisado um sub-conjunto das amostras analisadas por rugosímetro (Tabela 3.2), existe uma concordância perfeita com os resultados destes (Fig.3.7). Isto inclui a piora da qualidade das superfícies das amostras corroídas a 25W (tanto em SF_6 como em CF_4+O_2) e levemente, da amostra corroída em CF_4+O_2 a 50W e 150mTorr, comparado às amostras corroídas a 50W e 125mTorr e seu respectivo gás. Fica assim confirmada, por duas técnicas, a piora da qualidade das superfícies nestas condições de processo, o que não era esperado, baseado apenas nos valores de tensão de bombardeamento dos íons (Fig.2.17). A origem desta observação não é bem conhecida neste momento. Entre as várias possibilidades podemos citar instabilidade do plasma, causando transientes de tensão de aceleração dos íons.

Tabela 3.2 - Valores do sinal medido por rugosímetro por espalhamento de luz, e, entre parênteses, valor da relação das alturas das linhas de espectro Raman correspondentes aos fons TO e LO (I_{TO}/I_{LO}) de amostras com W/GaAs corroídas em diferentes condições de plasma.

Gás	SF ₆				CF ₄ +8% O ₂			
Pressão(mTorr)	50	75	100	125	75	100	125	150
Potência (W)								
25				1.50 (0.20)			1.88 (0.22)	
50	0.67	0.62	0.67	0.67 (0.0)	1.45	1.15	0.56 (0.0)	0.94 (0.07)
100				0.47			1.61	
125				0.80 (0.0)			3.95 (0.57)	

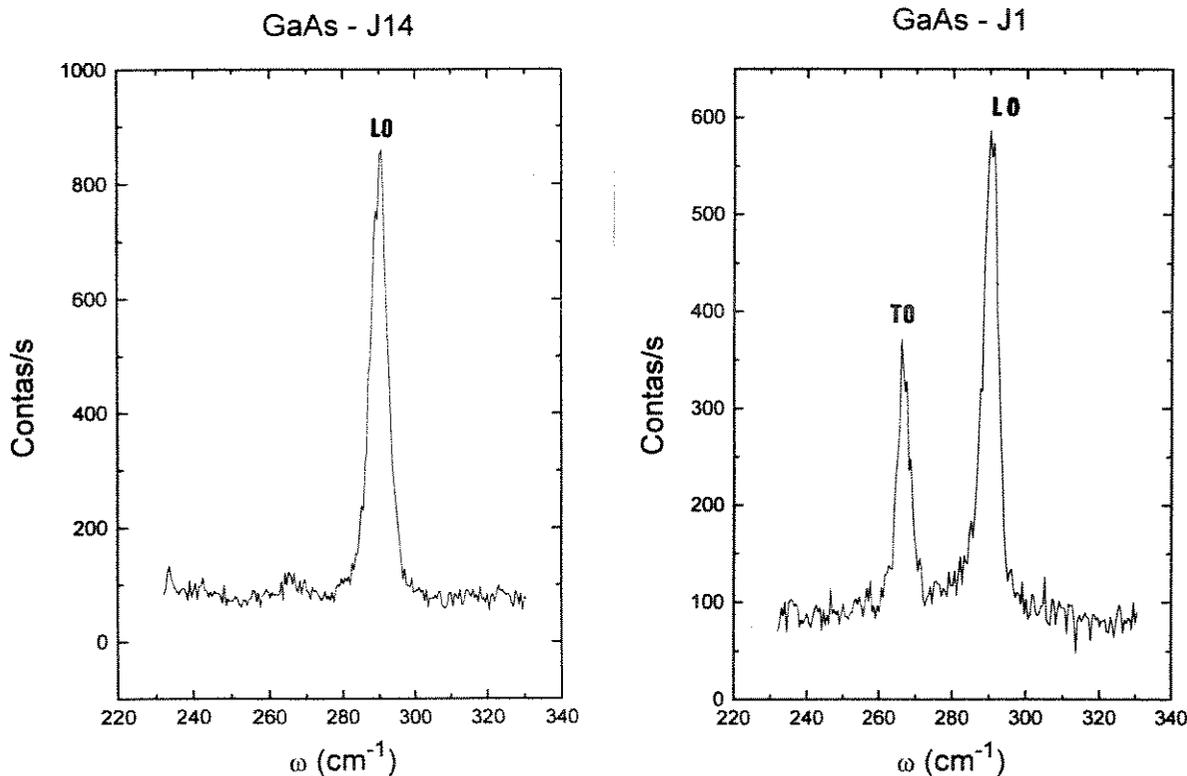


Figura 3.6 - Análise do espectro Raman da superfície do GaAs depois da corrosão do filme de W. a- Gás-SF₆, Fluxo- 25sccm, Potência- 50W e Pressão- 125mTorr. b- Gás- CF₄+O₂, Fluxo- 40sccm, potência- 125W e Pressão- 125mTorr.

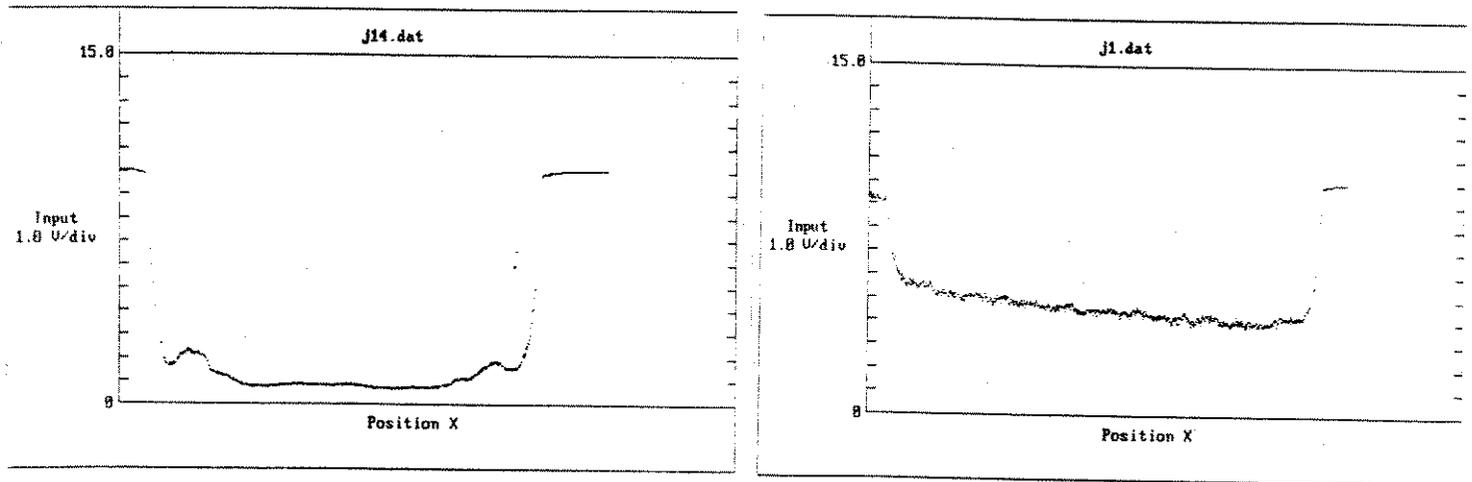


Figura 3.7 - Análise com rugosímetro da superfície do GaAs depois da corrosão do filme de W. a- Gás- SF_6 , Fluxo- 25sccm, Potência- 50W e Pressão- 125mTorr. b- Gás- $\text{CF}_4 + \text{O}_2$, Fluxo- 40sccm, potência- 125W e Pressão- 125mTorr.

3.5 - MEDIDAS DE ANISOTROPIA

Um processo é anisotrópico quando as paredes laterais do filme corroído são bem verticais, acompanhando a máscara.

O "undercut" é o quanto as paredes laterais do filme foram atacadas e entraram sob a máscara de fotorresiste. Define-se anisotropia, A, pela seguinte relação:

$$A = \frac{D}{u}$$

onde : D - espessura do filme atacado
 u - "undercut"

A título de referência para comparação, apresentamos os valores de anisotropia sugeridos para diferentes níveis de integração [3.17]:

Nível de integração	Largura das linhas (μm)	Anisotropia requerida
MSI	5 - 7	1
LSI	3 - 5	3 para 5
VLSI	1	8 para 10

A preparação da amostra para se medir a anisotropia constou de um depósito de 8000\AA de W sobre um substrato de Si e um filme de Al de 1000\AA , fotogravado com linhas de larguras variadas (de $2,5$ a $50\mu\text{m}$).

Não foi possível fazer esta medida em todas as condições trabalhadas por falta de tempo e disponibilidade do microscópio eletrônico, por isso, escolhemos uma condição que nos pareceu boa dada a taxa de corrosão bastante elevada com SF_6 .

A condição escolhida foi a 75mTorr com uma potência de 50W , fluxo de 25sccm . As fotografias deste perfil são mostradas nas figuras 3.8 a 3.10, onde podemos ver uma parede vertical com pouca inclinação. O valor estimado a partir destas fotos para a anisotropia é 5. Este valor pode ser melhorado, usando-se máscara de fotorresiste e acrescentando um pequeno percentual de H_2 ou O_2 , na mistura. Esta combinação aumentará a produção de fluor, aproveitando o carbono da máscara de fotorresiste formará o polímero do tipo CF e CF_2 , que protegerá as paredes verticais [3.15, 3.16].

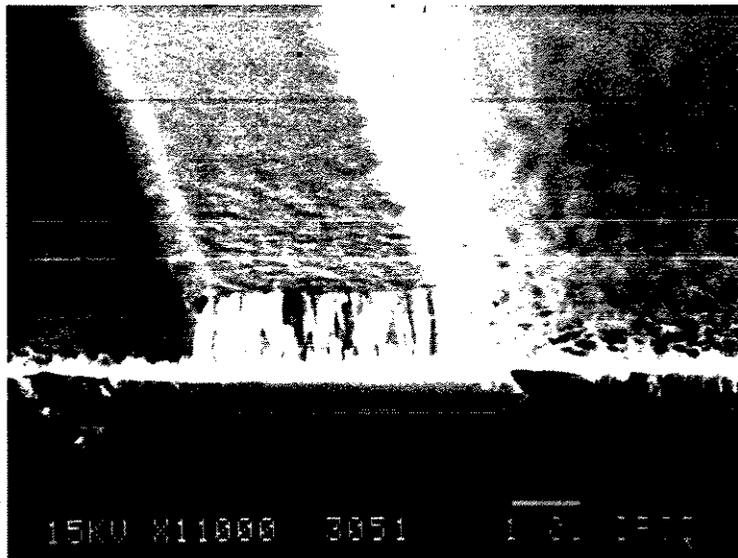


Figura 3.8 - Fotografia no SEM de uma via vista de topo, feita com SF_6 , com 75mTorr, 50W e 25sccm



Figura 3.9 - Fotografia no SEM ,nas mesmas condições da anterior, mostrando a via lateralmente.

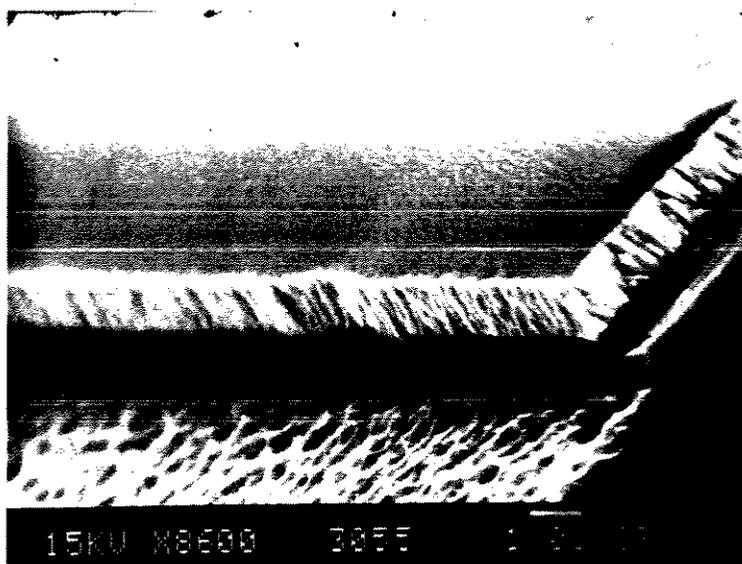


Figura 3.10 - Fotografia no SEM de uma via vista lateral, feita com SF_6 , com 75mTorr, 50W e 25sccm, usando como máscara só fotorresiste. Foi dado um "overeching" grande.

3.6 - MEDIDAS DE SELETIVIDADE

Seletividade é a relação entre as taxas de corrosões verticais de materiais distintos, ou seja entre a máscara e o filme ou ainda entre o substrato e o filme que se deseja corroer. Este parâmetro é importante, pois com ele pode-se determinar a espessura do filme que servirá como máscara para corrosão de linhas ou geometria que se está processando.

A seletividade é definida por :

$$S = \frac{Tc \text{ vertical da máscara}}{Tc \text{ vertical do filme}}$$

onde Tc é a taxa de corrosão

Nas tabelas 3.3 a 3.6 podemos observar os dados das corrosões de W e de fotorresiste, variando-se a potência e a pressão para os dois gases disponíveis e a seletividade correspondente. Nas figuras 3.10 e 3.11 são mostradas as

curvas de seletividade nestas condições.

Notamos com estes resultados que a seletividade cai com o aumento da potência em ambos os gases. Isto indica que a taxa de corrosão de fotorresiste tem uma dependência maior com a energia de bombardeamento dos íons, o que é visível também pelas curvas das figuras 3.1 e 3.3. Note também que a taxa máxima com plasma de SF₆, ocorre para pressão de aproximadamente 100mTorr para o W (fig.3.4) e 75mTorr (V_{dc} maior) para fotorresiste (Fig.3.2), indicando maior sensibilidade com V_{dc} para a corrosão de fotorresiste.

Tabela 3.3 - Taxas de corrosão de W e Fotorresiste e a sua seletividade variando a potência, mantendo-se fixo o fluxo em 25sccm e pressão em 125mTorr, usando como gás de processo SF₆

Potência (W)	Taxas de Ataque (nm/min)		Seletividade (W/FR)
	W	Fotorresiste	
25	129.7	35.5	3.6
50	321.7	101.3	3.2
100	1110.4	401.3	2.8
150		812.3	

Tabela 3.4 - Taxas de corrosão de W e Fotorresiste e a sua seletividade variando a pressão, mantendo-se fixo o fluxo em 25sccm e potência em 50W , usando como gás de processo SF₆.

Pressão (mTorr)	Taxa de Ataque (nm/min)		Seletividade (W/FR)
	W	Fotorresiste	
50	208.0	107.2	1.94
75	517.0	163.1	3.17
100	571.5	123.7	4.62
125	321.7	114.8	2.8

Tabela 3.5 - Taxas de corrosão de W e Fotorresiste e a sua seletividade variando a potência, mantendo-se fixo o fluxo em 40sccm e pressão em 125mTorr, usando como gás de processo $CF_4 + O_2$

Potência (W)	Taxas de Ataque (nm/min)		Seletividade (W/FR)
	W	Fotorresiste	
25	31.2	66.0	0.47
50	78.6	157.1	0.5
75		210.3	
100	168.1	347.8	0.48
150	169.1	473.9	0.36

Tabela 3.6 - Taxas de corrosão de W e Fotorresiste e a sua seletividade variando a pressão, mantendo-se fixo o fluxo em 40sccm e potência em 50W, usando como gás de processo $CF_4 + O_2$

Pressão (mTorr)	Taxa de Ataque (nm/min)		Seletividade (W/FR)
	W	Fotorresiste	
75	69.6	79.2	0.88
100	94.5	92.4	1.02
125	78.6	140.5	0.56
150	102.9	119.5	0.861

Para ambos os gases temos um máximo na seletividade para pressões de aproximadamente 100mTorr. Para o gás SF_6 , isto corresponde à condição de máxima taxa de corrosão de W, enquanto a taxa de corrosão de fotorresiste já está reduzindo (redução de V_{dc}). No caso de $CF_4 + O_2$ temos uma redução da seletividade para pressões acima de 100mTorr. Isto está associado ao máximo da taxa de corrosão do fotorresiste para pressão de 125mTorr (fig.3.2). Lembramos que neste caso a tensão de auto-polarização é elevada e que o oxigênio contribui na corrosão de fotorresiste.

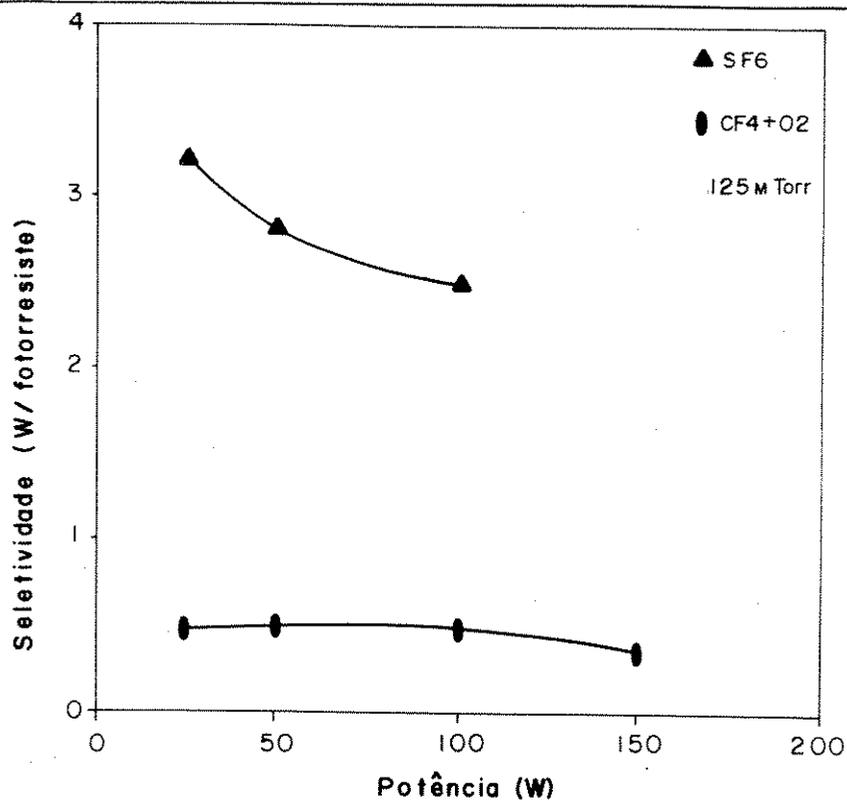


Figura 3.10 - Gráfico da seletividade de W/Fotorresiste, variando-se a potência, para pressão de 125mTorr de SF₆ e CF₄+O₂.

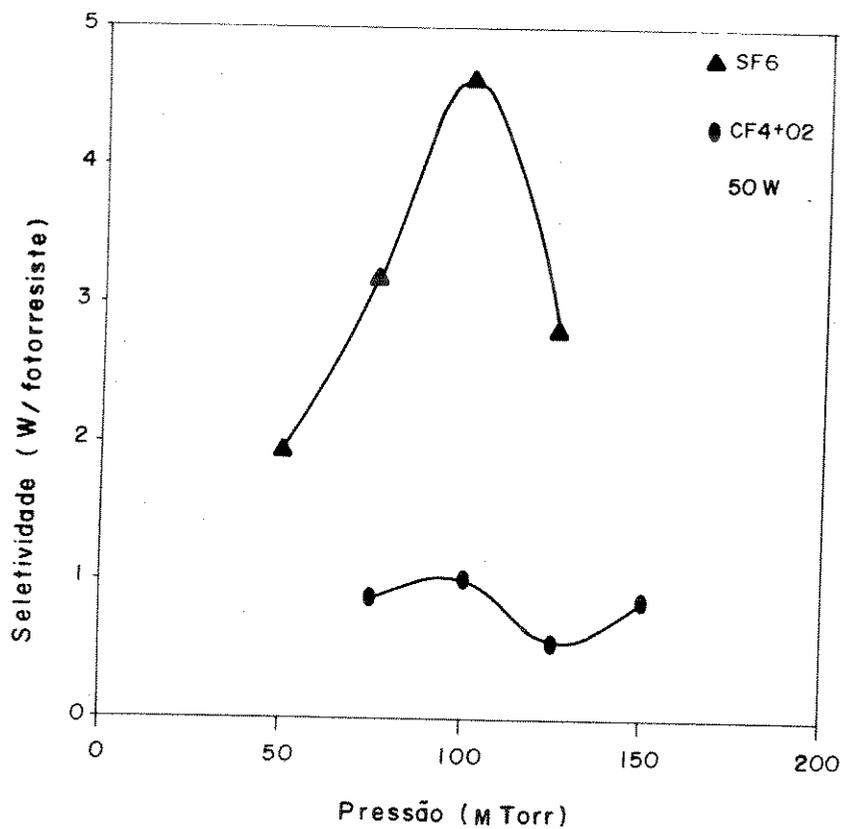


Figura 3.11 - Gráfico da seletividade de W/fotorresiste, variando-se a pressão, para potência de 50W e como gás SF₆ e CF₄+O₂.

A seletividade obtida com SF_6 é bem maior que com CF_4+O_2 . Isto é atribuído a menor taxa relativa da corrosão de fotorresiste com SF_6 (tensão de polarização menor e ausência de O_2). O valor obtido é maior que os reportados na literatura [3.12].

3.7 - CONCLUSÕES

Comparando o uso do gás SF_6 com o $CF_4+8\%O_2$ observamos:

- uma taxa de corrosão bem maior para o caso SF_6 , até da ordem de 4 vezes.
- tensões de auto-polarização do eletrodo bem menores para o caso SF_6 .
- menor geração de defeitos na superfície do substrato de GaAs no caso SF_6 .
- maior seletividade de W/fotorresiste no caso SF_6 .

Podemos sugerir o seguinte processo como o mais apropriado para a corrosão de filmes de W sobre GaAs:

- Gás: SF_6 , por gerar menos defeitos e apresentar maior taxa de corrosão, e apresenta maior seletividade W/fotorresiste,
- Potência: 50W, por limitar a temperatura da amostra abaixo de $100^\circ C$ e apresentar baixa geração de defeitos.
- Pressão: Variável de 50 a 125 mTorr, de acordo com a taxa de corrosão e seletividade desejada.

3.8 - REFERÊNCIAS

- 3.1 - T.P. Chiw and A.J. Steckl, VLSI Electronics, Edt. N. Einspruch, Vol. 9, Chap. 2, (Academic Press, 1985).
- 3.2 - R.S. Blewer, Solid State Technol., 11, 117 (1986).
- 3.3 - C. Bernard, R. Madar and Y. Pauleau, Solid State Technol., 2, 79 (1986).
- 3.4 - K. Maeda and K. Fuino, 43, 22 (1975).

- 3.5 - J.N. Randall and J.C. Wolfe, *Appl. Phys. Lett.*, 39, 742 (1981).
- 3.6 - C.C. Tang and D.W. Hess, *J. Electrochem. Soc.*, 131, 115 (1984).
- 3.7 - J. Corburn, IV Oficina Brasileira De Microeletrônica, Campinas, pp. 41-80, Edt. Mammana (1983).
- 3.8 - A.C. Seabra, Dissertação de Mestrado, EPUSP, 1990.
- 3.9 - R.H. Bruce, *Solid State Technol.*, 64-68, 10 (1981).
- 3.10 - M.A. Hatney, W.N. Greene, D.S. Soane and D.W. Hess, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1892-1985, B(6) (1988).
- 3.11 - CRC Handbook of Chemistry and Physics, 65th edition, Edt. R. Weast, CRC Press Inc. (1984-1985).
- 3.12 - P.B. Verdock, Dissertação de Doutorado, UNICAMP, 1993.
- 3.13 - R.K. Yamamoto, M.C.V. Lopes, C.T. Akaminé, S.G. dos Santos F. e C.M. Hasenack, *Anais do X CBECIMAT*, pp 1080-1083, Águas de Lindóia, SP, 1992.
- 3.14 - P.A.M. Rodrigues, C.A.C. Mendonça, A.A. Bernussi, F.O. Plantz, C. Vazquez Lopez, F. Cerdeira, E.A. Meneses, J.C. Bezerra, I.L. Dias and A.G. Oliveira, *Proc. of the IV Brazilian School of Semic. Phys.*, Edt. A.S. Chaves, A.G. Oliveira and C.E.T. Gonçalves da Silva (World Scientific, Singapore 1989), p. 304.
- 3.15 - J.W. Corburn, *Plasma Chem. Plasma Process.*, 2, 1(1982).
- 3.16 - M. Mieth and A. Barker, *Semiconductor International*, May 1984, p. 222.
- 3.17 - Manual da Material Research Corporation "Reactive Ion Etch system"- Section nine: "Basics of Plasma Etching"
- 3.18 - Applied Material. AME8100 Etch Systems Technical Specifications. U.S.A., 1982.
- 3.19 - Drytek - The DRIE Plasma Etching Systems Technical Specifications. U.S.A., 1985.
- 3.20 - D.Bollinger; S.Iida; O.Matsumoto - "Reactive Ion Etching: Its Basis and Future", *Solid State Technology*, June 1984.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES E SUGESTÕES:

O sistema RIE construído apresentou funcionamento bastante apropriado. O uso de frequência de 500KHz mantém o mesmo comportamento qualitativo da corrosão de W com os parâmetros de processo, comparado ao reportado em [3.6] para um gerador de 4,5MHz, havendo apenas alterações quantitativas.

O uso de um gerador de 500KHz e sistema de bombeamento com soprador de ar industrial acarretam uma considerável simplificação e redução de custo do equipamento.

Comparando o uso do gás SF₆ com o CF₄+8%O₂ observamos:

- uma taxa de corrosão bem maior para o caso SF₆, até da ordem de 4 vezes.
- tensões de auto-polarização do eletrodo bem menores para o caso SF₆.
- menor geração de defeitos na superfície do substrato de GaAs no caso SF₆.
- maior seletividade de W/fotorresiste no caso SF₆.

Podemos sugerir o seguinte processo como o mais apropriado para a corrosão de filmes de W sobre GaAs:

- Gás: SF₆, por gerar menos defeitos e apresentar maior taxa de corrosão, e apresenta maior seletividade W/fotorresiste,
- Potência: 50W, por limitar a temperatura da amostra abaixo de 100°C e apresentar baixa geração de defeitos.
- Pressão: Variável de 50 a 125 mTorr, de acordo com a taxa de corrosão e seletividade desejada.

Como sugestões para a continuidade do trabalho propomos:

- Ampliar o estudo da corrosão com plasma de SF₆ e CF₄+O₂, com outros materiais, tais como SiO₂, Si₃N₄ e poliamide. Fazer estruturas, como isoladores de óxido e plugs de W.

- Começar o trabalho de pesquisa com outros gases que corroam compostos do grupo III-V (GaAs, AlGaAs, InGaAs, GaSb e InP), tais como, $\text{CH}_4 + \text{Ar} + \text{H}_2$ e CCl_2F_2 . Este estudo visa a utilização deste equipamento para estruturas de circuitos integrados utilizando transistores HBT, e outras.
- Otimizar o sistema de detecção de ponto final, se possível automatizá-lo.