

ATIVIDADES DE PESQUISA DO LSI NA ÁREA DE CORROSÃO POR PLASMA

J.A. ZUFFO*, A.C. SEABRA**, M.L.P. DA SILVA**, W.J. FREITAS**

LABORATÓRIO DE SISTEMAS INTEGRÁVEIS - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE
ELETRICIDADE - ESCOLA POLITÉCNICA DA USP
Caixa Postal 8174 - São Paulo - Capital

RESUMO

Apresentamos nesse trabalho um resumo das pesquisas desenvolvidas no LSI no âmbito da corrosão por plasma. Na sua parte inicial é feita uma apresentação do estado da arte na corrosão por plasma e a partir daí, justificam-se as opções adotadas no Laboratório.

Posto isto, passamos a descrever o projeto do equipamento desenvolvido, dando ênfase às dificuldades encontradas e soluções adotadas. Numa terceira parte, concentramos-nos nos aspectos de caracterização do equipamento, descrevendo os instrumentos usados e o desempenho obtido.

* Prof. titular DEE-EPUSP, Coordenador Geral do LSI

** Pesquisadores do LSI-DEE-EPUSP

I. INTRODUÇÃO

A utilização de novos materiais e a redução nas dimensões mínimas dos circuitos integrados estimularam a pesquisa e o emprego de processos assistidos por plasma em microeletrônica. Desde 1978, quando surgiu a primeira aplicação industrial maciça dessa técnica na fabricação de memórias 68K - DRAM (1) até os dias atuais a venda anual de equipamentos de corrosão a seco já ultrapassa o valor de US\$ 500M (2) e as aplicações vão desde a remoção de fotorresiste até a definição de estruturas submicrométricas - muito se evoluiu na compreensão dos mecanismos físico-químicos envolvidos. A utilização desses novos conhecimentos, no entanto, não é imediata, requerendo por parte de qualquer usuário de processos de corrosão a seco um estudo aprofundado.

O sucesso da corrosão a seco na indústria de microeletrônica deve-se principalmente à capacidade dessa técnica em reproduzir fielmente nas camadas constituintes do CIs os traçados existentes na camada

de mascaramento. Diferentemente da técnica convencional de corrosão úmida que é isotrópica, a técnica da corrosão a seco pode ser anisotrópica. Como vantagens adicionais tem-se a limpeza do processo, a pequena quantidade de reagentes utilizados, maior segurança para o operador, facilidade de automação e possibilidade de monitoração da evolução do processo.

Embora existam outras técnicas capazes de gerar estruturas submicrométricas, tal como processo de descolamento ("lift-off"), nenhuma delas tem a generalidade e a mesma quantidade de aplicações que a técnica de corrosão a seco.

II. CLASSIFICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE CORROSÃO A SECO

Um equipamento de corrosão a seco pode ser representado esquematicamente como na figura 1.

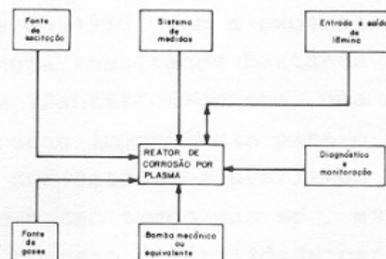


Figura 1. Representação esquemática de um equipamento de corrosão por plasma.

Dependendo do tipo de implementação utilizada na construção de cada um dos blocos da figura 1 e de como eles estão acoplados entre si, atribui-se uma designação específica ao equipamento ou arranjo experimental. Em realidade, uma miríade de designa-

ções, muitas vezes conflitantes entre si, é utilizada tornando difícil a clara identificação de qual a melhor configuração para determinada aplicação. Portanto, uma escolha criteriosa, seja para a aquisição ou para a construção de um equipamento, deve basear-se no amplo conhecimento da fenomenologia envolvida.

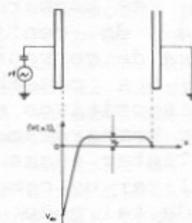
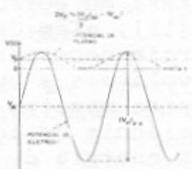


Figura 2 Representação esquemática de uma célula e a distribuição de potencial em seu interior quando aplica-se um sinal de 13,56 MHz [3].



A capacidade de obtenção de estruturas submicrométricas com total fidelidade ao traçado da máscara é, sem dúvida nenhuma, o grande atrativo da corrosão a seco. Sucintamente, pode-se compreender a razão pela qual o processo é anisotrópico, tomando-se como exemplo o reator excitado por rádio-frequência e a distribuição de potenciais em seu interior mostrados na figura 2 [3]. Neste reator, os elétrons respondem ao sinal de rádio-frequência rapidamente, ao passo que os íons, devido à sua maior massa, são incapazes de fazê-lo. Como resultado, ocorre uma separação de cargas e uma região de carga espacial, ou região de bainha, forma-se entre o plasma e qualquer superfície em contato com ele. Desenvolve-se, então, na região de carga espacial, uma diferença de potencial que mantém a neutralidade de cargas em cada ciclo do sinal de RF em qualquer das superfícies em contato com o plasma. Essa diferença de potencial plasma-superfície pode variar de 10 eV até, aproximadamente, 500 eV [4], sendo suficiente para conferir direcionalidade aos íons que, uma vez gerados no corpo do plasma, difundem-se até as proximidades da região de carga espacial. Assim, por um processo de bombardeamento físico, apresentado na figura 3a, pode-se gerar um perfil anisotrópico na superfície da lâmina exposta ao plasma. Além desse mecanismo, uma vez que o plasma produz radicais neutros e espécies ionizadas, se estes forem reativos, tem-se também a possibilidade que ocorram reações químicas entre as lâminas e as espécies do plasma. Sendo um processo puramente químico, ele é totalmente isotrópico e está representado na figura 3b.

Caso o processo se utilize de ambos os mecanismos, ele é representado pela figura 3c, sendo que a interação de ambos dá-se sinergeticamente, refletindo-se em uma alta taxa de corrosão quando comparada aos dois mecanismos separadamente. Além disso, muitas vezes é comum a formação seletiva de polímeros sobre as superfícies em contato com o plasma, o que pode conferir uma maior seletividade ao processo como mostrado na figura 3d [5].

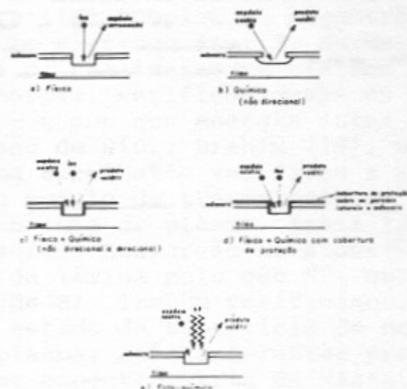


Figura 3 Mecanismos básicos envolvidos no processo de corrosão a seco [5].

As principais técnicas de corrosão estão apresentadas na figura 4 [6], onde o primeiro ramo designado por "outros" representa qualquer técnica de geração de traçados que não seja realizada em um banho líquido ou assistida por um gás excitado, citando-se como exemplo a técnica de descolamento ("lift off"). No entanto, nenhuma dessas técnicas é empregada tão genericamente como a técnica de corrosão a seco. Uma vez escolhida uma técnica de corrosão a seco, pode-se utilizar ou não uma descarga luminosa para efetuar-se a corrosão. Dentre as técnicas de corrosão a seco que não utilizam descargas luminosas, a mais conhecida é a corrosão a seco assistida por laser [7], cujo mecanismo está representado na figura 3e. O laser é considerado uma fonte ideal de fótons por que sua faixa estreita de emissão permite a excitação seletiva de ligações de átomos e moléculas. Uma grande vantagem da corrosão a seco assistida por laser em relação à corrosão a seco assistida por plasma é que ela pode ser feita diretamente na lâmina, sem o auxílio de uma máscara. No entanto, problemas formidáveis relacionados à resolução, uniformidade do feixe de laser sobre a área da pastilha, confiabilidade do laser, etc., ainda não permitiram a sua larga utilização em processos para semicondutores.



Figura 4. Configurações possíveis para os equipamentos de cobre.

Uma vez optando-se por uma técnica de corrosão a seco assistida por plasma (descarga luminosa), a principal escolha reside no número de lâminas a serem processadas simultaneamente. Do ponto de vista de processo, principalmente quando o custo de uma única lâmina processada pode atingir US\$ 3.000 [8], é essencial restringir-se ao máximo as variações lâmina-a-lâmina, perdas por mau funcionamento, tempo de desenvolvimento de processo, etc., de tal forma que o ideal é utilizar uma técnica de lâmina única, possibilitando um melhor acompanhamento da lâmina durante o processamento. Por outro lado, por questões de produção, isso implica em uma técnica com taxas de corrosão muito mais elevadas que os sistemas para várias lâminas. Uma solução intermediária, adotada na prática [9], é a utilização de várias câmaras para lâmina única operando simultaneamente no mesmo equipamento, de forma a ter-se uma eficiência de produção comparável à dos sistemas para várias lâminas. Portanto, os sistemas de processamento de lâmina única são essenciais em processos com níveis de integração elevados.

Atualmente é possível construir reatores que operem em altas pressões e que forneçam um perfil relativamente anisotrópico, utilizando-se dos mecanismos apresentados na figura 3 (devido à pressão ser elevada o caminho livre médio das partículas diminui acarretando um bombardeamento da lâmina menos direcionado). No entanto, dependendo do material a ser corroído, a operação em baixas pressões torna-se necessária. O caso mais conhecido é o da corrosão

de ligas de Al - 4% Cu onde o cobre gera produtos não voláteis que têm que ser removidos obrigatoriamente por bombardeamento físico de íons com energias em torno de 250 eV [10], na prática somente atingíveis em baixas pressões. Objetivando a mesma versatilidade, deve-se operar no chamado modo RIE, onde os eletrodos são de áreas bastante distintas de tal forma que apenas o cátodo onde a lâmina está alojada é que fica submetido a esse nível de bombardeamento. As grandes desvantagens da configuração RIE são a sua baixa taxa de corrosão (entre 50 nm/min e 100 nm/min) e a possibilidade de introduzir-se nos dispositivos em processamento defeitos por bombardeamento ou por radiação. Para suplantar essas deficiências, costuma-se utilizar um campo magnético próximo à lâmina de tal modo que os elétrons percorram uma trajetória helicoidal, aumentando-se a eficiência de ionização e aumentando-se a taxa de corrosão de uma ordem de grandeza [11], além de reduzir-se ao mínimo a energia necessária para remover compostos não voláteis a uma taxa aceitável ao mínimo. Outra maneira de se conseguir uma alta eficiência de ionização e também de se tornar a energia de bombardeamento dos íons independentes da energia de ionização do gás é através da utilização de uma descarga em microondas [12], onde os íons são gerados em uma câmara separada e direcionados para a lâmina através de um sistema de extração conveniente. Essas variações são certamente muito mais adequadas que o sistema RIE convencional, porém, sua implementação é muito mais complexa. Observe-se que, partindo da configuração convencional, pode-se obter receitas de processamento a seco perfeitamente convenientes e que, em casos mais críticos, pode-se evoluir para uma dessas variantes. Por isso optou-se pela construção e o estudo de um sistema RIE convencional.

Várias técnicas de análise são utilizadas no estudo e caracterização da corrosão a seco e dos fenômenos físico-químicos envolvidos. Contudo, algumas sobressaem-se graças ao número de parâmetros que determinam e à versatilidade e/ou facilidade de implementação [13]. São elas: espectroscopia óptica, espectrometria de massa (acoplada ou não à cromatografia gasosa), interferometria e sondas de potencial.

Os sistemas de diagnose mais comuns em espectroscopia óptica são a espectroscopia de emissão e a de fluorescência induzida por laser, porém, outras técnicas foram recentemente aplicadas com sucesso (espectroscopia Raman, de infra-vermelho, etc.) [14].

A espectroscopia de emissão é considerada a menos interferente das técnicas. Detecta-se com ela, normalmente, emissões

desde o infra-vermelho até o ultra-violeta (dependendo do sistema em análise). Esta técnica aplica-se apenas às análises qualitativas uma vez que a emissão de uma espécie, em geral, não é linearmente proporcional à sua concentração; por este motivo utiliza-se adicionar ao sistema um gás inerte que possua um estado excitado próximo ao da espécie em análise para se detectar variações relativas de concentração (técnica conhecida por actinometria). É oportuno lembrar que a actinometria é uma técnica limitada, principalmente se o estado fundamental da espécie em estudo tem vida curta. A actinometria mostrou-se de extrema valia no estudo dos sistemas com gás CF_4 pela análise da emissão de flúor atômico (15). Além disso, a resolução temporal da emissão das espécies permite obter informações do estado dinâmico do sistema, enquanto a resolução espacial da emissão permite verificar as variações ponto a ponto do sistema.

O uso da espectroscopia de emissão para determinação de temperatura das espécies é outra de suas utilidades, muito embora pouca informação seja disponível quanto a esta aplicação na tecnologia de plasma.

Sendo uma técnica de baixo custo de investimento, fácil implementação e análise, a espectroscopia de emissão é amplamente usada nos equipamentos comerciais para determinação de ponto final nas corrosões.

Com a utilização da fluorescência induzida por laser (LIF) (16) consegue-se monitorar espécies no estado fundamental ou metastável de vida longa com boa sensibilidade, resolução espacial-temporal, além de se poder determinar a distribuição das energias internas e temperatura destas moléculas. Deste modo, radicais e/ou íons importantes para a corrosão podem ser determinados com segurança e os mecanismos desta, compreendidos. Sua principal limitação obviamente, é a necessidade de existir uma fonte de laser capaz de induzir a fluorescência e o seu alto custo, o que restringiu seu uso aos laboratórios de pesquisa.

A espectrometria de massa é uma poderosa técnica de análise de plasmas cujo principal inconveniente é exigir um outro sistema de bombeamento, além do sistema do equipamento e uma ligação com a câmara de reação para a retirada da amostra, o que é em geral, uma perturbação mais severa que a imposta no plasma pela espectroscopia de emissão. Vantagem inerente à técnica é sua alta sensibilidade que, aliada a um sistema de bombeamento limpo, permite detecção com segurança, de espécies presentes no plasma na faixa de ppm.

Os sistemas experimentais utilizam nor-

malmente espectrômetros quadripolo e possuem uma variedade de configurações (17), o que permite análise de gases residuais da câmara de plasma antes e após a corrosão, detecção de espécies neutras e/ou iônicas, informação sobre sub-produtos, contaminantes, determinação de ponto final, mecanismos e cinética de reação em tempo real. Se considerarmos que é possível determinar a concentração das espécies analisadas, perceberemos que a técnica tem ampla aplicação nessa área. Citaremos apenas dois exemplos que, acreditamos, exemplificam corretamente a potencialidade da técnica. Coburn [18] acoplou um espectrômetro de massa ao eletrodo de r.f. de um sistema de plasma e, utilizando um sistema de filtro de energia, verificou quais os íons relevantes - e com que energia estes incidem na corrosão de SiO_2 ; Brahim [19], utilizando do sistema semelhança verificou a veracidade de do seu modelo de transmissão de partículas pela bainha de plasma. Ishii [20] estudou a adsorção/dessorção na superfície da câmara e da lâmina pelo gás NF_3 quando da corrosão de Si. Também verificamos, salientando-se, o estado da superfície de nossa câmara de plasma, após diferentes processos, por espectrometria de massa. A técnica de espectrometria de massa é de menor custo que a LIF mas possui menor resolução espacial.

Uma técnica útil para a monitoração do substrato é a interferometria óptica; nesse caso, pode-se determinar a velocidade média ou instantânea e/ou o ponto final da corrosão (dependendo do arranjo que seja construído). A interferometria apresenta como vantagens, o baixo custo da construção e a facilidade de operação, exigindo contudo uma grande área de monitoração na lâmina (aprox. 1 mm²), além de fornecer informações apenas dessa área sob análise [21].

Por fim, sondas de potenciais são instrumentos de grande uso na área de plasmas mas que encontram resistências para aplicação em microeletrônica devido à dificuldade na compreensão dos dados obtidos e aos distúrbios que elas causam no plasma em seu redor. Normalmente, tais sondas são utilizadas para determinação de parâmetros de plasma tais como: temperatura de elétrons e íons, potenciais de plasma e densidade de espécies; claro está tratar-se de uma técnica profundamente interferente no sistema de plasma [4].

III. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

Decidiu-se construir um equipamento operando no modo RIE ("Reactive Ion Etching") pelos motivos expostos na seção anterior, devendo-se enfatizar que este permite uma maior flexibilidade quanto às aplicações e também quanto ao desenvolvi-

mento de outras configurações. Também como descrito na seção anterior, optou-se pelo processamento lâmina-a-lâmina pois mesmo industrialmente esta tem sido a opção preferida devido ao rígido controle sobre os resultados do processamento e ao aumento no tamanho das lâminas, o que minimiza as imposições quanto à produtividade do processo. Na figura 5 pode-se ver em detalhe a câmara de reação e a câmara do espectrômetro.

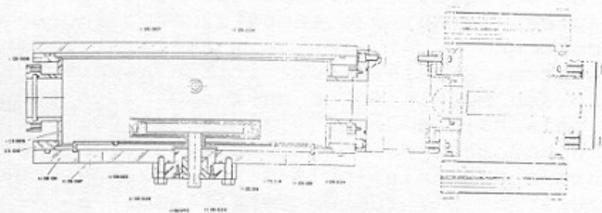


Figura 5 Câmara de reação e de espectrometria de massa desmontadas

Os pontos mais importantes para a definição da câmara de reação (projeto conjunto LSI-USP/LED-UNICAMP/J.W.COBBURN) foram a relação de área do eletrodo (catodo) e contra-eletrodo, fixada em 1:4, a simetria da mesma do ponto de vista da lâmina e da formação do plasma e os materiais empregados. Como material da câmara foi empregado o aço inoxidável 316L por ser um material praticamente inerte; como anéis de vedação foram utilizados anéis de VITON*; como material para isolações elétricas utilizou-se TEFLON* e para os visores utilizou-se quartzo herasil. O eletrodo tem um diâmetro de 150 mm e é feito de cobre eletrolítico, possuindo um sistema de refrigeração a água e um medidor de temperatura termopar (0°C - 300°C). Sua superfície é recoberta por uma placa de mesmo diâmetro onde a lâmina é alojada. A utilização dessa placa intercambiável advém da necessidade de modificar-se seu material de acordo com o processo em andamento (na corrosão do silício utiliza-se quartzo e na do SiO_2 , carbono ou TEFLON*, por exemplo [22]). A entrada de gases é feita pelo centro da tampa (de diâmetro 300 mm), que também opera como contra-eletrodo, e a exaustão realizada por baixo do eletrodo que suporta a lâmina e onde também está conectada a fonte de energia. A distância eletrodo/contra-eletrodo é de 60 mm. Além disso, entre o eletrodo e a base da câmara existe um homogeneizador

de fluxos que pode ser removido e com isso alterar a velocidade efetiva de bombeamento da câmara. A medida de pressão é feita por meio de um manômetro de capacitância MKS BARATRON modelo 227AA [1330 Pa-0 a 133 Pa] imune a gases corrosivos.

O sistema de admissão de gases inclui três controladores de fluxo de massa MKS 1259 com fluxos máximos (para N_2) de 100 sccm (2 unidades) e 500 sccm (1 unidade). Isso permite a utilização simultânea de três gases de processo. A escolha dos valores de 100 sccm e 500 sccm advém dos cálculos de consumo máximo de moléculas do gás de entrada em função da área a ser corroída [23], que estabelece um fluxo máximo de 230 sccm (equivalente a 500 sccm de N_2) de gás reagente (Freon 14-CF₄) para uma lâmina de 100 mm. A pressão na câmara, durante o processo, é mantida constante. Isso pode ser feito de duas formas, mantendo-se o fluxo Q de entrada constante e variando-se a velocidade efetiva S de bombeamento (e conseqüentemente o tempo T de permanência das moléculas gasosas dentro da câmara) ou mantendo-se S constante (e portanto T) e variando-se Q. Não se tem claro qual desses dois procedimentos de controle de pressão é o mais adequado, mas o fato do processo de corrosão consumir uma parcela do gás de entrada pode ser um argumento favorável ao primeiro método já que no segundo Q pode tornar-se muito pequeno, tornando o processo ineficiente. Por outro lado, fixando-se Q, o tempo de permanência das espécies torna-se variável [3]. Possivelmente o melhor método seja através de fixação de Q e controlando-se a pressão por meio do ajuste de S, que é o método empregado em equipamentos convencionais de corrosão e foi o método adotado. Ele implica na instalação de uma válvula borboleta na linha de exaustão, entre a câmara e as bombas de vácuo de forma a variar a velocidade efetiva S de bombeamento.

A partir da definição do fluxo de entrada e sabendo-se que a mínima pressão de operação do sistema situa-se em torno de 1,33 Pa, pode-se calcular a velocidade efetiva de bombeamento necessária na câmara. Levando-se em conta as perdas devido à tubulação de exaustão pode-se então definir a velocidade mínima de bombeamento necessária para o sistema. Assim, determinou-se T que o mesmo deveria ser da ordem de 50 l/s [24]. Por segurança, optou-se por um sistema com capacidade de bombeamento de 83 l/s sendo composto por uma bomba mecânica e uma bomba Roots (EDWARDS E2M40+EH250). Note-se que a bomba Roots não necessita de cuidado adicional, mesmo operando em ambientes agressivos, pois somente seus materiais constituintes (adequadamente selecionados) e nenhum tipo de óleo estarão em contato com o ambiente agressivo. Além disso, esta é uma bomba de passagem, não re-

tendo os gases evacuados. A bomba mecânica no entanto, necessita ser continuamente lubrificada e o óleo utilizado para tal fim entra em contato com o ambiente agressivo. Se este óleo se decompõe durante este contato, em parte as espécies agressivas são neutralizadas e não danificam o corpo da bomba, necessitando-se, no entanto, trocas frequentes de óleo. Se este óleo for neutro (como o FOMBIN*, por exemplo), ele não será degradado e as espécies agressivas emulsionadas atacam o corpo da bomba. Para evitar essa situação, utilizam-se filtros externos de óleo que retêm eficientemente essas espécies. Optou-se pela utilização de um óleo hidrocarbonado (comum) e um filtro externo para sua reciclagem, não se evitando, no entanto, a sua troca frequente.

Nos equipamentos de corrosão por plasma, a utilização de excitação por rádio-frequência (RF) obteve maior popularidade devido ao melhor rendimento e à maior eficiência de ionização em relação às fontes de tensão contínua ou de baixa-frequência, apesar da maior anisotropia obtida em baixas frequências devido à contribuição do deslocamento de íons [4]. A utilização de outras fontes de energia, no entanto, não deve ser descartada.

Na etapa de definição do projeto optou-se pelo desenvolvimento de um equipamento totalmente à válvula, em virtude dos níveis de tensão envolvidos. Isso simplificou os sistemas de alimentação e proteção, além de propiciar melhor absorção de eventuais descasamentos de impedância na saída.

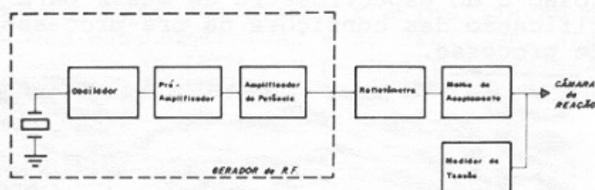


Figura 6 Diagrama de blocos de um sistema de excitação por R.F.

Como configuração básica para o gerador de RF foi estabelecida uma divisão de três estágios (figura 6): um circuito oscilador do tipo Pierce baseado em cristal como fonte do sinal de RF; um amplificador de potência com duas válvulas em paralelo, operando em classe "C", tendo na saída um filtro "Pi" para recuperação do sinal de RF e ajuste da impedância de saída; e um estágio pré-amplificador entre os dois circuitos anteriores para aumentar o nível do sinal oriundo do oscilador e isolar esse estágio de possíveis variações na carga do gerador.

Como complementos ao gerador de RF foram adicionados um medidor de potência (incidente e refletida) conhecido como refletômetro, uma malha de acoplamento para permitir uma impedância de saída variável (figura 6) e um medidor de tensão de eletrodo. A potência de saída é um dos parâmetros de processo, e a medida da potência refletida é importante para a indicação de descasamentos entre impedâncias do gerador e do plasma, o que justifica a instalação de um medidor de potências dedicado. A malha de acoplamento tem por função ajustar a impedância de saída do gerador de RF, estabelecida em 50 ohms para padronização, à impedância do plasma. Essa malha foi implementada com dois capacitores isolados a vácuo e um indutor com núcleo de ar num circuito tipo "L". O medidor de tensões, também dedicado, realiza as medidas diretamente no eletrodo de RF (catodo) e tem por finalidade fornecer a tensão de pico de RF entre que efetivamente ao plasma e o potencial de auto-polarização do catodo que, no caso da configuração RIE, é uma boa medida da energia de bombardeamento com a qual os íons positivos atingem o eletrodo.

A impedância de saída do gerador de RF foi ajustada com o auxílio de uma carga padrão de 50 ohms, 2000 watts e o refletômetro calibrado através de um medidor de potências incidente e refletida também padrão modelo BIRD-42. A máxima potência obtida com o equipamento foi de 1100 watts, mas essa potência foi reduzida para otimizar o rendimento das válvulas de saída. Os resultados finais obtidos foram: potência de saída máxima de 800 watts, frequência de operação em 13,56 MHz e impedância de saída real igual a 50 ohms resistiva.

Apesar de as corrosões por plasma serem feitas normalmente com potências máximas em torno de 1 watt por centímetro quadrado [25], o que significaria uma potência de até 200 watts para equipamento de corrosão por plasma do LSI, a especificação da potência de saída teve por intuito conferir maior versatilidade de uso ao sistema de RF, interessante pelo crescente número de processamentos em ambiente de plasma, como deposição por "sputtering" ou PECVD ("plasma-enhanced chemical vapor deposition").

Além de suprir uma necessidade imediata para utilização do equipamento de corrosão por plasma, a implementação do gerador de RF apresenta como vantagens o menor custo em relação a um gerador equivalente necessariamente importado, a possibilidade de manutenção adquirida pelo conhecimento do funcionamento e também a eventual capacidade de reprodução, em um tempo sensivelmente menor que o tempo de desenvolvimento.

Uma parte periférica, porém não menos

importante, é aquela relacionada aos instrumentos de análise do processo de corrosão. Além de prestarem-se ao estudo e com preensão dos fenômenos envolvidos, alguns deles são largamente empregados como detetores de ponto final de corrosão [13]. O equipamento de corrosão construído possui as seguintes facilidades para caracterização: sistema de espectrometria de massa, interferômetro, espectrofotômetro e sonda de Langmuir. Quando da construção do equipamento, optou-se pela definição de um sistema simples para espectroscopia da emissão na tentativa de se obter um conjunto para determinação de ponto final com alto índice de nacionalização e baixo custo. Deste modo, um monocromador da FUNBEC (UNICROM 100) de distância focal de 10cm, 200 nm a 900 nm de faixa espectral e largura de banda de 1 nm foi acoplado a uma foto-multiplicadora Hamamatsu (R928 ou R1477); a varredura é feita através de um motor de passo controlado por microcomputador com velocidade de até 6 nm/s. Com esse conjunto pode-se obter informações a respeito de espécies que emitem intensamente no plasma (por exemplo, F*) e variações de emissão que permitam determinar o ponto final da corrosão. O sistema de espectrometria de massa é usado como sistema de análise-padrão e consta de um espectrômetro de massa Quadripolo Balzers QMS 311 e um sistema de bombeamento turbomolecular TPU 170. As câmaras do espectrômetro e do plasma são ligadas por um orifício de 100 μ m e podem ser vistas na figura 5. O arranjo permite retirar uma amostra do plasma com pequena perturbação no sistema.

O interferômetro é um conjunto simples de laser, semi-espelho e fotodetector, que possibilita a determinação do ponto final em qualquer substrato e também o cálculo da velocidade média de corrosão para substratos não refletivos, enquanto uma entrada na câmara de plasma permite inserir uma sonda de Langmuir e monitorar os parâmetros de plasma em qualquer ponto entre os eletrodos.

Convém notar que uma grande vantagem desse sistema de corrosão por plasma é a sua versatilidade e modularidade. Teoricamente pode-se corroer qualquer material desejado. Por uma questão de reprodutibilidade e para evitar-se contaminação cruzada, deve-se reduzir ao mínimo os materiais a serem corroídos em uma mesma câmara, e na sua versão atual o equipamento está programado para realizar as corrosões de SiO₂ e Si-poli. Um procedimento muito utilizado é o compartilhamento de todo o sistema com diversas câmaras, em alguns casos até cinco [26]. Isto é, utilizando-se o mesmo gerador, bombas de vácuo, controladores de fluxo, detetores de ponto final, etc. com diversas câmaras,

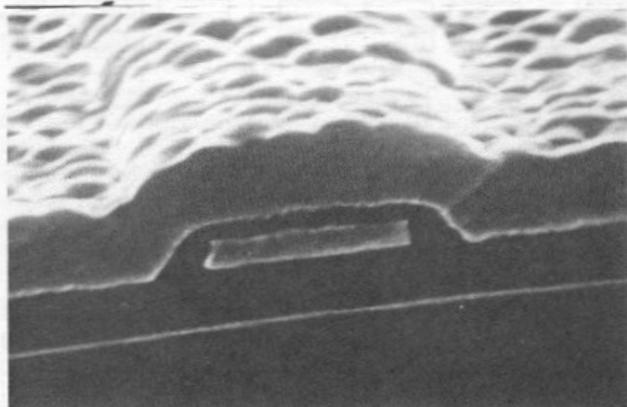
pode-se efetuar corrosões de diversos materiais sem elevar o custo do equipamento significativamente. Por esse motivo está em andamento a construção de uma nova câmara para remoção de fotorresiste. É claro que este é um procedimento possível apenas em laboratório.

IV. RESULTADOS DE PROCESSOS

Inicialmente realizaram-se corrosões com gás inerte (argônio) objetivando verificar a desuniformidade para um mecanismo de corrosão puramente físico, neste caso ligada apenas a fatores geométricos tais como assimetrias ou desalinhamentos (tampa da câmara-eletrodo, por exemplo). Verificou-se que para a faixa de fluxos de 10 sccm a 500 sccm de Ar, pressões entre 1,33 Pa e 40,0 Pa e potências inferiores a 200 W (1W/cm²) a desuniformidade era menor que 3% [18] em lâminas de 50 mm de diâmetro garantindo um bom desempenho para o equipamento.

Também foram realizados os levantamentos para a corrosão do SiO₂ utilizando-se CF₄ (Freon 14) e H₂ como gases de processo tendo-se obtido como resultados ótimos uma taxa de corrosão de 50 nm/min, desuniformidade menor que 3% em 50 mm e eletividades SiO₂:Si de 7:1 e SiO₂:AZ1350J de 25:1. Estes resultados foram obtidos a uma pressão de 13,3 Pa, potência de 200 W e fluxo total de 50 sccm (72,5% de CF₄ e 22,5% de H₂) [19].

Esses levantamentos foram realizados com o auxílio do interferômetro óptico para monitoração da evolução do processo de corrosão e do espectrômetro de massa para verificação das condições de pré-processo e de processo.



Com esses levantamentos conseguiu-se formar espaçadores, como apresentados na figura 7, um passo importante para o obtenção de estruturas "salicide". Estes resultados ainda estão em fase de caracterização.

O equipamento desenvolvido também per-

mitiu a introdução da técnica de duplo fo-torresiste em um processo CMOS de 2 μm , que está sendo realizado como tese de dou-toramento [20].

Além desses processos, está em andamen-to o desenvolvimento de um processo de cor-rusão de silício policristalino para defi-nição da porta de uma estrutura do tipo "salicide". Como objetivos futuros preten-de-se dominar o processo de corrosão de alumínio e também utilizar-se máscaras de revelação a seco. No tocante a estudos bá-sicos de processos assistidos por plasma está em andamento um trabalho de estudo da cinética química das reações no plasma du-rante a corrosão do SiO_2 por meio de espec-trometria de massa e um estudo das caract-erísticas de plasma e sua importância nos resultados de processo utilizando-se son-das de Langmuir.

V. CONCLUSÕES

Apresentou-se um resumo das atividades do LSI (Laboratório de Sistemas Integrá-veis) da EPUSP na área de corrosão a seco aplicada à microeletrônica. Os resultados obtidos demonstram a relevância do traba-lho desenvolvido no domínio da técnica de corrosão a seco.

VI. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao LME/EPUSP por permitir o uso de suas facilidades, ao Prof. Dr. Juan C. Acquadro e ao Prof. Dr. B. Forne-ris do IFUSP pelas sugestões e auxílios prestados durante a construção do equipa-mento, ao Prof. Dr. Edmundo Braga do LED - UNICAMP pelas proveitosas discussões, ao CPqD-Telebrás por permitir a realização de medidas elipsométricas e ao Prof. Dr. Ken-go Imakuma do IPEN por permitir a realiza-ção de medidas com microscópio eletrônico de varredura.

VII. BIBLIOGRAFIA

- [1] . Tolliver, D.L. in "Plasma Processing for VLSI", Academic Press, Orlando, 1984.
- [2] . Salzer Technology Enterprises, Inc. "Plasma Industry Report", janeiro, 1986.
- [3] . Coburn, J.W., IV Of. Bras. de Micro-eletronic., pp 41-82, Campinas, mar-ço, 1983.
- [4] . Chapman, B., "Glow Discharge Proces-ses", John Wiley & Sons Inc., New York, NY, 1980.
- [5] . Fonash, S.J., Sol. St. Tech., 28(1): 150-159, 1985.
- [6] . Reinberg, A.R., Proc. 6th Symp. Pl. Proc. 1 st Int. Symp. ULSI Sci. Tech., 87-11:247-262, The Electrochem.Soc. 1987.
- [8] . Leybold-Heraeus/Inficon, Sol. St. Tech., 29(4):137, 1986.
- [9] . Drytek Inc., "The DRIE Plasma Etching Systems", Cat. Tec. BW 184, 1984.
- [10]. Choe, D.HG et al., Sol. St. Tech., 28(3):165-171, 1982.
- [11]. Hill, M.L. et al., Sol. St. Tech., 28 (4):243-246, 1985.
- [12]. Matsuo, S., J. Vac. Sci. Tech., 17 (2):587-594, 1980.
- [13]. Marcoux, P.J. et al., Sol. St.Tech., 24(04)115-122, 1981.
- [14]. Gottsche, R.A. et al., Pure & Appl. Chem., 56(2):189-208, 1984.
- [15]. Coburn, J.W. et al., J. Vac. Sci & Tech., 18(2):353-356, 1981.
- [16]. Selwyn, G.S., Proc. 6th Symp. Pl. Proc., 87-6:220-253, 1987.
- [17]. Goldfarb, S.R., Sem. Int., October, 1986, pp. 1-25.
- [18]. Coburn, J.W., Rev. Bras. Apl. de Vá-cuo, 7(1-2):1-25, 1987.
- [19]. Brahim, A. "Etude de ions d'un Plas-ma Reactif: Effects d'une Perturba-tion harmonique Imposéé", Tese de Doutorado, Université de Paris-Sud, Centre D'Orsay, 1985.
- [20]. Ishii, I, et al., J. Electrochem. Soc., 133(6):1240-1242, 1986.
- [21]. Mendes, G.F. et al, Thin Solid Films, 117:107-116, 1984.
- [22]. Chapman, B.N. et al., J. Appl. Phys., 17(5):3608-3612, 1980.
- [23]. Seabra, A.C.; Silva, M.L.P.; Zeitoun-lian, J., Relat. Tec. n.º.1, LSI/EPUSP, apres. à FIPEC-B.B., maio, 1985.
- [24]. Vogel, D. et al., SPIE, 772:152-158, 1987.
- [25]. Seabra, A.C.; Silva, M.L.P.; Zuffo, J.A., II Cong. Soc. Bras. Microel., pp. 539-548, São Paulo, 1987.
- [26]. Seabra, A.C. et al., III Cong. Soc. Bras. Microel., pp.166-174, São Paulo, 1988
- [27]. Martino, J.A. et al., II Cong. Soc. Bras. Microel., pp.466-478, São Paulo, 1987.